ОАО «Гомсельмаш»
Научно-технический
центр комбайностроения

Инновационные технологии в агропромышленном комплексе - сегодня и завтра

Сборник научных статей девятой международной научно-практической конференции

Часть 1

5 ноября 2025 года
г. Гомель, Республика Беларусь

Министерство промышленности Республики Беларусь
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»
Национальная академия наук Беларуси
Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь
Министерство образования Республики Беларусь

9-ая МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ - СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

5 ноября 2025 г.

Сборник научных статей 9-ой международной научно-практической конференции

В 2 частях
Часть 1

Гомель, Республика Беларусь

УДК 631.3:620.22:001895

Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: Сборник научных статей 9-ой международной научно-практической конференции: В 2 ч. Ч. 1 - Гомель: Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2025. - 260 с.

ISBN 978-985-6477-70-9

В сборнике опубликованы научные статьи участников 9-ой международной научно-практической конференции **«Инновационные технологии в агропромышленном комплексе - сегодня и завтра»,** посвященные состоянию, тенденциям и направлениям развития сельскохозяйственного машиностроения в области создания тракторов, универсальных энергетических средств, навесных и прицепных машин, машин для уборки зерновых культур, кормов и корнеклубнеплодов, новых материалов, методов проектирования с использованием компьютерных технологий, методов повышения конкурентоспособности сельскохозяйственных машин, включая критерии надежности и безопасности.

© ОАО «Гомсельмаш», 2025

СЕКЦИОННЫЕ СТАТЬИ

СЕКЦИЯ № 1

«ТЕНДЕНЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ УБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО»

УДК 631.354.2

ОТДЕЛЕНИЕ ЛЕГКИХ КОМПОНЕНТОВ ОЧЕСАННОГО ВОРОХА В КОРПУСЕ АДАПТЕРА ПОСРЕДСТВОМ ЖАЛЮЗИЙНОЙ РЕШЕТКИ

В.Н. Ожерельев[1], В.Ю. Савин[2], В.В. Никитин[1], И.П. Адылин[1]
[1] Брянский государственный аграрный университет, г. Брянск, Россия
[2] Калужский филиал МГТУ имени Н.Э. Баумана, г. Калуга, Россия

Установлено, что предварительное удаление из очесанного зернового вороха хотя бы части легких примесей способствует увеличению эффективности сепарации свободного зерна на решетчатой поверхности [1]. Изучение физико-механических свойств очесанного вороха свидетельствует о том, что большая часть легких примесей имеет размеры, превышающие как размеры зерен убираемой культуры, так и диаметр отверстий сетчатых поверхностей корпуса очесывателя. Следовательно, для разделения зерна и легких примесей сопоставимых с ним по размерам целесообразно использовать один из вариантов инерционного способа сепарации, как это практикуется в воздуховодах зерноочистительных машин.

Наиболее приемлемым техническим решением, способным реализовать предлагаемую идею, является размещение на задней стенке корпуса адаптера жалюзийной решетки [2].

Для экспериментальной оценки гипотезы была использована очесывающая жатка ОЗОН, изготовленная в ПАО ПЕНЗМАШ (рис. 1). Было предложено заменить сетчатые окна в задней стенке 6 корпуса адаптера на жалюзийные решетки 7. Предполагалось, что воздушный поток 2, содержащий все группы компонентов, в районе сетчатой крышки 3 корпуса потеряет часть напора в связи с выходом воздуха по стрелке 4. Часть потока в зоне задней стенки 6 изменяет направление движения на преимущественно вертикальное (сверху-вниз). При этом большая часть зерна, колосьев и других наиболее тяжелых компонентов выпадает на

днище 11 корпуса и подается шнеком 12 в наклонную камеру. Избыточный воздушные поток 8 резко изменяет направление движения, проходя снизу-вверх сквозь отверстия жалюзийной решетки 7. При этом он захватывает и выводит из корпуса часть легких примесей, обладающих наибольшей парусностью и сопоставимых по размерам с зерном.

Эксперимент был спланирован как двухфакторный. Полоски жалюзи имели ширину по 80 мм и длину 680 мм. В опытах изменяли угол наклона полосок жалюзи α, который принимал последовательно значения 55^0, 65^0 и 75^0. Параллельно с этим изменялось количество полос и расстояние между ними (40, 80 и 60 мм, соответственно). На рамках сменных решеток были закреплены шпильки диаметром 6 мм, на которых размещали сетчатый контейнер для улавливания выводимых воздушным потоком легких примесей.

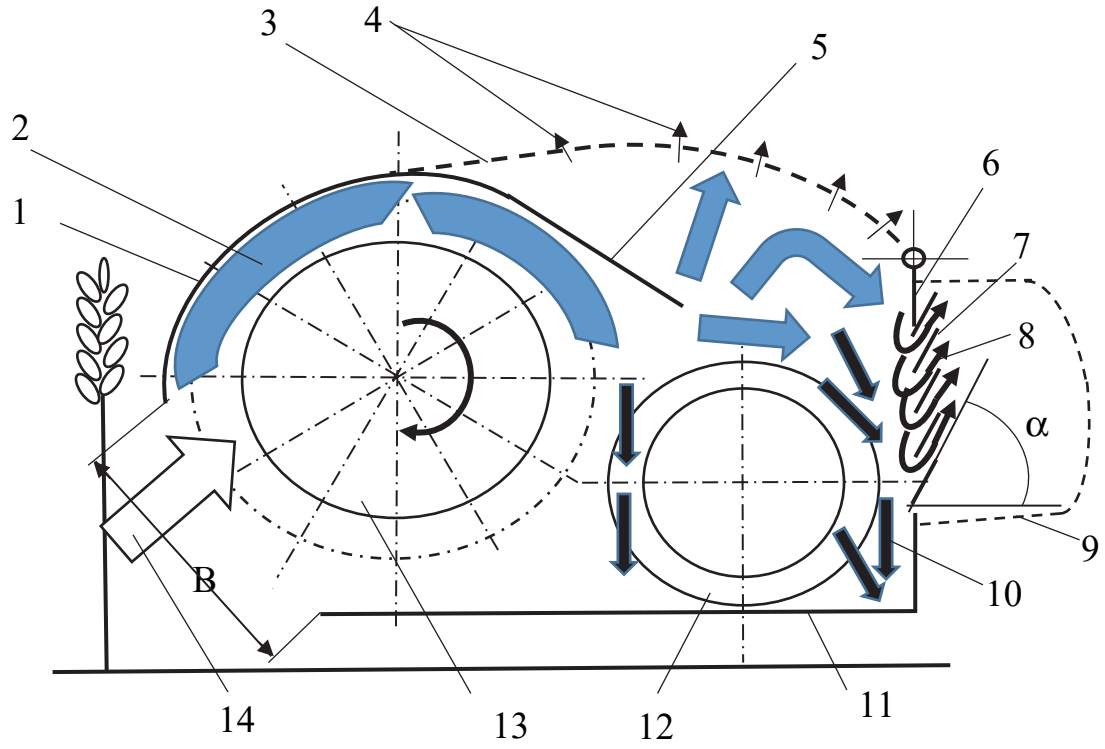


Рис. 1– Схема пневмосепарации легких компонентов очесанного вороха посредством жалюзийной решетки:
1 – щиток передний (регулируемый); 2 – исходный очесанный ворох (с воздухом); 3 – крышка сетчатая; 4 – выходящий через сетчатую крышку воздушный поток с наиболее мелкими примесями; 5 – щиток внутренний наклонный; 6 – стенка корпуса задняя; 7 – решетка жалюзийная; 8 – воздушный поток с легкими примесями задняя; 9 – контейнер сетчатый; 10 – зерно, колосья и другие наиболее тяжелые компоненты очесанного вороха; 11 – днище корпуса; 12 – шнек; 13 – барабан очесывающий; 14 – входящий воздушный поток

Эксперимент проводили на опытном поле учебного хозяйства Брянского ГАУ. Очесывали пшеницу сорта Амелия при влажности ее зерна 15% и урожайности 52 ц/га. Длина опытной делянки составляла 10 метров. Каждый вариант опыта был выполнен в трех повторностях.

После прохода каждой делянки сетчатый контейнер снимали со шпилек и его содержимое (легкие примеси и отдельные зерна) пересыпали в отдельные мешки (рис. 2). Разбор вороха и взвешивание его компонентов выполняли на стационаре. Результаты учетов приведены в таблице.

Если оценивать вынос зерна, то по вариантам опыта он варьировался в пределах от 0,057 до 0,653% потенциального урожая. При этом минимальный уровень выноса характерен для угла наклона полосок жалюзи 75^0 и расстояния между ними по высоте равном 60 мм.

Если исходить из того, что урожай зерна, убранный с полосы длиной десять метров и шириной, равной ширине жалюзивной решетки, составляет 5,2 кг, то вынос с воздушным потоком легких примесей составит порядка 10% от их наличия в очесанном ворохе. При этом максимум вывода легких примесей соответствует максимальному уровню выноса зерна.

Рис. 2 – Экспериментальная установка подготовлена к очередному опыту

Таблица – Выведение легких примесей и зерна с воздушным потоком

№ опыта	Угол наклона полоски, α^0	Выведено из корпуса с воздушным потоком, гр.	
		Примесей легких	Зерна / % от урожая
1	75	26	3 / 0,057
2	75	47	5 / 0,096
3	75	57	6 / 0,115
4	65	32	15 / 0,288
5	65	38	10 / 0,192
6	65	54	13 / 0,25
7	55	88	22 / 0,422
8	55	76	33 / 0,634
9	55	66	34 / 0,653

Для оценки значимости вынесенной части легких примесей будем иметь в виду, что ее объемная масса в пять раз меньше объемной массы зерновой смеси. То есть, потеря 10% легких примесей по массе соответствует уменьшению общего объема очесанного вороха, поступившего на сепарацию в наклонную камеру, минимум на 5%. Соответственно, на такую же величину должна увеличиться скорость сепарации свободного зерна. С точки зрения конкурентоспособности техники 5% увеличения ее производительности является достаточным основанием для выполнения соответствующей модернизации конструкции. Тем более, что в данном случае не предполагается ее заметное усложнение и увеличение цены. Жалюзийная решетка по металлоемкости и трудоемкости изготовления практически не отличается от имеющихся в исходной конструкции съемных сетчатых окон.

Что касается потери зерна, то пока конструкция до конца не оптимизирована, в связи с чем в ней присутствует достаточный резерв для совершенствования. В частности, целесообразно рассмотреть баланс воздушного потока в разных зонах объема корпуса. Кроме того, ширина полосок жалюзи и расстояние между ними были приняты априори, без достаточного теоретического обоснования и при полном отсутствии экспериментальных данных, поскольку конструкция реализована на практике впервые.

Следует отметить, что установка сетчатого контейнера для улавливания продуктов выноса через жалюзийную решетку (рис. 2) заметно нарушает естественный процесс движения воздуха и соответствующих компонентов вороха. Это также один из резервов увеличения эффективности сепарации. Что касается потери порядка 0,1% зерна, то резерв для ее уменьшения также присутствует и может быть реализован в

результате дальнейшей оптимизации конструкции и за счет выхода очесывателя на установившийся режим работы, исключающий пусковые и остановочные режимы, в значительной степени влияющие на результат при длине делянки равной 10 метров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Савин В.Ю. Влияние состава очесанного зернового вороха на эффективность его сепарации на решетчатой поверхности // Наука в центральной России. 2024. №2 (68). С. 7 – 14.

2. Пат. №2566017 (РФ) МПК[7] A01D 41/08. Устройство для обмолота растений на корню / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин – Опубл. 20.10.15, Бюл. №29.

УДК 631.333 –189.2

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

А.А. Жешко
РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»,
г. Минск, Республика Беларусь

Машины для внесения минеральных удобрений должны не только качественно распределять их по поверхности поля, но также иметь возможность отработать весь амортизационный срок с минимальными затратами труда и денежных средств на проведение технических обслуживаний и ремонтов. По этой причине перед постановкой на серийное производство конструкция машин должна быть тщательно проработана.

Для повышения надежности основных элементов машин для внесения удобрений у завода-изготовителя должна иметься достоверная информация об эксплуатационных показателях и количествах отказов базовых узлов и механизмов. Наличие подобной информации при постановке на производство позволит точно спрогнозировать потребность в определённых узлах и исключить возможный дефицит запасных частей в процессе эксплуатации.

На рисунке 1 представлена поэлементная схема машины для внесения удобрений в наиболее общем виде. Динамическая модель представлена на рисунке 2.

Разбрасыватель удобрений всегда имеет накопительную емкость, которая в зависимости от агрегатного состояния удобрений может представлять собой цистерну для жидкости, либо кузов для сыпучих видов удобрений. Основными характеристиками накопительных емкостей являются геометрические параметры и вместительность.

Рис. 1 – Поэлементная схема машины для внесения удобрений

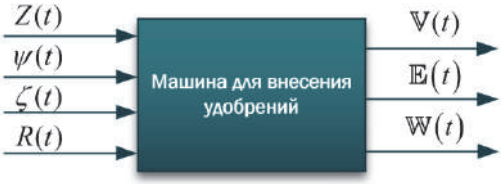


Рис. 2 – Динамическая модель машины для внесения удобрений

Также важнейшим элементом машин для внесения удобрений выступает дозатор, который предназначен для регулируемой подачи потока жидких либо твердых минеральных удобрений к рабочим органам.

Вспомогательными элементами машин для внесения удобрений являются сводообрушители и побудители, которые сводят к минимуму зависание и сводообразование в накопительных емкостях, застой сыпучего материала в мертвых зонах. В некоторых машинах для внесения удобрений, оборудованных цепочно-планчатыми транспортерами, применяются выравнивающие устройства, позволяющие снизить неравномерность подачи удобрений на распределяющие рабочие органы. Также довольно важным конструктивным элементом является подающее устройство. Данный элемент присутствует не у всех машин. Например, в навесном разбрасывателе штанговом для внесения подкормочных доз твердых минеральных удобрений РШУ-18 удобрения самотеком подаются из бункера в загрузочную горловину штанги, таким образом бункер в совокупности с туконаправителем образует гравитационный тип питателя. Полуприцепные разбрасыватели, например машина МШВУ-18, требует наличия специального устройства, которое перемещает материал из кузова к штанговым распределяющим рабочим органам. В машине для внесения жидких удобрений в качестве подающего устройства используются напорный трубопровод, для раздельной подачи порции жидких удобрений используется делитель потока.

Во время внесения удобрений мощность двигателя трактора расходуется на совершение полезной работы, а также на преодоление внутренних и внешних сил сопротивления движению машинно-тракторного агрегата по рабочему участку. При установившемся режиме работы баланс мощности представляется в следующем виде [1, с. 21, 2, с. 4 – 11, 3, 4 с. 144 – 149]

$$N_{\mathrm{e}} = N_{\mathrm{tgv}} + N_{\mathrm{prv}} + N_{\mathrm{kch}} \pm N_{\mathrm{\alpha pd}} + N_{\mathrm{\delta bk}} + N_{\mathrm{mtr}}, \tag{86}$$

где N_{e} – эффективная мощность двигателя трактора, кВт;

N_{tgv} – затраты мощности на перемещение полуприцепного разбрасывателя, кВт;

$$N_{\mathrm{tgv}} = \frac{\upsilon_{\mathrm{rzb}} G_{\mathrm{rzb}}}{3600}\left(f_{\mathrm{rzb}} + \frac{i_{\mathrm{ukl}}}{100}\right), \tag{87}$$

где G_{rzb} – вес разбрасывателя удобрений, кН;

f_{rzb} – коэффициент сопротивления качению ходовых колес разбрасывателя, $f_{\mathrm{rzb}} = 0{,}33 – 0{,}15$ [1, с. 258]

i_{ukl} – средний уклон местности, %;

N_{prv} – затраты мощности на привод подающих $N_{\text{prv}}^{\text{pod}}$ и распределяющих $N_{\text{prv}}^{\text{rsp}}$ рабочих органов, кВт;

Для определения затрат мощности на привод подающих рабочих органов воспользуемся эмпирической формулой [5, с. 71]

$$N_{\text{prv}}^{\text{pod}} = \left(0{,}38 \cdot 10^{-2} Q_{\text{rzb}}^{0{,}85} + 0{,}8\right) \frac{736}{10^{-3}}, \tag{88}$$

Затраты мощности на привод распределяющих рабочих органов с некоторым допущением определим как мощность, затрачиваемою на перемещение удобрений для распределения по ширине захвата разбрасывателя, т.е.

$$N_{\text{prv}}^{\text{rsp}} = g\, \omega_{\text{spr}} q_{\text{skn}} B_{\text{rzb}} \cdot 10^{-3},$$

где ω_{spr} – эмпирический коэффициент, согласно [6, с. 113], $\omega_{\text{spr}} = 15$;

q_{skn} – секундная производительность шнека, кг/с.

$N_{\text{kch}} \pm N_{\alpha\text{pd}}$ – затраты мощности на передвижение трактора и преодоление подъема, кВт,

Согласно [7, с.88] для определения данных составляющих баланса мощности запишем

$$N_{\text{kch}} \pm N_{\alpha\text{pd}} = \upsilon_{\text{rzb}} G_{\text{trc}} \left(f_{\text{trc}} \pm \frac{i_{\text{ukl}}}{100} \right) \tag{89}$$

где G_{trc} – вес трактора, кН;

f_{trc} – коэффициент сопротивления качению ходовых колес трактора, согласно [7, с. 253] f_{trc} = 0,16 – 0,20.

$N_{\delta\text{bk}}$ – затраты мощности на буксование, кВт, [1, с. 21]

$$N_{\delta\text{bk}} = \frac{N_{\text{e}} \eta_{\text{mgt}} \delta_{\text{bks}}}{100}, \tag{90}$$

где η_{mgt} – коэффициент, учитывающий механические потери в трансмиссии энергетического средства, согласно [7, с. 84] для современных тракторов η_{mgt} = 0,75 – 0,80.

Согласно ГОСТ 7057–81 (ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90)) буксование колесных движителей трактора не должно превышать 15 %.

N_{mtr} – потери мощности в трансмиссии трактора, кВт.

$$N_{\text{mtr}} = N_e \left(1 - \eta_{\text{mgt}}\right). \tag{91}$$

На рисунке 3 представлен мощностной баланс, подсчитанный на примере разбрасывателя МШВУ-18. Для расчетов приняты следующие параметры: скорость разбрасывателя υ_{rzb} = 12 км/ч, масса разбрасывателя G_{rzb} = 5600 кг, коэффициент сопротивления качению ходовых колес разбрасывателя f_{rzb} =0,2, трактора f_{trc} = 0,16; секундная производительность шнека, q_{skn} = 0,73 кг/с; коэффициент, учитывающий механические потери в трансмиссии энергетического средства η_{mgt} = 0,75.

На рисунке 4 представлена зависимость потребляемой мощности от грузоподъемности разбрасывателя удобрений.

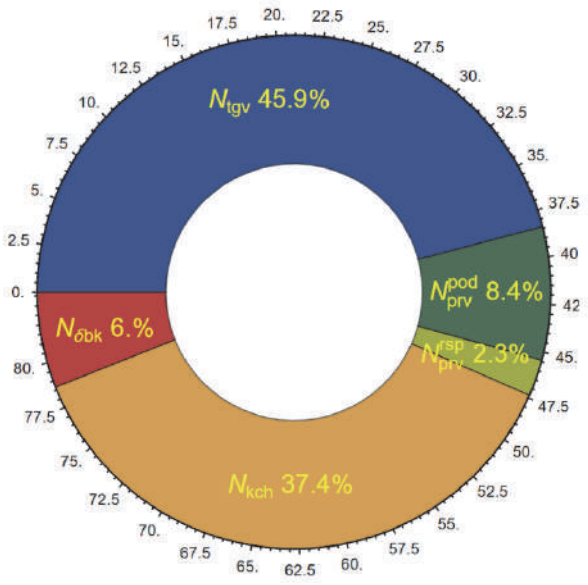


Рис.3 – Мощностной баланс разбрасывателя удобрений (на примере МШВУ-18)

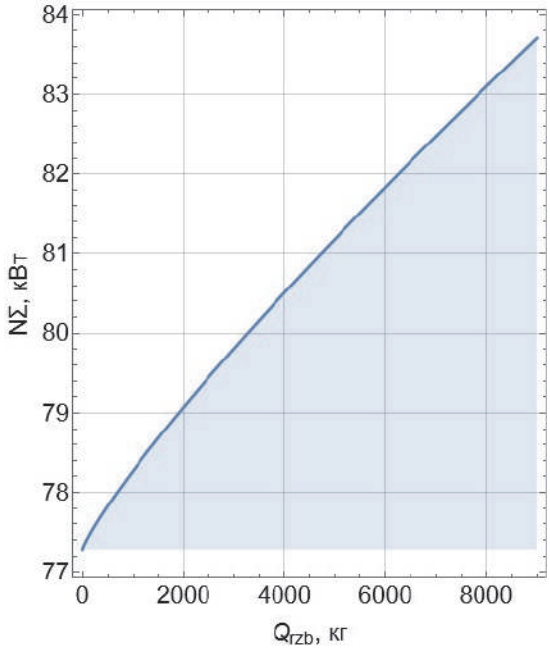


Рис. 4 – Зависимость потребляемой мощности от грузоподъемности разбрасывателя удобрений

Как видно из рисунка 4 для полуприцепного разбрасывателя основные затраты мощности ложатся на его перемещение по полю и составляют более 45 %. Затраты мощности на привод подающих и распределяющих рабочих органов немного превышают 10 %, что свидетельствует о высокой энергетической эффективности и целесообразности использования навесных штанговых разбрасывателей удобрений, для которых затраты мощности на привод распределяющих рабочих органов не превышают 8,5 %, однако ввиду малого объема накопительных емкостей применение данных разбрасывателей требует сравнительно частых дозагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эксплуатация машинно-тракторного парка: Учеб. пособие для с.-х. ВУЗов / А.П. Ляхов, А.В. Новиков, Ю.В. Будько. – Мн.: Ураджай, 1991. – 336 с.

2. Салават, Г.М. Результаты экспериментальных исследований по определению мощности на привод ротора разбрасывателя органических удобрений / Г.М. Салават. М. Гумерович, И.Р. Рахимов, И.А. Гайнуллин, А.Р. Пацкань // Пермский аграрный вестник. 2023. №2 (42).

3. Андреев, К.П. Силовое взаимодействие лопасти ворошителя со слоем удобрений / К.П. Андреев, М.Ю. Костенко, А.В. Шемякин // Вестник Ульяновской ГСХА. 2017. №2 (38).

4. Бачурин, Р.Н. Энергооценка машинно-тракторного агрегата при внесении жидких минеральных удобрений / Р.Н. Бачурин, В.И. Беляев, Д.Н. Пирожков // Вестник АГАУ. 2019. №11 (181). – с. 144 – 149.

5. Догановский, М.Г. Машины для внесения удобрений. Конструкция, теория, расчет и испытания / М. Г. Догановский, Е.В. Козловский. – Москва: «Машиностроение», 1972. – 272 с.

6. Григорьев, А.М. Винтовые конвейеры / А.М. Григорьев. – М. Машиностроение. – 1972. – 184 с.

7. Технологии и техническое обеспечение производства продукции растениеводства. Курсовое проектирование : учебное пособие / сост.: Т. А. Непарко, Д. А. Жданко, А. В. Нагорный ; под ред. Т. А. Непарко. – Минск : БГАТУ, 2022. – 268 с.

УДК 631.171:631.3(476)

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПАРКА ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ

В.И. Володкевич, А.А. Жешко, А.В. Шах, О.В. Жаврид
РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»,
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. *В статье рассмотрены принципиальные подходы по формированию стратегии технического переоснащения парка зерноуборочных комбайнов на основе оптимизации их перспективного типоразмерного ряда для обеспечения выполнения работ в оптимальные агротехнические сроки, сниже-ния потерь и эксплуатационных затрат на данном этапе работ производства зерна в сельскохозяйственных организациях республики.*

Ключевые слова: программное приложение, зерноуборочные комбайны, предельная производительность, логистические потоки, типоразмерный ряд, машинные технологии, приоритетные направления, уровень производства, зерновые и зернобобовые

Цель работы – формирование стратегии технического переоснащения парка зерноуборочных комбайнов на основе оптимизации их перспективного типоразмерного ряда для обеспечения выполнения работ в оптимальные агротехнические сроки, снижения потерь и эксплуатационных затрат на данном этапе работ производства зерна в сельскохозяйственных организациях республики.

Методы исследований – применены информационные методы, в том числе аналитические и статистические методы обработки данных и анализа информации, современный системный подход.

Results of designing a software application for forming the structure of a fleet of grain harvesting combines

V. I. Volodkevich, A.A. Zheshko, A. V. Shakh, O. V. Zhavrid
Republican Unitary Enterprise "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization",
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. *The article examines fundamental approaches to the formation of a strategy for the technical re-equipment of a fleet of grain harvesting combines based on the optimization of their promising standard-size series to ensure that*

work is completed within optimal agrotechnical timeframes, reduction of losses and operating costs at this stage of grain production work in agricultural organizations of the republic.

Key words: software application, grain harvesters, maximum productivity, logistics flows, standard size range, machine technologies, priority areas, production level, grain and leguminous crops

The aim of the work – development of a strategy for the technical re-equipment of the fleet of grain harvesting combines based on the optimization of their promising size range to ensure the performance of work within optimal agrotechnical timeframes, reducing losses and operating costs at this stage of grain production work in agricultural organizations of the republic.

Research methods – information methods were applied, including analytical and statistical methods of data processing and information analysis, a modern systems approach.

Введение

Агропромышленный комплекс занимает важнейшее место в экономике Республики Беларусь и в значительной степени определяет состояние всего народохозяйственного потенциала, стабильность социально-экономической ситуации в обществе, а также уровень продовольственной безопасности страны. Огромную роль в ее обеспечении играет своевременная и качественная уборка зерновых культур, которая в настоящее время невозможна без парка надежной уборочной техники. С учетом коэффициента технической готовности зерноуборочных комбайнов в период массовой уборки, который в большинстве случаев не превышает 85 %, сроки уборки в действительности могут превысить допускаемые в 1,5–2,0 раза, что вызывает необходимость в проведении работ по оптимизации состава и структуры парка зерноуборочных комбайнов в реальных условиях их эксплуатации с использованием для этих целей программного приложения.

Изложение основного материала исследования.

Программное приложение по определению оптимального состава парка зерноуборочных комбайнов в реальных эксплуатационных условиях состоит из нескольких взаимосвязанных модулей, взаимодействие которых позволяет:

- выделить рабочий участок или группу полей путем прорисовки контура с использованием картографических сервисов;
- обозначить сетку дорог и возможных маршрутов движения от рабочего участка до зерноочистительного комплекса;

- сформировать наборы уборочной и вспомогательной техники для организации уборочных работ в реальных производственных условиях с учетом конфигурации и размеров поля, расстояния транспортировки зерна от рабочего участка до зерноочистительного комплекса;

- вычислить предельную производительность для конкретного уборочного звена в реальных условиях эксплуатации;

- определить потребность в комбайнах конкретной марки для выполнения уборочных работ в конкретных производственных условиях;

- путем сопоставления потребности в комбайнах и транспортных средствах для выполнения уборочных работ для конкретных полей, где возделываются зерновые культуры в определенном хозяйстве, исходя из наличия техники и с учетом возможного технического переоснащения определить рациональный состав парка зерноуборочной техники и транспортных средств.

На рисунке 1.1 представлен модуль выделения рабочего участка. С использованием инструментов картографического сервиса выделим полигон, который соответствует группе близлежащих полей, на которых возделываются зерновые культуры на примере РСДП «Экспериментальная база «Зазерье». Площадь рабочего участка составляет 275,91 га. Средняя длина гона - 820 м.

Рис. 1.1 – Модуль выделения рабочего участка

Для определения оптимального маршрута движения воспользуемся соответствующим модулем, представленным на рисунке 1.2. С учетом построенной сетке грунтовых и асфальтированных дорог, кратчайший путь от выделенного для рассмотрения рабочего участка проходит по гравийному участку протяженностью 900 м и асфальтированному участку протяженностью 920 м. Общая протяженность маршрута от рабочего

участка до зерноочистительного комплекса составляет 1,82 км. Среднее время одного рейса - 5,46 мин.

Рис. 1.2 – Модуль вычисления оптимального маршрута движения от рабочего участка до зерноочистительного комплекса

Для уточнения предельной производительности определенного уборочного звена для рассматриваемых условий эксплуатации воспользуемся соответствующим модулем, представленным на рисунке 1.3. Для этого сформируем уборочное звено. Выберем из выпадающего списка 1 марку зерноуборочного комбайна, на примере КЗС-1218 Палессе GS12. Из выпадающего списка 2 выбираем тип транспортного агрегата, которым может быть тракторный транспортный агрегат, или автотранспорт. Выбираем автотранспорт. Из выпадающего списка 3 выбираем марку транспортного агрегата, например МАЗ 457040, который планирует приобрести хозяйство. Заполняем редактируемые элементы 4 числовыми значениями урожайности, расстояния транспортировки зерна, среднего уклона местности, длины и ширины участка, насыпной плотностью зерна. Также указываем затраты времени смены на ежесменное техническое обслуживание и другие составляющие баланса времени смены. В редактируемых полях 6 указываем мощность, массу, радиус поворота и удельный расход топлива для выбранного зерноуборочного комбайна. Эти данные подтягиваются автоматически из базы данных, однако при необходимости их можно редактировать. Далее, из выпадающего списка выбираем тип монтируемого оборудования – жатка для уборки зерновых культур, из списка 8 выбираем марку жатки ЖЗК-6. В поле 8 отобразится ширина захвата выбранной жатки. Автоматически заполняемые элементы характеристик транспорта 9 заполняются после выбора транспорта. После выбора всех транспортных средств, комбайна и монтируемого оборудования на форме появляются их изображения 5. Далее нажимаем на кнопку «Выполнить расчет» и получаем результаты вычислений в специальной форме.

Расчеты показывают, что для выбранных условий (урожайность 5 т/га, расстояние транспортировки 1,82 км средний уклон местности 1 %, длина участка 820 м, ширина 450, плотность зерна 0,78 т/м³) часовой расход топлива комбайна составляет 55,9 кг/ч, рабочая скорость движения 1,7 м/с, коэффициент загрузки на рабочем ходу 0,8, количество отвозок от комбайна 18 рейсов. Путь, проходимый за время заполнения бункера комбайном, составляет 1200 м, время заполнения бункера 11,7 мин время заполнения кузова МАЗ 457040 составляет 12 мин. Учитывая, что среднее время одного рейса составляет 5,46 мин, а также с учетом дополнительного времени на взвешивание, маневрирование и разгрузку транспорта на зернотоке, для исключения простоев комбайна необходимо использовать 2 – 3 транспортных средства. Производительность комбайна КЗС-1218 Палессе GS12 для рассматриваемых производственных условий составляет 0,72 га/цикл.

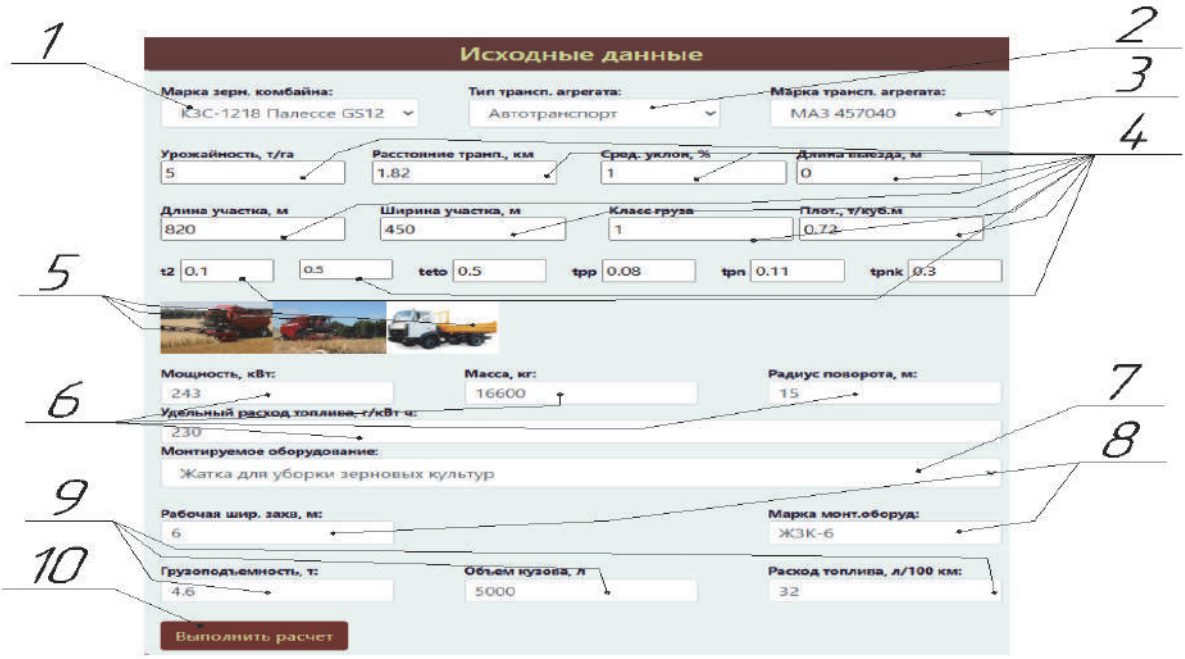
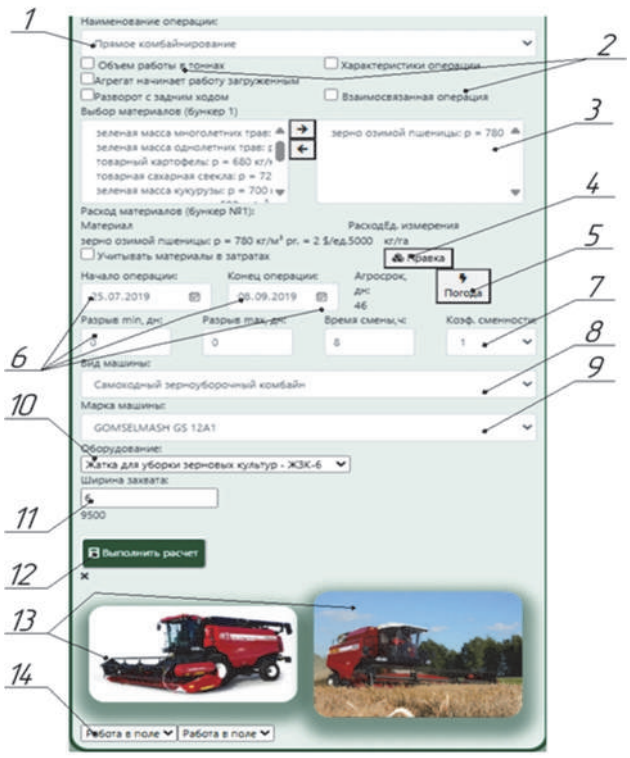


Рис. 1.3 – Модуль для расчета операционно-технологических показателей процесса уборки зерновых культур

1 – селектор выбора марки зерноуборочного комбайна; 2 – селектор выбора типа транспортного средства; 3 – селектор выбора марки транспортного средства; 4 – редактируемые элементы для ввода исходных данных; 5 – изображения выбираемых технических средств и монтируемого оборудования; 6 – автоматически заполняемы элементы характеристик комбайнов; 7 – селектор выбора монтируемого оборудования; 8 – автоматически заполняемые элементы характеристик монтируемого оборудования; 9 – автоматически заполняемые элементы характеристик транспорта; 10 – кнопка выполнения расчета.

Для определения рационального количества зерноуборочных комбайнов на выбранном для рассмотрения участке площадью 275,91 га где возделывается озимая пшеница, воспользуемся соответствующим модулем, представленном на рисунке 1.4.



1 – выпадающий список для выбора типа операции; 2 – дополнительные условия работы; 3 – инструмент для выбора плотности сыпучего материала; 4 – инструмент для редактирования урожайности зерновых культур; 5 – погодный калькулятор; 6 – инструмент для редактирования сроков выполнения работ; 7 – селектор коэффициента сменности; 8 – селектор выбора вида машины; 9 – селектор выбора марки машины; 10 – селектор выбора марки жатки; 11 – поле ширины захвата комбайна; 12 – кнопка запуска вычислений; 13 – изображения комбайна и жатки; 14 – поле выбора маршрута движения

Рис. 1.4 – Модуль вычисления потребности в зерноуборочных комбайнах

Для выполнения вычислений необходимо из выпадающего списка 1 выбрать тип операции – прямое комбайнирование или раздельная уборка. Далее необходимо указать дополнительные условия 2. Объем работы может вычисляться в убранных гектарах или в тоннах собранного зерна. Дополнительно можно указать взаимосвязанные операции по взаимодействию с транспортными агрегатами. С помощью инструмента для выбора плотности сыпучего материала 3 указать плотность зерна. В рассматриваемом случае это пшеница насыпью, поэтому указываем насыпную плотность 0,78 т/м³. С помощью инструмента 4 указать урожайность, для приведенного примера урожайность составляет 5 т/га. Далее указываем сроки выполнения работ с помощью интерактивных календарей 6. При необходимости можно воспользоваться погодным калькулятором 5, который позволяет на основании собранных данных о метеонаблюдениях корректировать выбранные агротехнические сроки. Дополнительно необходимо указать коэффициент сменности путем

использования селектора 7. Далее выбирают вид машины, марку комбайна и жатки с использованием селекторов 8, 9 и 10 соответственно. После выбора жатки в поле 11 отобразится ее ширина захвата. Дополнительно с использованием полей ввода 14 указать маршруты движения в случае, если вычисляется работа транспортных агрегатов. По завершению выбора необходим нажать на кнопку «Выполнить расчет».

Результаты вычисления потребности в зерноуборочных комбайнах для выполнения работ в конкретных производственных условиях представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты вычисления потребности в зерноуборочных комбайнах для выполнения работ в конкретных производственных условиях

Марка комбайна	Марка жатки	Пропускная способность, кг/с	Потребность в комбайнах при урожайности 5 т/га в зависимости от срока выполнения работ, дней (при работе в 1 смену 8 ч)							Цена комбайна, руб.
			1	2	3	4	5	6	7	
GOMSELMASH GS 12A1	ЖЗК-6	12,0	13,4	6,7	4,6	3,34	2,67	2,23	1,91	450 600
GOMSELMASH GS GH810/812	ЖЗК-7-7	12,8	11,8	5,98	3,96	2,94	2,38	1,98	1,69	674 067
GOMSELMASH GS GH2124	ЖЗК-9-2	20,0	9,7	4,88	3,57	2,44	1,95	1,68	1,39	757 239

Из таблицы 1.1 видно, что существенная дифференциация количества комбайнов, необходимых для выполнения уборочных работ в рассматриваемом случае наблюдается при сжатых сроках выполнения работ. Например, если на уборку рассматриваемых 275,91 га отведен 1 день. Для таких темпов необходимо наличие значительного количества комбайнов и затрат материальных средств. Если работы можно выполнить в течение недели, то выполнения заданного объема необходимо использовать 2 комбайна любой из представленных в расчётах (таблица 1.1) марок.

Заключение

В результате исследований установлено, что оптимизация парка зерноуборочных комбайнов является многокритериальной задачей. На выбор качественного и количественного состава влияют погодные условия в период уборки, наличия квалифицированных механизаторов, наличия транспортных средств для отвозки зерна, материальных ресурсов сельскохозяйственного предприятия, размеров хозяйства, удаленности убираемых участков от зерноочистительных комплексов, организации уборочных работ, расстояния между участками, на которых возделываются

зерновые культуры, урожайности, контурности полей и ряда других факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1 Коннолли Т. Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика /Т. Коннолли, К. Бегг, 3-е изд.: Пер. с англ.: Уч. пос. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2003, 2003. – 1440 с.

2 Гадельшина Г.А. Основы проектирования баз данных / Г.А. Гадельшина / Казан. гос. технолог. университет/ А.Н.Валеева, А.В.Аксянова, Е.Н.Нуруллина. Казань, 2006. 60 с.

3 Привалов Ф.И. Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных культур: сб. отраслевых регламентов / Нац. акад. наук Беларуси, НПЦ НАН Беларуси по земледелию; рук. разраб. : Ф.И. Привалов [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 288 с.

4 Карпова И.П. Проектирование реляционных баз данных / Московский государственный институт электроники и математики; Сост.: И.П. Карпова. – М., 2010. – 32 с.

5 Попова-Коварцева Д.А. Основы проектирования баз данных: учеб. пособие / Д.А. Попова-Коварцева, Е.В. Сопченко. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 112 с.

6 Хомоненко А.Д. Базы данных: учебник для высших учебных заведений / А.Д. Хомоненко, В.М. Цыганков, М.Г. Мальцев; под ред. проф. А.Д. Хомоненко. – 6–е изд., доп. – СПб. : КОРОНА–Век, 2009. – 736 с.

7 Вендров А.М. CASE–технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем / А.М. Вендров. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 176 с.

УДК 631.171:631.3(476)

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СТРУКТУРЫ ПАРКА ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Н.Г. Бакач, В.И. Володкевич, А.В. Шах, О.В. Жаврид
РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»,
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены принципиальные подходы по формированию перспективной структуры парка зерноуборочных комбайнов для эффективного использования в условиях сельскохозяйственных организаций Республики Беларусь.

Ключевые слова: зерновые и зернобобовые культуры, технические культуры, самоходные зерноуборочные комбайны, производительность, эффективность применения техники, агротехнические сроки, технологическая потребность.

Цель работы – формирование перспективной структуры парка зерноуборочных комбайнов для обеспечения уборки зерна в оптимальные агротехнические сроки и повышения качества работ в условиях сельскохозяйственных организаций Республики Беларусь.

Методы исследований – применены информационные методы, включающие аналитические и статистические методы обработки данных и анализа информации, современного системного подхода.

N. G. Bakach, V. I. Volodkevich, A. V. Shakh, O. V. Zhavrid

Republican Unitary Enterprise "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization",
Minsk, Republic of Belarus

Formation of a promising structure of the fleet of grain harvesting combines for the conditions of agricultural organizations of the Republic of Belarus

Abstract. The article examines the fundamental approaches to the formation of a promising structure of the fleet of grain harvesting combines for effective use in agricultural organizations of the Republic of Belarus.

Key words: grain and leguminous crops, industrial crops, self-propelled grain harvesters, productivity, efficiency of equipment use, agronomic terms, technological needs.

The aim of the work - is to form a promising structure of the fleet of grain harvesting combines to ensure grain harvesting within optimal agrotechnical timeframes and to improve the quality of work in the conditions of agricultural organizations of the Republic of Belarus.

Research methods – information methods were used, including analytical and statistical methods of data processing and information analysis, a modern systems approach.

Введение

Формирование перспективной структуры парка зерноуборочных комбайнов в Республике Беларусь осуществляется на фоне неблагоприятных тенденций, характеризуемых значительным (в 1,2…1,3 раза) превышением доли их списания над обновлением. Кроме того, около 50% применяемого парка уборочных машин выработало свой ресурс и требует значительных затрат на поддержание его в работоспособном состоянии. Вследствие этого увеличиваются затраты на производство зерна, а следовательно, снижается его конкурентоспособность. Поэтому увеличение производства зерна в значительной степени зависит также от применяемого парка машин для его уборки. При этом, продолжительность сроков проведения уборочных работ определяется не минимальным, а агротехнически обоснованным временным периодом с применением экономически целесообразного количества технических средств.

Основная часть

Потребность в самоходных зерноуборочных комбайнах для сельскохозяйственных предприятий Республики Беларусь определялась на основе результатов изучения ежегодных объемов убираемых площадей зерновых культур (озимых, яровых и рапса), валового производства зерна (таблица 1), агротехнических сроков его уборки, фактической урожайности зерна, ежегодного намолота зерна, технического состояния зерноуборочных комбайнов в период его уборки и других факторов[1].

Таблица 1. **Структура посевных площадей зерновых культур и прогноз валового сбора зерна в сельскохозяйственных организациях регионов Республики Беларусь в 2025 году**

Наименование области	Посевная площадь зерновых культур, тыс. га	Прогнозируемый валовый сбор зерна, тыс. тонн
Брестская	397,3	1993,5
Витебская	369,7	1100,0
Гомельская	372,4	1113,0
Гродненская	348,8	1998,4
Минская	518,2	2542,6
Могилёвская	384,8	1172,5
Итого по республике:	2391,2	9920,0

В настоящее время в сельскохозяйственных организациях республики насчитывается 7195 ед. зерноуборочных комбайнов.

Применяемый в хозяйстве парк машин (таблица 2) по пропускной способности объективно может быть разделён на три класса: до 10 кг/с, 10-12 кг/с и свыше 12 кг/с. Наибольший удельный вес в структуре парка комбайнов занимают комбайны класса 10-12 кг/с (78,4% или 5641 ед.), далее следует комбайны свыше 12 кг/с (14,8% или 1068 ед.) и комбайны класса до 10 кг/с (6,8% или 486 ед.).

Таблица 2. **Распределение парка зерноуборочных комбайнов по классам пропускной способности в сельскохозяйственных организациях регионов Республики Беларусь, ед.**

Наименование области	В числе по пропускной способности, кг/с			Всего зерноуборочных комбайнов
	до 10	10-12	свыше 12	
Брестская	126	1098	134	1358
Витебская	91	868	75	1035
Гомельская	129	840	19	988
Гродненская	71	724	390	1185
Минская	49	1188	362	1599
Могилёвская	20	922	88	1030
Итого по республике:	486	5641	1068	7195
в %	6,8	78,4	14,8	100,0

Для прогнозирования потребности в зерноуборочных комбайнах и определения рациональной его структуры выполнена группировка сельскохозяйственных организаций регионов республики по площадям

уборки зерновых культур и намолоту зерна за последние 10 лет (2014-2024 года) в зависимости от его урожайности. При этом, из всей совокупности сельскохозяйственных предприятий выделено три группы хозяйств в зависимости от фактической урожайности зерна:

- сельскохозяйственные предприятия с урожайностью до 4,0 т/га в которых экономически целесообразно применение зерноуборочных комбайнов с пропускной способностью до 10 кг/с;
- сельскохозяйственные предприятия с урожайностью 4,0-5,9 т/га в которых экономически целесообразно применение зерноуборочных комбайнов с пропускной способностью 10-12 кг/с;
- сельскохозяйственные предприятия с урожайностью 6,0 и более т/га, в которых экономически целесообразно применение зерноуборочных комбайнов с пропускной способностью свыше 12 кг/с.

Результаты группировки сельскохозяйственных организаций представлены, а таблице 3.

Таблица 3. **Группировка сельскохозяйственных организаций по площадям уборки зерновых и зернобобовых культур и валовому намолоту зерна в зависимости от его урожайности в регионах Республики Беларусь**

Наименование областей	Группировка сельскохозяйственных организаций по площадям уборки зерновых и зернобобовых культур и намолоту зерна в зависимости от его урожайности						Всего	
	урожайность до 4,0 т/га		урожайность 4,0-5,9 т/га		урожайность свыше 6,0 т/га			
	площадь уборки, га	намолот зерна, тонн	площадь уборки, га	намолот зерна, тонн	площадь уборки, га	намолот зерна, тонн	площадь уборки, га	намолот зерна, тонн
Брестская	188925	752382,36	224086	896838,13	-	-	413011	1649220,5
Витебская	303246	679570,9	-	-	-	-	303246	679570,9
Гомельская	373870	782530,9	-	-	-	-	373870	782530,9
Гродненская	156318	551816,99	127068	669418,5	82388	390672,8	365774	1611908,3
Минская	261725	841610,7	181234	835177,7	59757	346363,1	502716	2023151,5
Могилёвская	358080	882517,2	-	-	-	-	358080	882517,2
Итого по республике:	1642164	4490429,1	532388	2401434,4	142145	737035,9	2316697	7628899,4

Анализ результатов группировки сельскохозяйственных организаций свидетельствует о значительной вариации показателей сезонного намолота зерна в зависимости от его урожайности в различных регионах республики. Так, например, при урожайности зерна до 4,0 т/га в сельскохозяйственных организациях Брестской области сезонный намолот составляет 752382,36 тонн (17% общего намолота зерна), Витебской 679570,93 тонн (15%), Гомельской 782530,95 тонн (17%), Гродненской

551816,99 тонн (12%), Минской 841610,69 тонн (19%) и Могилёвской области 882517,20 тонн (20%). Результаты группировки хозяйств в значительной степени повлияют на формирование структуры парка зерноуборочных комбайнов на перспективу.

Прогнозируемая потребность в зерноуборочных комбайнах для каждого класса их пропускной способности выполнена с учётом планируемых площадей уборки и намолота зерна в пиковый период, требуемых агротехнических сроков (12 дней), продолжительности рабочей смены (10 часов), выработки комбайнов за смену и коэффициента технической их готовности – не более 0,85 (таблица 4).

Результаты прогнозирования потребности в зерноуборочных комбайнах представлены в таблице 4.

Таблица 4. **Прогнозируемый состав парка зерноуборочных комбайнов с различной пропускной способностью для сельскохозяйственных организаций Республики Беларусь на 2026-2030 годы**

Наименование области	Класс пропускной способности, кс/с	Диапазон урожайности, т/га	Прогнози-руемая площадь уборки зерна, га	Прогнози-руемые агросроки уборки зерна, дней	Выработка комбайнов за смену (10 час.), га	Расчетная потребность в комбайнах, ед.
Брестская	10-12 свыше 12	до 4,5 свыше 4,5	253420 159591	12 12	19,5 35,6	1084 374
Витебская	10-12 свыше 12	до 2,5 свыше 2,5	199966 103280	12 12	14,9 22,8	1122 378
Гомельская	10-12 свыше 12	до 2,1 свыше 2,1	217373 156497	12 12	15,4 33,6	1180 388
Гродненская	10-12 свыше 12	до 5,5 свыше 5,5	246411 119363	12 12	20,1 27,5	1024 362
Минская	10-12 свыше 12	до 4,6 свыше 4,6	377939 146291	12 12	19,5 26,3	1617 463
Могилёвская	10-12 свыше 12	до 2,5 свыше 2,5	195810 162270	12 12	18,7 40,4	873 335
Итого по республике:	10-12 свыше 12	-	2316700	-	-	6900 2300

Установлено, что для обеспечения уборки зерновых культур в агротехнические сроки на период до 2030 года ежегодная потребность в зерноуборочных комбайнах должна быть не менее 9200 ед., в том числе в Брестской области – 1458 ед., Витебской – 1500 ед., Гомельской – 1568 ед., Гродненской – 1386 ед., Минской – 2080 ед. и в Могилёвской области – 1208 ед. При этом, средняя нагрузка уборочной площади на комбайн в пиковый период уборки не превысит 250 га. Структура и состав прогнозируемого парка машин представлены в таблице 5.

Таблица 5. **Состав и структура прогнозируемого парка зерноуборочных комбайнов по пропускной их способности для сельскохозяйственных организаций Республики Беларусь**

Наименование области	Класс пропускной способности, кг/с	Применяемый парк комбайнов		Прогнозируемый парк комбайнов	
		наличие, ед.	в структуре парка, %	наличие, ед.	в структуре парка, %
Брестская	до 10; 10-12; свыше 12	126 1098 134	9,3 80,8 9,9	- 1084 374	- 74,3 25,7
Витебская	до 10; 10-12; свыше 12	91 868 75	8,8 83,9 7,3	- 1122 378	- 74,8 25,2
Гомельская	до 10; 10-12; свыше 12	129 840 19	13,1 85,0 1,9	- 1180 388	- 75,2 24,8
Гродненская	до 10; 10-12; свыше 12	71 724 390	6,0 61,1 32,9	- 1024 362	- 73,9 26,1
Минская	до 10; 10-12; свыше 12	49 1188 362	3,1 74,3 22,6	- 1617 463	- 77,7 22,3
Могилёвская	до 10; 10-12; свыше 12	20 922 88	1,9 89,5 8,6	- 873 335	- 72,3 27,7
Итого по республике:	до 10; 10-12; свыше 12	486 5641 1068	6,8 78,4 14,8	- 6900 2300	- 75 25

Заключение

В результате исследований установлено, что для обеспечения уборки зерновых культур в требуемые агротехнические сроки на период до 2030 года в сельскохозяйственных организациях потребуется использование не менее 9200 ед. зерноуборочных комбайнов. При этом, зерноуборочные комбайны с пропускной способностью 10-12 кг/с (КЗС-10К, КЗС-1218) должны составлять не менее 75% от общей структуры парка комбайнов (в 6900 ед.), свыше 12 кг/с (КЗС-1624, КЗС-2124, КЗС-3219) - 25% (2300 ед.). Это позволит сократить сроки проведения уборочных работ, повысить качество уборки и снизить нагрузку уборочных площадей на комбайн в наиболее напряженный период.

ЛИТЕРАТУРА

1. Володкевич В.И. Оценка эффективности применения перспективных моделей зерноуборочных комбайнов в различных условиях сельскохозяйственных организаций / Н.Г. Бакач, В.И. Володкевич, А.В. Шах // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе-сегодня и завтра: Сборник научных статей 8-ой международной научно-практической конференции: В 2ч. 4.2 – Гомель: Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2024.-с.185-188.

УДК 621.785.1

АНАЛИЗ НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК В ПОЛУМЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ПЕРЕД ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКОЙ

М.Ю. Целуев[1], С.Н. Целуева[2], А.Г. Немцев[3], П.С. Дробышевский[3], Т.М. Чудновская[3]
[1]Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Республика Беларусь
[2]Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь
[3]Открытое акционерное общество «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь

Введение. Благодаря высоким технико-экономическим показателям процесса горячая объемная штамповка стальных поковок нашла широкое применение в технологии производства деталей сельскохозяйственного машиностроения. Способ и режим нагрева исходных заготовок перед горячей штамповкой влияет на качество получаемых поковок, коэффициент использования металла, стойкость штампов, расход топлива, мощность кузнечно-прессового оборудования и производительность труда [1].

Вследствие универсальности и экономичности метода до настоящего времени широко распространенным в серийном кузнечно-штамповочном производстве остается газопламенный нагрев стальных заготовок в методических и полуметодических печах [2]. При разработке новых и совершенствовании существующих технологических процессов горячей штамповки стальных поковок важное место должно уделяться оптимизация технологических режимов нагрева исходных заготовок и работы нагревательного оборудования [3]. Экспериментальное определение экономичных режимов нагрева металла в печи связано со значительными затратами времени, материальных и финансовых ресурсов. В связи с этим актуальными являются теоретические исследования по обоснованию оптимальных режимов нагрева стальных заготовок перед горячей объемной штамповкой.

Целью работы является обоснование технологических режимов нагрева стали в полуметодической печи до температур горячей штамповки на основе теоретического исследования температурных полей в цилиндрических мерных заготовках.

Методика исследования. На основе закономерностей теории теплопереноса [4, 5] в работе сформулирована тепловая задача нагрева мерных цилиндрических заготовок в полуметодической нагревательной печи толкающего типа, учитывающая зависимость теплофизических

свойств материала заготовок от температуры, неоднородность распределения температуры печи в методической зоне, неравномерность теплового потока от источников теплового излучения на поверхности заготовки.

Теоретические исследования теплового режима нагрева цилиндрических мерных заготовок в полуметодической печи осуществляли путем многовариантных численных решений тепловой задачи методом конечных элементов. В процессе решения тепловой задачи использовали зависимости удельной теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности от температуры для легированной стали 18ХГТ [6]. Варьируемыми параметрами в процессе численных исследований теплового режима нагрева являлись: диаметр d заготовок в интервале 120…150 мм, шаг проталкивания заготовок в печь – (1…3)d, продолжительность цикла подачи заготовок в печь – 60…570 с.

Расчеты осуществляли для геометрических и температурных параметров, характерных для работы газовой полуметодической печи ТермоГаз-УО-6,5.48.2,5/1250-И2. Температура печи в начале зоны предварительного нагрева длиной 1200 мм составляла 800 °С, в зоне нагрева диной 4800 мм –1250 °С. Степень черноты металла принималась равной 0,8, горячих газов –0,3 [4].

Полученные результаты. В результате численных исследований температурного режима нагрева стальных мерных заготовок в полуметодической печи установлены зависимости температуры нагрева T для верхней и нижней материальных точек поверхности, а также центра заготовки от времени нагрева t, величины диаметра d, шага проталкивания l_m и продолжительности цикла подачи t_c заготовок.

На рисунке 1 представлены характерные графические зависимости температуры нагрева точек поверхности и центра заготовок в зависимости от времени нагрева. Для всех рассмотренных случаев изменения варьируемых параметров полученные зависимости свидетельствуют о прямой нелинейной зависимости температуры нагрева материальных точек заготовки от времени нагрева. Наибольшую температуру нагрева для всех рассмотренных случаев имеет верхняя материальная точка поверхности заготовки, что связано с особенностью распределения плотности теплового потока от источников теплового излучения по поверхности заготовки. Температуры центра и нижней точки поверхности ниже вследствие одностороннего нагрева заготовки и термического сопротивления слоев металла, разделяющих поверхность нагрева и рассматриваемые материальные точки заготовки.

На рисунке 2 приведены типовые графические зависимости развиваемых перепадов температур $2\Delta T/d$ между верхней точкой поверхности и центром заготовок, а также между центром заготовок и нижней точкой поверхности от времени нагрева. Для рассматриваемых

диаметров заготовок и ряда продолжительности циклов подачи полученные графические зависимости свидетельствуют о наличии трех характерных этапов нагрева заготовок.

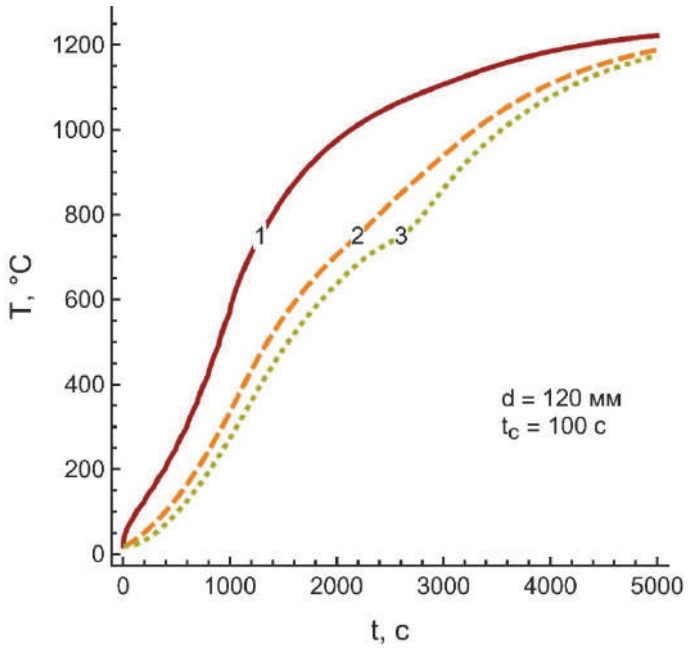


Рис. 1 – Зависимость температуры T заготовки диаметром d=120 мм от времени нагрева t для шага подачи l_m=120 мм и продолжительности цикла подачи t_c=100 с: 1 – верхняя точка поверхности; 2 – центр; 3 – нижняя точка поверхности

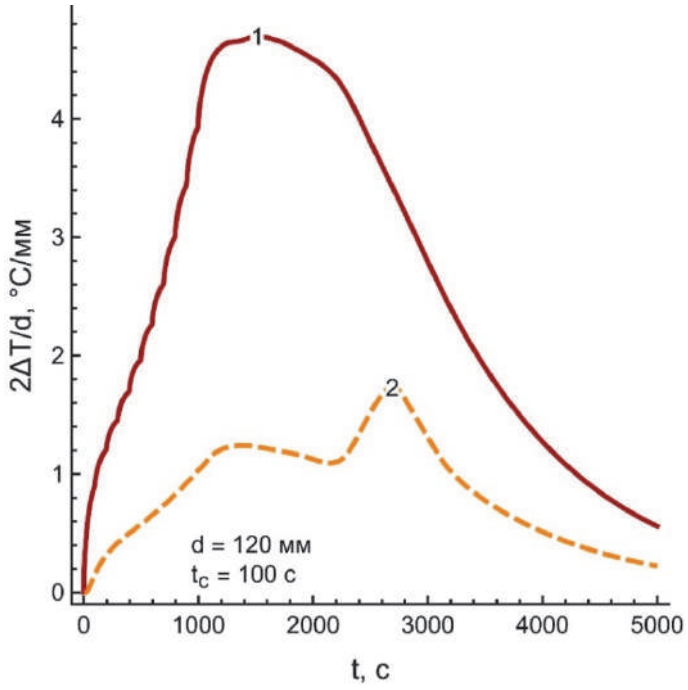


Рис. 2 – Зависимость перепада температуры $2\Delta T/d$ в заготовке диаметром d=120 мм от времени нагрева t для шага подачи l_m=120 мм и

продолжительности цикла подачи t_c=100 с: 1 – между верхней точкой поверхности и центром; 2 – между центром и нижней точкой поверхности

На первом этапе скорость нагрева верхней точки поверхности превышает скорость нагрева центра заготовки, что проявляется на представленных кривых в увеличении перепада температуры между этими точками заготовки. Далее, в связи с ростом температуры поверхности, снижается тепловой поток, поступающий в заготовку от источников теплового излучения, а скорость нагрева поверхности и центра заготовки выравниваются. На этом этапе нагрева на зависимостях перепада температуры от времени нагрева наблюдается участок близкий к горизонтальному. На третьем этапе скорость нагрева внутренних слоев заготовки превышает скорость нагрева поверхности – происходит выравнивание температуры по поперечному сечению заготовки.

Установленные зависимости показывают рост скорости нагрева заготовок при перемещении по зоне предварительного нагрева печи, что объясняется ростом температуры печи по мере удаления заготовки от загрузочного окна в пределах методической зоны предварительного нагрева. В зоне нагрева температура печи однородна, а скорость нагрева заготовок уменьшается по мере удаления от окна загрузки, что объясняется повышением температуры поверхности заготовки и соответствующим снижением теплового потока, поступающего в заготовку от источников теплового излучения.

Анализ полученных теоретических данных свидетельствует о прямой нелинейной зависимости конечной температуры нагрева заготовок от продолжительности цикла подачи заготовок и общей продолжительности нагрева, обратной нелинейной зависимости от величины диаметра заготовки. Для выбранных в ходе численного исследования условий проведения вычислительных экспериментов шаг подачи заготовки практически не оказывает влияние на конечную температуру нагрева заготовок.

Максимальная температура нагрева стали 18ХГТ перед обработкой давлением не должна превышать 1200…1220 °С, а конечный перепад температур между поверхностью и центром для стальных заготовок при нагреве под ковку и штамповку – порядка 3 °С/мм [4, 6]. Анализ полученных данных, позволил установить приведенные в таблице 1 рекомендуемые значения для продолжительности цикла проталкивания, шага подачи и общей продолжительности нагрева, обеспечивающие нагрев центра заготовок до рекомендуемой температуры.

По данным выполненного расчета максимальный перепад температур между верхней точкой поверхности и центром заготовок при нагреве по рекомендуемым режимам составляет 37,6 °С, между центром и нижней точкой поверхности – 15,5 °С, что является допустимым при нагреве металла перед горячей обработкой давлением.

Результаты численных вычислений показали, что с целью увеличения продолжительности цикла подачи заготовок по поду печи можно рассмотреть вариант одновременной подачи 2…3 заготовок при кратном их количеству увеличении шага и продолжительности цикла подачи.

Табл. 1 – Рекомендуемые режимы нагрева заготовок

Параметр	Диаметр заготовки, мм			
	120	130	140	150
Шаг подачи, мм	120	130	140	150
Продолжительность цикла толкания, с	100…110	120…130	150…160	170…180
Общее время нагрева, с	5000…5500	5520…5980	6300…6720	6800…7200

Заключение. Предложена тепловая задача нагрева заготовок в полуметодической печи толкающего типа, учитывающая зависимость теплофизических свойств материала заготовок от температуры, неоднородность распределения температуры печи в методической зоне, неравномерность теплового потока от источников теплового излучения на поверхности заготовки.

Путем многовариантных численных решений тепловой задачи теоретически исследован тепловой режим нагрева стальных мерных заготовок диаметром 120…150 мм до температур горячей штамповки. Установлены основные закономерности изменения температур и температурных градиентов в нагреваемых заготовках в зависимости от величины их диаметра, шага и продолжительности цикла проталкивания заготовок по поду печи. По результатам исследований предложены рекомендуемые значения технологических параметров нагрева, обеспечивающие нагрев заготовок до температуры 1200 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Altan, T. Cold and Hot Forging Fundamentals and Applications / T. Altan, G. Ngaile, G. Shen. – Cleveland in Novelty : Materials Park, Ohio 44073-0002, 2005. – 342 p.

2. Trinks, W. Industrial Furnaces / W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon and others. – 6th ed. – New Jersey : Willey, 2004. – 473 p.

3. Закарлюкин, С. И. Разработка и освоение участка нагрева заготовок из специальных сталей и сплавов / С. И. Закарлюкин, Г. И. Коваль // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 64–71.

4. Гусовский, В. Л. Методики расчета нагревательных и термических печей / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц. – М. : Теплотехник, 2004. – 400 с.

5. Стальной слиток : в 3 т. – Мн. : Белорусская наука, 2001. – Т. 3: Нагрев / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова [и др.] ; под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. – 2001. – 879 с.

6. Metal Forming Data : in 2 vol. / ed. H. Warlimont. – Berlin : Springer-Verlag, 2009. – Part 1 : Ferrous Alloys / M. Spittel, T. Spittel. – 2009. – 993 p.

УДК 62-2

АНАЛИЗ НОМЕНКЛАТУРЫ ШТАМПОВАННЫХ ПОКОВОК ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

М.Ю. Целуев[1], С.Н. Целуева[2], А.Г. Немцев[3], П.С. Дробышевский[3], Т.М. Чудновская[3]
[1]Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Республика Беларусь
[2]Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь
[3]Открытое акционерное общество «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь

Введение. При производстве узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники применяют широкую номенклатуру деталей общего назначения (валы, оси, зубчатые колеса, втулки и др.), трансмиссий (цепи, звездочки, шнеки, крестовины, пружины и др.), рабочих органов (зубья, штифты, диски, лемеха, отвалы, полевые доски и др.) и двигателей (поршни, цилиндры, шатуны, гильзы, коленчатые валы и др.) [1].

Основными заготовками для изготовления перечисленных деталей сельскохозяйственного машиностроения являются сортовой прокат, кованые и штампованные поковки, а также отливки. Выбор применяемой заготовки определяется конструкцией, материалом, формой и размерами детали, характером ее работы в процессе эксплуатации, а также типом производства [2].

Широкое применение для изготовления стальных деталей сельскохозяйственного машиностроения получили поковки, изготовляемые ковкой и штамповкой. Это связано с их высокими механическими характеристиками в сравнении с другими видами заготовок, полученными из того же материала. Кованые заготовки применяют в условиях единичного и мелкосерийного производства, а также при изготовлении ответственных крупногабаритных стальных деталей. В условиях серийного и массового производства мелкие и средние стальные заготовки получают методом штамповки. Преимуществами данного метода являются высокая производительность и существенное снижение величины припусков по сравнению с ковкой [3, 4].

Целью работы установление номенклатуры и технико-экономических показателей поковок для деталей сельскохозяйственной техники, изготавливаемых штамповкой на молоте с массой падающих частей 5 тонн в производственных условиях ОАО «Гомсельмаш».

Результаты исследования. Проведенный анализ изделий показал, что детали общего назначения и трансмиссий сельскохозяйственной

техники, изготовляемые из стальных штампованных поковок, можно разделить на три группы: 1) детали в виде тел вращения (класс 71 технологического классификатора деталей); 2) детали в виде тел вращения с элементами зубчатого зацепления (класс 72); 3) детали корпусные, рычажные, изогнутые, кулачковые и др. (классы 73, 74, 75).

Как видно из данных, приведенных в таблице 1, представителями группы деталей в виде тел вращения, получаемых из штампованных поковок, являются валы, фланцы, ступицы, цапфы, водила, опора, ось, колесо, диск и сфера.

Табл. 1 – Номенклатура деталей в виде тел вращения

Наименование	Марка стали	Масса, кг	Габариты, мм
Вал	18ХГТ	9,07	∅173×221
Фланец	18ХГТ	20,05	∅358×50
Фланец	18ХГТ	16,47	∅255×121
Ступица	18ХГТ	7,29	∅220×108
Фланец	18ХГТ	8,27	∅266,5×76
Фланец	18ХГТ	8,8	∅358,2×63,6
Фланец	18ХГТ 40Х 25ХГТ	4,1	∅280×28
Цапфа	18ХГТ	15,4 13,9 13,9 13,9	∅262×243
Опора	18ХГТ	5,96	∅310×74,4
Ось	40Х	13,4	∅232×303
Ступица	18ХГТ	14,2	∅280×110,5
Ступица	40Х 45Х 25ХГТ	11,6	∅313×138,8
Водило	25ХГТ	11,1	∅330,6×118,2
Ступица	40Х	8,09	∅200×187
Ступица	18ХГТ	9,89	∅280×110,5
Колесо	18ХГТ	13,6	∅318×60
Водило	18ХГТ	11,6	∅330,6×118,2
Фланец	18ХГТ	12,3	∅325×68
Диск	18ХГТ	10,25	∅309×90,5
Сфера	18ХГТ	14,2	∅297,4×121
Ступица	45	9,65	∅190×269
Вал	40Х	10,6	∅225×339,5

Масса деталей данного вида составляет от 4,1 до 20,05 кг, габаритный диаметр – 173…358,2 мм, длина – 28…339,5 мм. Материалами для изготовления деталей служат конструкционная углеродистая сталь 45 и легированные стали 40Х, 45Х, 18ХГТ и 25ХГТ. Для производства 30 типоразмеров деталей данной группы предусмотрено изготовление 22 типоразмеров поковок.

Согласно таблице 2, представителями группы деталей в виде тел вращения с элементами зубчатого зацепления являются разнообразного типа шестерни и вал-шестерня массой от 5,25 до 15,3 кг. Габаритный диаметр деталей составляет 232…387 мм, длина – 41,5…277 мм. Материалы для изготовления деталей – конструкционные легированные стали 18ХГТ и 25ХГТ. Всего для производства 19 типоразмеров деталей предусмотрено производство 12 типоразмеров поковок.

Табл. 2 – Номенклатура деталей – тел вращения с элементами зубчатого зацепления

Наименование	Марка стали	Масса, кг	Габариты, мм
Шестерня	18ХГТ	9,13	∅343,2×62
Шестерня	18ХГТ	15,3	∅365×74,5
Шестерня	18ХГТ	8,21	∅270,2×75
Шестерня	18ХГТ	6,24	∅303×66
Шестерня	18ХГТ	5,25	∅274×58
Шестерня	18ХГТ	11,8 11,5 8,36	∅277,3×69,4
Шестерня	18ХГТ	8,36	∅277,3×69,4
Шестерня	18ХГТ 25ХГТ	6,04	∅387×42
Вал-шестерня	18ХГТ	9,97	∅232×277
Шестерня	18ХГТ	11,8 11,5 8,36	∅277,3×69,4
Шестерня	18ХГТ	10	∅334,4×41,5
Шестерня	25ХГТ	8,51	∅281,5×64,5

В таблице 3 приведена номенклатура группы деталей корпусных, рычажных, изогнутых, кулачковых и др.: кронштейн, опора, полукольцо, кулак, корпус, рычаги, цапфа и скоба. Масса деталей данной группы составляет от 4,4 до 19,8 кг. Наименьший габаритный размер – 51,8 мм, наибольший – 436 мм. Материалами деталей являются конструкционные углеродистые стали 20 и 35, конструкционные легированные стали 40Х,

18ХГТ и 25ХГТ. Для изготовления 11 типоразмеров деталей на заготовительном производстве изготавливается 9 типоразмеров поковок.

Таким образом, из 43 типоразмеров стальных поковок, получаемых методом горячей штамповки на молоте с массой падающих частей 5 тонн, осуществляется изготовление 60 типоразмеров деталей общего назначения и трансмиссий сельскохозяйственной техники. При этом в 11 случаях применена унификация поковок для изготовления групп однотипных деталей в количестве от 2 до 4 штук.

Табл. 3 – Номенклатура деталей корпусных, рычажных, изогнутых, кулачковых и др.

Наименование	Марка стали	Масса, кг	Габариты, мм
Кронштейн	18ХГТ	19,8	120×191,9×288
Опора	20	13,7 14,8	240×138×129
Полукольцо	40Х 18ХГТ	5,6	436×218×51,8
Кулак поворотный	18ХГТ	17,3	270,4×145×220
Корпус	40Х 18ХГТ	7,6	71×225×305
Рычаг	18ХГТ	18,4	54×196×610
Рычаг	18ХГТ 35 25ХГТ	17,3	70×481,1×334
Цапфа оси	18ХГТ	12	∅102×185×301,4
Скоба	18ХГТ	4,4	72×165,2×314,1

Наиболее многочисленной из рассмотренных является группа деталей типа тел вращения в количестве 30 изделий, из которых группа деталей типа тел вращения с элементами зубчатого зацепления представлена 19 изделиями, количество изделий остальных типов составило 11 штук.

Материалами деталей являются деформируемые конструкционные углеродистые качественные стали 20, 35, 45, конструкционные легированные хромистые 40Х, 45Х и хромомарганцевые стали 18ХГТ и 25ХГТ.

Масса производимых изделий составляет от 4,1 до 20,05 кг, а программа выпуска соответствует типам производства от единичного до среднесерийного.

При разработке новых и совершенствовании существующих технологических процессов абсолютная величина показателей эффективности находится в прямой зависимости от серийности

производства изделий. Поэтому для дальнейшего изучения из рассмотренной номенклатуры был отобран ряд изделий с наибольшей программой выпуска.

Среди отобранных находятся 14 изделий типа тел вращения (в том числе с элементами зубчатых зацеплений) и 1 изделие кулачкового типа. Степень сложности изделий по ГОСТ 7505-89 – С2…С4. Коэффициент использования материала при производстве изделий составляет (за исключением 2 типоразмеров) от 0,17 до 0,46, что является невысоким показателем для среднесерийного типа производства.

Для повышения технико-экономических показателей при производстве стальных поковок деталей, в производственных условиях можно рекомендовать:

1) применение малоотходных технологий горячей объемной штамповки с целью повышения величины коэффициента использования материала;

2) применение предварительного формоизменения металла в заготовительных ручьях, что позволит повысить стойкость окончательного ручья и молотового штампа для горячей штамповки.

Заключение. Определено, что для изготовления 60 типоразмеров деталей общего назначения и трансмиссий сельскохозяйственной техники, изготовляемых из поковок, применяют деформируемые конструкционные углеродистые качественные стали марок 20, 35, 45, конструкционные легированные хромистые 40Х, 45Х и хромомарганцевые стали 18ХГТ и 25ХГТ.

На основе анализа производственной программы отобран ряд типоразмеров поковок. Для повышения технико-экономических показателей производства ряда стальных поковок в условиях ОАО «Гомсельмаш» предложено разработать опытные малоотходные технологий горячей объемной штамповки с применением предварительного формоизменения стали в заготовительных ручьях для повышения стойкости молотового штампа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Машиностроение : Энциклопедия в 40 т. / ред. совет : К. В. Фролов [и др.]. – М. : Машиностроение, 2002. – Т. IV-16 : Сельскохозяйственные машины и оборудование / И.П. Ксеневич, Г.П. Варламов, Н.Н. Колчин [и др.] ; под ред. И.П. Ксеневича. – 2002. – 720 с.

2. Машиностроение : Энциклопедия в 40 т. / ред. совет : К.В. Фролов [и др.]. – М. : Машиностроение, 2000. – Т. III-3 : Технология изготовления деталей машин / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров [и др.] ; под общ. ред. А.Г. Суслова. – 2000. – 840 с.

3. Зуев, А.А. Технология сельскохозяйственного машиностроения / А.А. Зуев. – М. : Колос, 1980. – 256 с.

4. Некрасов, С.С. Технология сельскохозяйственного машиностроения / С.С. Некрасов, И.Л. Приходько, Л.Г. Баграмов. – М. : Колос, 2004. – 360 с.

УДК 536.2; 539.3; 539.4; 678.073

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО УЧЕТА ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ДЕГРАДАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Е.В. Бессчетнов[1], С.В. Шилько[2]
[1]ООО «Изоком», Республика Беларусь,
[2]Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Республика Беларусь

Введение. Напорные трубопроводы из полимерных материалов (ПМ) [1] являются ключевым элементом систем водоснабжения и отопления, а также применяются при нефтедобыче, в мобильных машинах и технологических линиях предприятий. Безопасность и надежность напорных трубопроводов в значительной степени зависит от объективной оценки степени эксплуатационной деградации полимерных материалов, определяющей остаточный ресурс и долговечность труб по критерию прочности. Оценка такого рода востребована также при оптимизации рецептуры используемых полимерных материалов и технологических режимов их переработки в изделия.

В связи со сложностью моделирования физико-механических свойств полимерных материалов, в особенности, армированных и многослойных ПМ (рис. 1) в условиях эксплуатации трубопроводов, прогнозирование их остаточного ресурса и долговечности основано на математической интерпретации результатов термомеханических (более конкретно, термобарических) лабораторных испытаний.

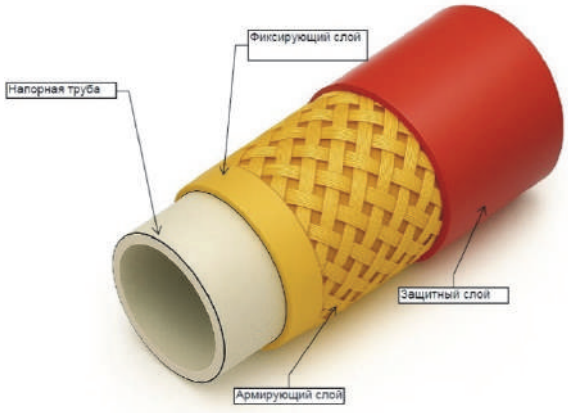


Рис. 1 – Конструкция армированной полимерной трубы

Однако для корректного прогнозирования остаточного ресурса и долговечности армированных полимерных труб необходимо решить ряд задач технического и организационного характера.

Цель исследования – разработка научно обоснованной методики оперативного и максимально точного определения долговечности армированных полимерных трубопроводов, комплексно учитывающую их композитную конструкцию, нестационарный характер эксплуатационной термомеханической нагрузки и механизм деградации полимерных компонентов.

Проблема и предлагаемое решение. Факторами (задаваемыми величинами) термомеханических лабораторных испытаний рассматриваемых изделий являются внутреннее давление p (МПа) и температура теплоносителя T (^{0}C), а прогнозируемым параметром (функцией отклика) – время t (часы) до разрушения образца трубы. Планирование испытаний и методика обработки экспериментальных данных нормируются стандартами ГОСТ ISO 9080–2023 [2], ГОСТ Р 54867–2011 [3] и ГОСТ Р 58097–2018 [4], которые базируются на теории математической статистики, в частности, корреляционном анализе.

К сожалению, выполнение требований названных стандартов приводит к ряду затруднений. В указанных нормативных документах не прописан порядок задания численных значений давления и температуры. Вместо этого указывается диапазон значений функции отклика (от 10 до 10000 часов для каждой температуры) и минимальное количество измерений (30) для всего диапазона. В стандартах также не указаны действия, обеспечивающие адекватность и достоверность экстраполяции в соответствии с критериями математической статистики.

Кроме того, международные стандарты – ГОСТ ISO 9080–2023 [2], регламентирующие определение минимальной длительной прочности (MRS), принимаемой как основной параметр жизненного цикла труб, и ГОСТ ISO 1167–1— 2013 [5], регламентирующий термобарические испытания, разработаны для однослойных труб, эксплуатируемых в стационарных условиях, и не учитывают 3 фактора, критических важных для практического применения армированных труб. К этим факторам относятся:

1. Циклические нагрузки, обусловленные гидроударами при пусках и остановах насосного оборудования, ведущие к усталостному разрушению, которое не описывается моделями длительной статической прочности;

2. Температурная деградация (старение) полимерной матрицы при повышенных температурах;

3. Сложная (композитная) структура трубы с различной скоростью эксплуатационной деградации каждого компонента (полимерной матрицы, армирующих волокон, дополнительных функциональных слоев).

Как следствие, конечные потребители зачастую вынуждены принимать решения о замене трубопроводов либо экстренно по причине аварии, что повышает эксплуатационные риски, либо по формальному истечению срока службы, что ведет к неоправданным ремонтным затратам.

Авторы считают возможной модификацию существующей процедуры лабораторных испытаний, результаты которых используются для прогнозирования долговременной прочности трубопроводов для горячего водоснабжения. Для этого предлагается использовать апробированные в машиностроении модели усталостного разрушения при циклической нагрузке, в частности, метод Баскина и поправку Гудмана, учитывающую влияние среднего напряжения в цикле (статической составляющей давления), что критически важно для реальных условий эксплуатации, где давление никогда не падает до нуля. Хотя построение усталостной (S-N) кривой требует испытаний большого количества образцов, можно применить метод Локати (ступенчатого нагружения), что позволяет получить информативные результаты даже на одном образце, последовательно повышая нагрузку на него.

Весьма длительные (месяцы) и энергозатратные термобарические испытания труб, для которых требуется специализированное стендовое оборудование в виде мощных насосных станций с термостатированием рабочих жидкостей (воды и др.), целесообразно заменить гораздо более простыми статическими испытаниями кольцевых образцов на серийных машинах, оснащенных термокамерами, с учетом того, что напряженное состояние кольцевых образцов (одноосное растяжение) близко соответствует нагружению цилиндрической трубы внутренним гидростатическим давлением. В ходе таких испытаний можно измерить кольцевую жесткость образцов, эксплуатационное снижение которой, очевидно, является индикатором термомеханической деградации ПМ.

Фактор термического старения можно учесть при помощи уравнения Аррениуса, позволяющего экстраполировать данные ускоренных испытаний при высоких температурах на реальные условия эксплуатации, и принципа температурно-временной суперпозиции, позволяющего «сжать» временную шкалу и построить обобщенные «главные кривые» деградации, объединяющие данные, полцученные для всех температурных режимов.

Предлагается дополнить традиционные макромеханические испытания образцов композитных труб диагностикой отдельных слоев, а также компонентов (матрицы и наполнителя) используемых материалов. Полученные данные можно использовать при верификации механико-математических моделей ПМ и выполнения прочностных расчетов труб на их основе аналогично расчету на прочность труб из однородных полимерных материалов.

Кроме того, авторами предлагается расширить использование методов неразрушающего контроля состояния материала труб в полевых

условиях на натурных изделиях без демонтажа или ограничиваясь демонтажом фрагмента трубопровода без вырезания из него специальных образцов. К таким методам следует отнести динамическую контактную диагностику [6], поскольку измеряемые этим методом упруго-диисипативные параметры являются индикаторами деградации физико-механических свойств ПМ.

Важнейшим этапом разрабатываемого подхода является создание калибровочных зависимостей для установления корреляции между долговечностью труб, определяемой в ходе традиционных термобарических испытаний, и обсуждаемыми альтернативными показателями остаточного ресурса, включая жесткость трубы в окружном направлении, трещиностойкость материала и его упруго-диссипативные параметры (модуль упругости, скорость релаксации, тангенс угла механических потерь, энергию диссипации и т.п.).

Предлагаемая экспресс-диагностика реализуется в виде четкого регламента, при выполнении которого создается «карта здоровья» трубопровода. На основании сравнения полученных данных с установленными критериями принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации трубопровода и/или точечном отборе (вырезке) образца трубы для углубленного лабораторного анализа. В ряде случаев возможен мониторинг состояния трубопровода, основанный на применении неразрушающих методов диагностики, например, упомянутого выше метода динамического контактного индентирования [6].

Научная значимость ожидаемых результатов состоит в создании интегрированных многоуровневых методов диагностики, цифровых двойников, паспортов и карт остаточного ресурса трубопроводов из современных композиционных материалов.

Прикладная (техническая и социальная) значимость:

- объективное основание для решения о продлении срока эксплуатации, ремонте или замене труб;
- прогнозирование отказов и снижение аварийности;
- оптимизация капитальных затрат;
- разработка стандартов и отраслевых руководств по безопасной эксплуатации.

Заключение. Предложенный комплексный подход представляет собой целостную систему, переводящую оценку ресурса полимерных трубопроводов из области нормативных допущений на уровень доказательного инженерного анализа. Он основан на использовании современных методов ускоренных механических испытаний и неразрушающего контроля полимерных материалов и изделий, а также хорошо апробированных в машиностроении физико-механических и

математических моделей Аррениуса, Баскина, Локати и TTSP. Выполнение соответствующих рекомендаций должно повысить достоверность прогнозирования долговечности полимерных трубопроводов, снизить затраты времени и материальных ресурсов на проведение испытаний.

Предлагаемый подход позволяет не только продлить безопасный срок эксплуатации действующих трубопроводов, но и закладывает основу для создания прогрессивной системы обслуживания сетей горячего водоснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 32415–2013. Трубы напорные из термопластов и соединительные детали к ним для систем водоснабжения и отопления. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. –79 с.

2. ГОСТ ISO 9080–2023. Трубопроводы и воздуховоды из пластмасс. Определение длительной гидростатической прочности термопластов на образцах в форме труб методом экстраполяции. – М.: ФГБУ «РСТ», 2024. – 30 с.

3. ГОСТ Р 54867–2011 ТРУБЫ ПОЛИМЕРНЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ Определение длительной прочности. – М.: Стандартинформ, 2014. – 8 с.

4. ГОСТ Р 58097–2018 Трубы гибкие полимерные армированные с тепловой изоляцией и соединительные детали к ним для наружных сетей тепло- и водоснабжения.

5. ГОСТ ISO 1167–1— 2013 Трубы, соединительные детали и узлы соединений из термопластов для транспортирования жидких и газообразных сред. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОЙКОСТИ К ВНУТРЕННЕМУ ДАВЛЕНИЮ Часть 1. Общий метод. – М.: Стандартинформ, 2014. – 8 с.

6. Рудницкий В.А., Крень А.П., Шилько С.В. Оценка свойств эластомерных материалов при постоянной скорости индентирования // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 5. – С. 502–508.

УДК 621.391.25

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ КОМБАЙНА

В.В. Напрасников, Жэнь И, Чжао Цяньчэн, Чжан Чжэньбан

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

Мосты ведущих колес современных зерноуборочных комбайнов практически идентичны по своей конструкции (рисунок 1). Несущей основой моста является трубчатая балка прямоугольного сечения, которая она выполняет функцию по обеспечению требуемой жесткости несущей системы. Целью работы является выбор рациональных параметров конструкции ведущего моста комбайна.

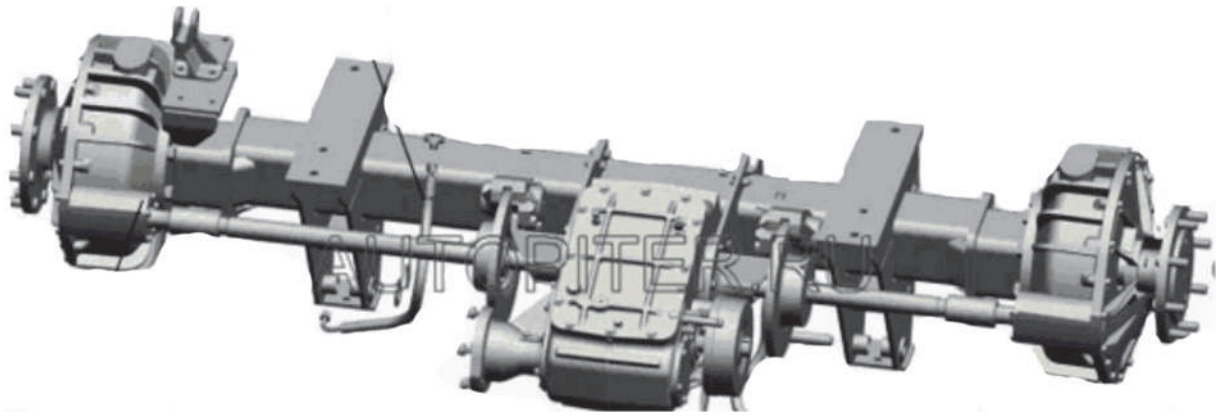


Рис. 1– Пример конструкции раскладных консолей опрыскивателя

В работе рассматриваются следующие задачи

- построение параметризированной конечно-элементной модели конструкции;
- анализ напряженно-деформированного состояния конструкции при рабочих нагрузках;
- выбор рациональных параметров конструкции на основе решения оптимизационной задачи.
- модальный анализ конструкции с оптимальными параметрами.

Для подготовки параметрической модели этой конструкции использовался геометрический моделировщик (DesignModeler).

На эскизе укажем изменяемые параметры с помощью чекбокса возле размера (рисунок 2 вверху). Результат построения показан на рисунке 2 внизу.

D H40	15 mm	XYPlane.H74 = @H
D H41	15 mm	XYPlane.L11 = @H
D H74	15 mm	XYPlane.H41 = @H
D L11	15 mm	XYPlane.H40 = @H

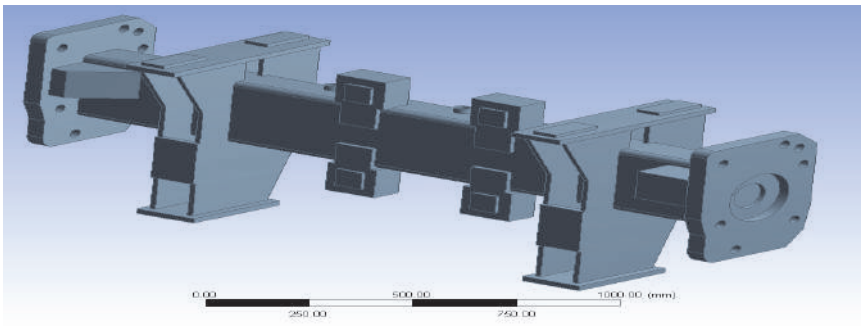


Рис. 2 – Геометрическая модель

На рисунке 3 представлены результирующая модель с наложенными граничными условиями и конечно-элементное разбиение.

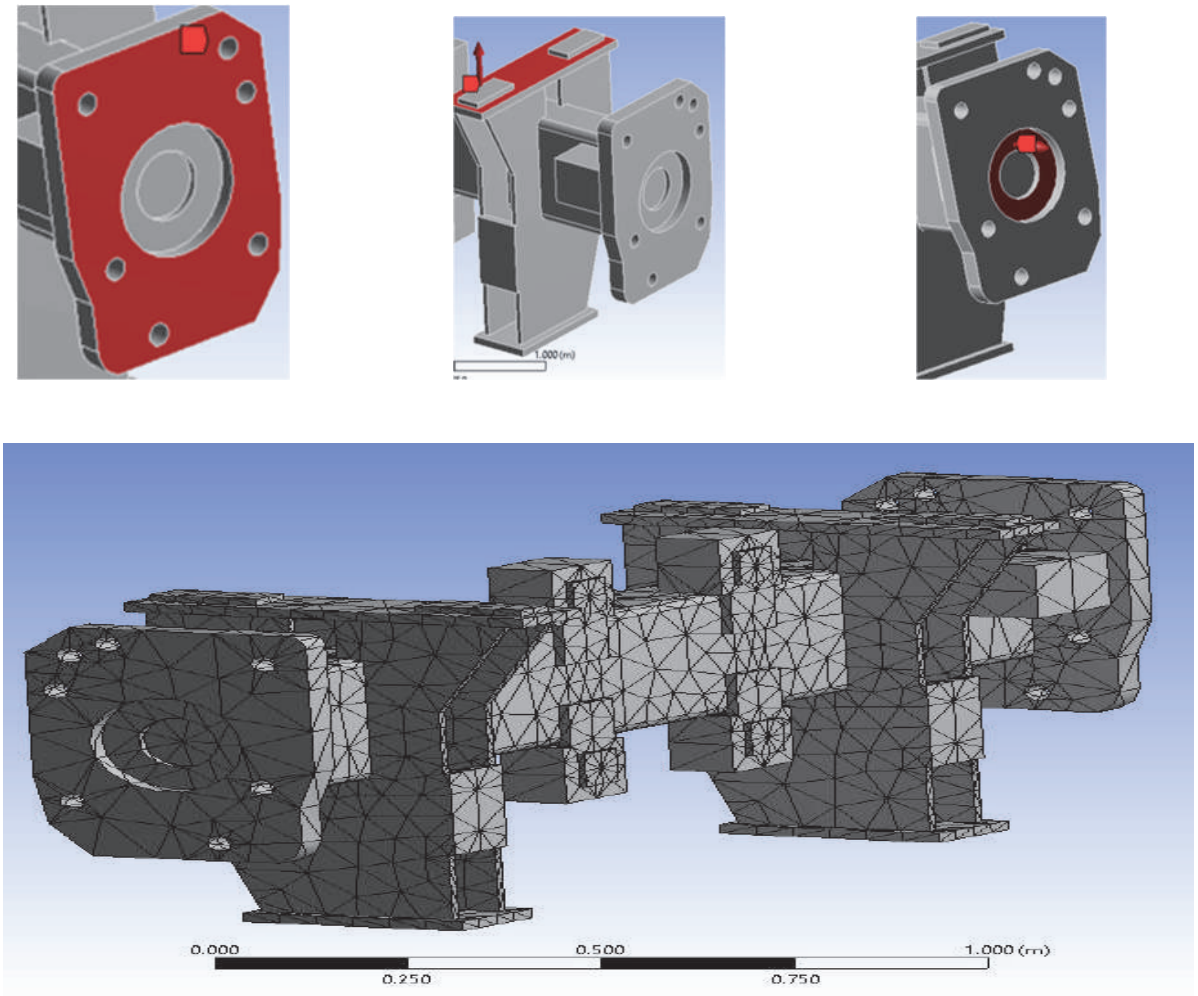


Рис. 3 – Конечно-элементная модель. Сетка и граничные условия

Результаты расчета напряжений в конструкции по критерию Мизеса представлены на рисунке 4. Поскольку максимальные напряжения не превосходят 47 МПа, то возможно сформулировать задачу оптимизации с целью снизить материалоемкость конструкции при выполнении допускаемых ограничений по прочности.

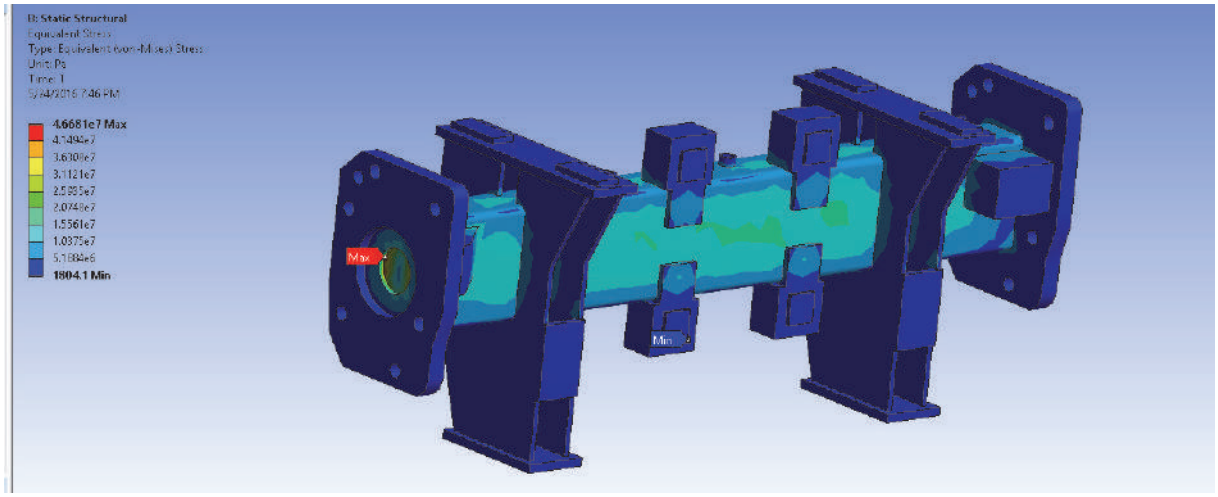


Рис. 4 – Результат вычислений напряжений

Схема проекта в среде ANSYS WB представлена на рисунке 5.

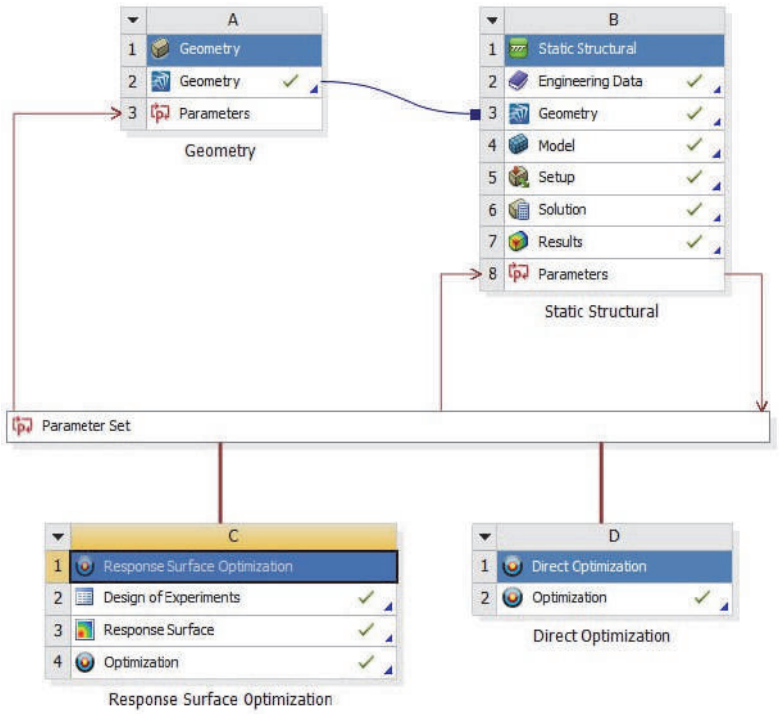


Рис. 5 Схема проекта в среде ANSYS WB

Целью оптимизации является уменьшение массы данной конструкции с учетом приложенных нагрузок.

В качестве оптимизируемых параметров возьмем:

- половину толщины балки моста (P3 – L6) – 67.5 … 82.5 мм
- толщину пластин кронштейна (P8 – H) - 15…16.5 мм

Критерии оптимальности:

- масса (Solid Mass) –минимизируется.

Функциональные ограничения:

- максимальное напряжение – не должно превышать 100Мпа.

Оптимизация выполнялась способом Goal Driven Optimization [1]. Результат оптимизации приводятся в виде трех решений, которые являются наиболее предпочтительными с точки зрения заданных целей на рисунке 6.

	A	B	C	D	E
1		P3 - L6	P8 - H	P9 - Equivalent Stress Maximum (Pa)	P10 - Solid Mass (kg)
2	Optimization Domain				
3	Lower Bound	67.5	13.5		
4	Upper Bound	82.5	16.5		
5	Optimization Objectives				
6	Objective	No Objective	No Objective	Values <= Target	Minimize
7	Target Value			1E+08	
8	Importance			Default	Default
9	Constraint Handling			As Hard Constraint	
10	Candidate Points				
11	Candidate A	67.508	13.502	5.6868E+07	1051.5
12	Candidate B	67.643	15.189	5.6592E+07	1065.8
13	Candidate C	70.868	13.584	5.1421E+07	1082

Рис. 6 – Динамика оптимизационных вычислений

Для проекта с оптимальными параметрами в дальнейшем выполнен модальный анализ. Получены следующие частоты собственных колебаний: для 1-ой формы - 8,7739 Гц ; для 2-ой формы – 10,25Гц; для 3-ей формы – 18,568Гц; для 4-ой формы – 18,725 Гц; для 5-ой формы –26,838 Гц; для 6-ой формы – 27,806 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красновская, С.В. Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов / С.В. Красновская, В.В. Напрасников //Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн.навук. – 2016. – № 2. – С.92–99.

УДК 631.35.008.94

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К МИГРАЦИИ ДАННЫХ ИЗ CREO PARAMETRIC В КОМПАС-3D

Н.А. Лазовой, И.А. Кольцова, А.А. Бобровничий
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В статье рассматривается актуальная проблема миграции данных из системы Creo/Windchill (PTC) в КОМПАС/Лоцман (АСКОН) важная для ОАО «Гомсельмаш». Основное внимание уделяется переносу электронных 3D-моделей деталей, сборочных единиц (ДСЕ), ассоциативных чертежей, спецификаций и структуры сборок, включая геометрию, дерево построения и атрибутивную информацию.

В связи с этим в статье представлены результаты самостоятельного исследования авторов, направленные на анализ и оценку существующих подходов к решению проблемы миграции, исследованы методы обеспечения миграции:

Анализ стандартных методов (технологий):

– использование нейтральных форматов (STEP, JT);

– применение сторонних конвертеров;

– прямая конвертация данных.

12 июня 2024 года Министерство финансов и Государственный департамент США опубликовали определение, расширяющее санкционный режим в отношении России и Беларуссии, а в сентябре 2024 года для американских компаний установлен запрет на:

1) Оказание консультационных услуг в области информационных технологий российским лицам;
2) Предоставление услуг по проектированию ИТ-систем;
3) Оказание ИТ-поддержки и облачных сервисов в отношении определенных категорий программного обеспечения (далее ПО).

Основные категории ПО, попадающие под санкции:

1) Системы автоматизирования проектирования (CAD, далее САПР);
2) Системы автоматизирования производства (CAM);
3) Системы управления жизненным циклом изделия (PLM);
4) Системы управления данными об изделии (PDM);
5) Системы планирования ресурсов предприятия (ERP) и др.;

В НТЦК проектирование ведется в САПР CREO Parametric (далее CREO), а для хранения данных и управлением жизненным циклом изделий

(PLM/PDM) используется система PDM Windchill (далее Windchill). Обе системы (CREO и Windchill) разработаны американской компанией «PTC».

Сегодня системы CREO/Windchill находятся под санкциями. На протяжении 20 лет с их помощью в НТЦК создаются и модифицируются современные цифровые 3D-модели зерноуборочных, кормоуборочных комбайнов и другой техники [1]. Импортозамещение в сфере ИТ-технологий является приоритетной задачей.

Объект исследования. Вопросы миграции данных; существующие решения и методы (технологии) при миграции; использование нейтральных (промежуточных) форматов обмена при миграции; Поисковые решения по вопросу миграции данных.

Информационная среда: Исходная, используемая в НТЦК ОАО «Гомсельмаш» САПР CREO Parametric и PDM-система Windchill американской фирмы «Parametric Technology Corporation».

Импортозамещающее решение САПР КОМПАС-3D и PDM-система ЛОЦМАН российской компании «АСКОН».

Цель исследования.

Целью данной статьи (исследования) является исследование, изучение вопросов и генерацию подходов по миграции данных, накопленных в течение 20 лет в процессе производственной деятельности конструкторской службы ОАО «Гомсельмаш» из САПР CREO/Windchill в КОМПАС-3D.

Методология исследования

1. Основные проблемы миграции

Миграция данных – это комплексный процесс переноса информации (данных) из одной системы хранения или формата в другую, которая включает в себя:

1) Извлечение данных из источника (старая система, файл. В НТЦК из Creo).

2) Трансформация (приведение к структуре, формату, стандартам новой системы).

3) Загрузка в систему АСКОН (Компас, Лоцман, Полином).

Основными проблемами, возникающими при миграции данных из одной САПР в другую являются:

1) Несовместимость форматов и структур данных:

1.1. Проприетарные форматы файлов (3D-модели, ДСЕ (детали и сборочные единицы), выполненные в CREO, имеют проприетарный формат и расширения «prt» и «asm» для CREO, а для КОМПАС-3D модели имеют свой формат и расширения – «m3d» и «a3d»);

1.2. Потеря информации при конвертации (ассоциативность размеров, параметры, связи, аннотации, назначения материалов);

1.3. Потеря «дерева построения/дерева 3D-модели» с «фичерами» (функциями построения).

2) Проблемы с библиотеками стандартных элементов и компонентов:

2.1. Несовместимость форматов стандартных комплектующих, крепежа, подшипников, профилей, электронных компонентов и т.д.;

2.2. Потеря ссылок и ассоциативности между компонентами сборки;

2.3. Потеря ассоциативности между моделью и чертежом.

3) Технические сложности и объем данных:

3.1. Огромный объем данных, миграция которых требует значительных вычислительных ресурсов и времени;

3.2. Проблемы производительности, особенно для сложных сборок (40 – 70 тысяч и более деталей, сборочных единиц).

4) Проблемы целостности данных:

4.1. Потеря ссылок (привязок) в сборках и подсборках;

4.2. Передача структуры изделия (сборок, узлов, машин).

5) Человеческий фактор и адаптация:

5.1. Сопротивление изменениям при переходе на новую САПР;

5.2. Требуется время и ресурсы обучения работе в КОМПАС-3D;

5.3. Снижение производительности работы на период адаптации и переобучения [2].

Вывод: Как видно из перечисленных пунктов основными проблемами при миграции данных являются несовместимость форматов (так как разные фирмы-разработчики) и ассоциативности, большой объем данных и проверка целостности (правильности геометрии и атрибутов) полученного файла.

2. Существующие решения проблем миграции

Сегодня существует множество способов решения вопроса миграции данных в САПР, однако каждое из этих решений имеет свои плюсы и минусы. Основные исследуемые методы (технологии):

-использование нейтральных (промежуточных) форматов обмена;

-использование прямой конвертации;

-использование внутренних интерфейсов программирования приложения (API) и скриптовых решений.

Для получения адекватного решения миграции должно содержать полное решение выше названных проблем выше названных проблем.

2.1 Использование нейтральных (промежуточных) форматов обмена STEP,JT

На сегодняшний день существует огромное количество промежуточных форматов обмена. Рассмотрим некоторые из них.

Формат STEP (англ. Standard for Exchange of Product model data – Стандарт обмена данными о модели продукта) представляет собой нейтральный текстовый формат обмена данными между трёхмерными моделями изделий различных CAD-систем. Этот стандарт разработан Международной организацией по стандартизации (ISO) и обеспечивает перенос геометрии, топологии, параметрических данных и метаданных изделия через расширения .step и .stp [3].

К преимуществам формата STEP можно отнести:

- Надежность, широкое признание, сохранение геометрии, структуру сборки, имена компонентов и материалы.

Однако, есть и недостатки:

- Данный формат теряет параметрическую историю построения (нет «дерева построения»), связи между компонентами в сборках, теряются ассоциативные размеры и допуски, взаимосвязи между компонентами сборок, аннотации и пользовательские атрибуты.

2.1.1 Пример. Миграция данных из разных САПР с использованием формата 3D-моделей STEP из CREO в Компас АСКОН.

На момент написания данной работы процесс миграции из Creo в КОМПАС-3D с использованием STEP(STP)-формата включает следующие действия, применялись при проектировании машины МПД-500:

1) За экспериментальную модель была взята установка редуктора машины передвижной дождевальной МПД-500, представленная на Рис. 1- Редуктор машины передвижной дождевальной МПД-500.

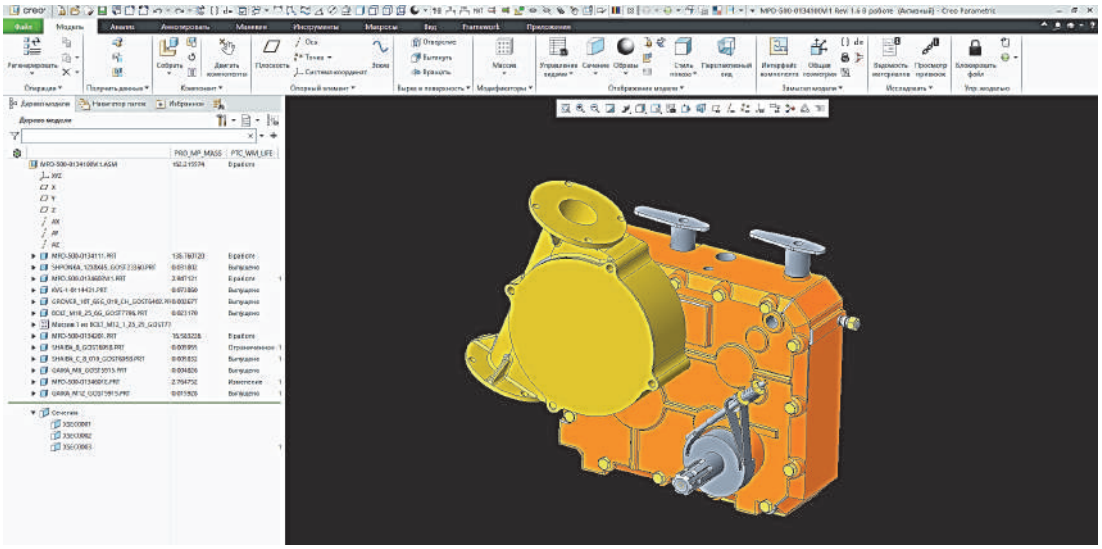


Рис. 1 – Редуктор машины передвижной дождевальной МПД-500
Обозначение МПД-500-0134100ВИ1

Была произведена ее загрузка из системы хранения Windhill с помощью Creo.

Выполнялась миграция данных 3D-модели МПД-500-0134000. Используя встроенное программное обеспечение в Creo, была произведена процедура сохранения модели в формат .stp (Смотрите Рисунок 2-**Миграция данных. Использование форматов STEP. Сохранение модели в STEP-формат**). Сохранение модели из CREO в формате STP для дальнейшего открытия в АСКОН. Полученное «дерево модели в CREO»

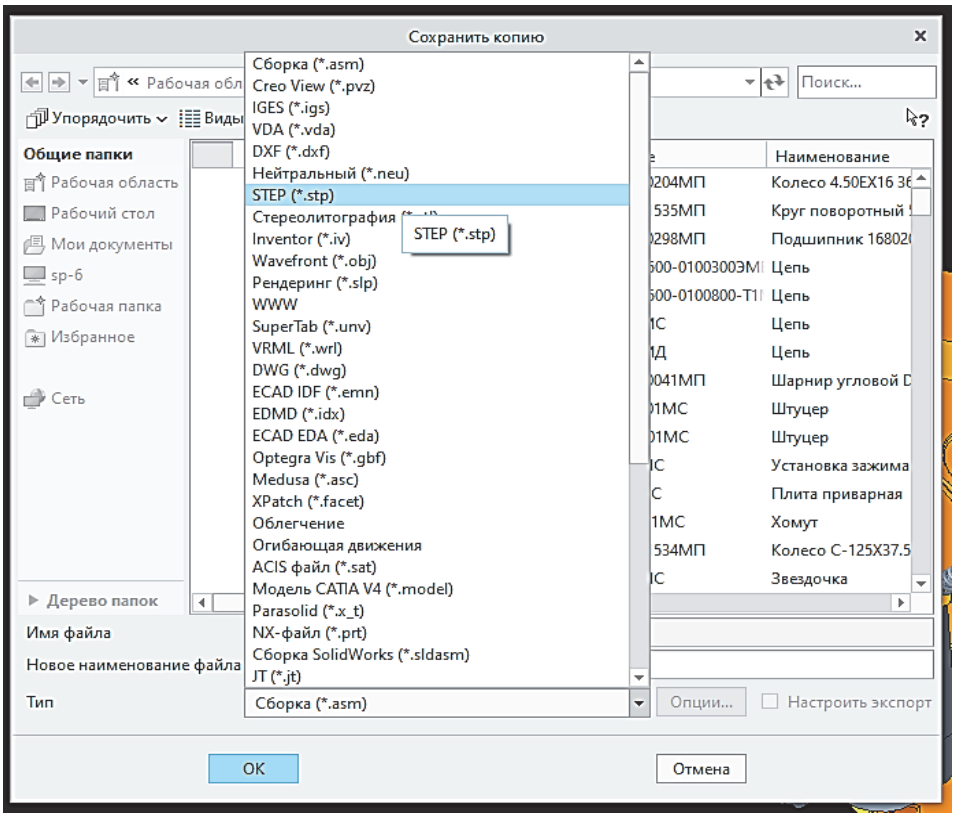


Рис. 2 – Миграция данных. Использование форматов STEP. Сохранение модели в STEP-формат.

2) В результате сохранения получили следующие 2 типа файлов: один файл – это 3D модель с расширением .stp, а второй имеет тип Creo Versioned File (Рисунок 3 – **Результаты сохранения модели в STEP-формат**).

Рис. 3 – Результаты сохранения модели в STEP-формат

3) Открыв файл с расширением .stp, используя КОМПАС-3D, программа распознает и загружает модель (Рисунок 4-Полученная модель в Компас -3D).

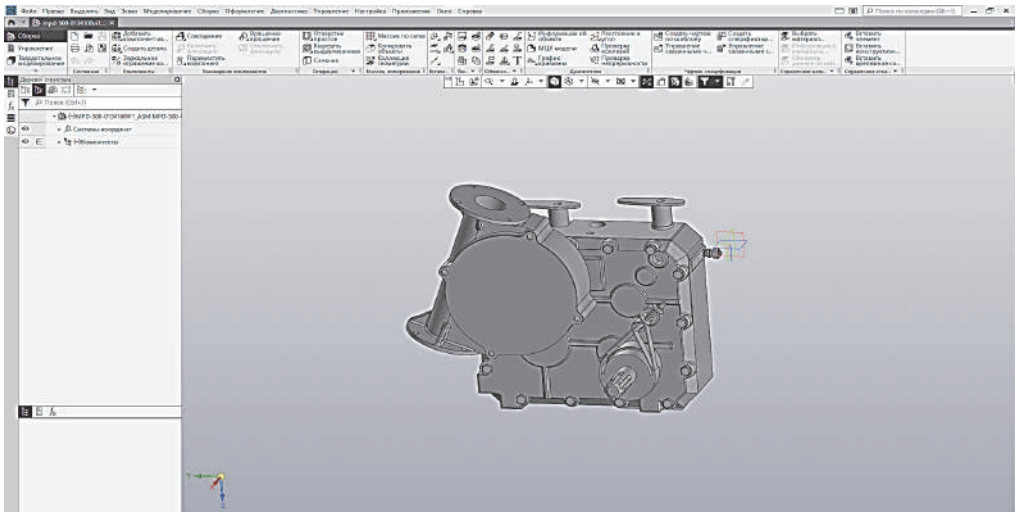


Рис. 4 – Полученная модель в КОМПАС-3D

4) Полученный файл сохраняем на ассоциированный диск «W» для дальнейшей выгрузки его в систему хранения файлов ЛОЦМАН.

Пример, Рисунок 5 - Дерево модели/построения в Creo. Рисунок 6 - Компас-3D. Дерево построения.

Вывод: Передается геометрия. Отсутствует «Дерево модели. Дерево построения».

MPD-500-0134100VI1.ASM	МПД-500-0134100ВИ1МС	Сборочные единицы
XYZ		
X		
Y		
Z		
AX		
AY		
AZ		
MPD-500-0134111.PRT	МПД-500-0134111МД	Детали
SHPONKA_12X8X45_GOST23360.PRT	2267МП	Стандартные изделия
MPD-500-0134603VI1.PRT	МПД-500-0134603ВИ1МД	Детали
KVS-1-0114431.PRT	КВС-1-0114431МД	Детали
GROVER_10T_65G_019_CH_GOST6402.PRT	17297МП	Стандартные изделия
BOLT_M10_25_6G_GOST7796.PRT	2827МП	Стандартные изделия
Массив 1 из BOLT_M12_1_25_25_GOST7796.PRT		
MPD-500-0134201.PRT	МПД-500-0134201МД	Детали
SHAIBA_8_GOST6958.PRT	2855МП	Стандартные изделия
SHAIBA_C_8_019_GOST6958.PRT	24932МП	Стандартные изделия
GAIKA_M8_GOST5915.PRT	2456МП	Стандартные изделия
MPD-500-0134601E.PRT	МПД-500-0134601ЭМД	Детали
GAIKA_M12_GOST5915.PRT	2446МП	Стандартные изделия

Рис. 5 – Дерево модели/построения в Creo

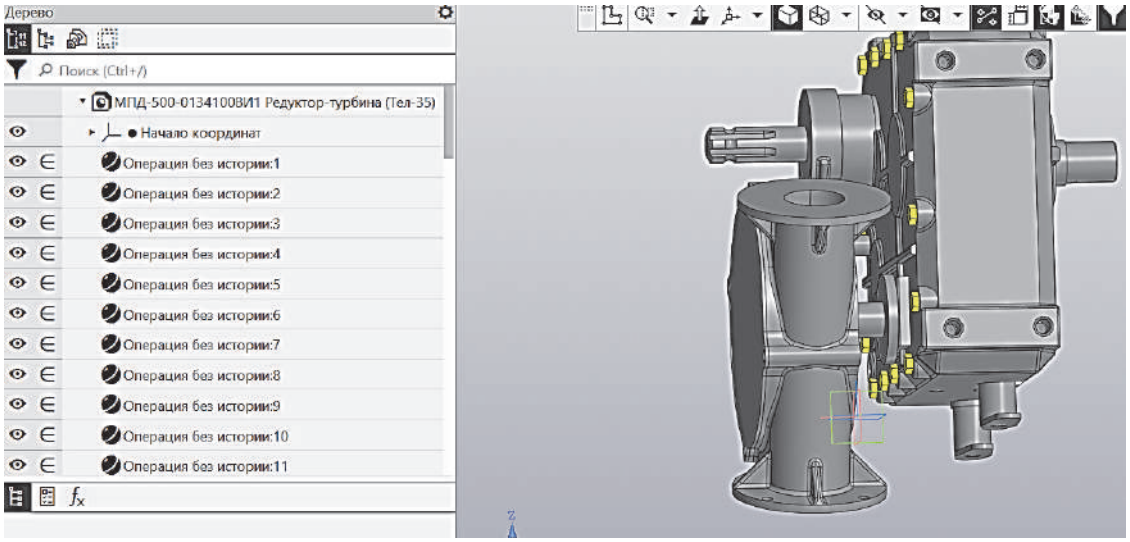


Рис. 6 – Компас-3D. Дерево построения.

Более легковесным, по сравнению со STEP-форматом является JT. JT (англ. Jupiter Tessellation – тесселяция Юпитера) – открытый ISO-стандарт для обмена и визуализации 3D-моделей, который использует упрощённое представление геометрии, что позволяет быстро загружать и отображать даже очень сложные сборки с сохранением геометрии [4].

Преимуществами данного формата являются:

- Малый размер файлов, хорошее сохранение визуализации.

К недостаткам можно отнести:

- При конвертации теряет еще больше информации, чем STEP и не подходит для дальнейшего параметрического редактирования.

Помимо этого, существуют и сторонние конверторы, позволяющие производить миграцию подобным образом. К таким инструментам можно отнести:

- CAD Exchanger, который позволяет конвертировать PRT в STEP и JT с последующим импортом в КОМАПС-3D;
- TransMagic – мощный конвертер, поддерживающий глубокий анализ моделей при преобразовании из PRT;
- Datakit CrossManager – профессиональное решение для обмена данными между САПР-системами, включая поддержку PRT и экспорт в форматы, читаемые КОМПАС-3D.

Обобщение: однако, у всех сторонних конверторов также есть потеря информации о «дереве построения/дереве модели».

Проанализировав использование промежуточных форматов для миграции данных в САПР-системах (CREO и КОМПАС-3D) можно сказать, что данный вариант подходит только в тех случаях, когда достаточно передать только геометрию модели.

2.2 Использование прямой конвертации

Существует также возможность миграции данных с использованием прямой конвертации в необходимый нам формат.

На данный момент компания «АСКОН» активно развивает инструменты импорта для облегчения миграции с зарубежных САПР. К таким инструментам можно отнести CREO Importer, который был включен в САПР КОМПАС-3D начиная с версии V21. Данное решение позволяет открыть файлы .prt (детали) и .asm (сборки) CREO Parametric напрямую.

Преимущества данного инструмента:

- Максимальное сохранение геометрии, структуры, сборки, имен. В некоторых случаях может сохранять параметрическую историю (если она распознана) или отдельные элементы как конструктивные элементы КОМПАС.

Недостатки:

- Результат сильно зависит от сложности исходной модели и версии CREO, не вся история и параметры гарантированно переносится, возможны проблемы с нестандартными элементами.

Вывод: Несмотря на преимущества данного метода, главным его недостатком является отсутствие информации после миграции о «дереве построения/дереве модели».

Выводы

Внедрение автоматизированных инструментов миграции проектных данных критически важно для проектирования. Оно обеспечивает прямую экономию времени на стадиях проектирования, кардинально снижает количество ошибок, возникающих при ручном переносе, полностью исключает затратные процессы повторного перечерчивания моделей и чертежей и автоматизирует сложную процедуру проверки данных. Это приводит к существенному повышению скорости, точности и надежности всего проектного цикла**.**

Проведенное исследование проблем миграции данных между системами автоматизированного проектирования CREO Parametric и КОМПАС-3D позволило выявить ключевые аспекты, требующие особого внимания при организации процессов передачи проектной информации.

Во-первых, установлено, что основными проблемами при миграции являются потеря параметрической информации, нарушение ассоциативных связей между компонентами изделий и утрата технологической истории создания моделей. Эти ограничения обусловлены фундаментальными различиями в архитектуре и принципах работы рассмотренных САПР-систем.

Во-вторых, анализ существующих методик миграции показал, что современные подходы не позволяют в полном объеме производить миграцию, теряя при этом большую часть информации. Особенно остро стоит проблема миграции чертежной документации с сохранением ассоциативности моделей и чертежей.

Сегодня трудно получить в Компасе полный цифровой аналог модели из Creo (геометрия+атрибуты+дерево построения).

В рамках пилотного проекта в НТЦК с использованием технологий АСКОН (САПР Компас и PLM Лоцман, МДМ Полином) спроектированы передвижная дождевальная машина МДП-500 (верхний уровень МПД-500-0100 000) и ее модификация МПД-500-1 (МПД-500-1-0100 000).

При этом использовались данные полученные технологией миграции данных. По машине МПД-500 экспортированы/импортированы цифровые данные по разделам спецификации «Материалы», «Покупные изделия», «Стандартные изделия» были мигрированы (экспортированы) из CREO и переданы в технологии АСКОН (МДМ Полином, САПР Компас).

Так же использовались при проектирование ДСЕ с форматом STEP из САПР CREO. Также выполнена разработка программ API [5], [6], [7] для возможности прочитать «дерево моделей» из КРЕО в Компас-3Д.

Особенно интересен практический опыт:

- успешно мигрировал данные для проектирования машины МПД-500 (по разделам спецификации "Материалы", "Покупные изделия" и т.д.);
- использовали STEP для геометрии;
- разработали собственные API для чтения «дерева моделей».

ЛИТЕРАТУРА

1. Кольцова, И. А. Синергия миграции и обмена данных при использовании импортозамещающих технологий / И. А. Кольцова, Ж. В. Кадолич // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 томах / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет ; редкол.: Д. В. Капский, А. С. Поварехо (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – Т. 1. – 324 с.

2. Обмен данными между САПР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://helpiks.org/9-69883.html?ysclid=mdmqcctk9u956345166. – Дата доступа: 28.07.2025

3. McClements, D. STEP File: How to View and Make a STEP File / D. McCleaments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dz6wltn9e7i51.cloudfront.net/resources/3d-printing/what-is-a-step-file/. – Дата доступа: 25.07.2025

4. JT – формат файла тесселяции Юпитера [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.fileformat.com/ru/3d/jt/. – Дата доступа: 25.07.2025

5. Начало работы с J-Link API для Creo Parametric [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/sandbox/113526/. – Дата доступа: 28.07.2025

УДК 631.35.008.94

ПРОГРАММНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МИГРАЦИИ ДАННЫХ ИЗ CREO PARAMETRIC В КОМПАС-3D

Н.А. Лазовой, И.А. Кольцова
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В статье рассматривается актуальная проблема миграции данных из системы Creo/Windchill (PTC) в КОМПАС/Лоцман (АСКОН) важная для ОАО «Гомсельмаш». Основное внимание уделяется переносу электронных 3D-моделей деталей, сборочных единиц (ДСЕ), ассоциативных чертежей, спецификаций и структуры сборок, включая геометрию, дерево построения и атрибутивную информацию.

В статье представлены результаты исследования авторов, направленные на анализ и оценку существующих подходов к решению проблемы миграции, исследованы методов и технологий обеспечения миграции:

а) Анализ стандартных методов (описаны в статье в данном сборнике авторы Н.А. Лазовой, И.А. Кольцова, А.А.Бобровничий «**Теоретические аспекты и практические подходы к миграции данных из Creo Parametric в Компас-3D**»:

– использование нейтральных форматов (STEP, JT);

– применение сторонних конвертеров;

– прямая конвертация данных.

б) Разработка и оценка программно-ориентированных методов:

– разработка программных модулей (с использованием API);

– модуль извлечения данных из Creo/Windchill (структура изделия, геометрия, дерево построения, параметры). Модуль загрузки и реконструкции данных в КОМПАС/Лоцман с сохранением целостности и связей.

в) Анализ предложения по миграции «АСКОН-ПроТех»:

– детальное тестирование существующего решения от АСКОН; Выявление и классификация типовых потерь данных (геометрия, параметры, ассоциативность, история построения), возникающих при его использовании.

Сегодня фирма АСКОН не предоставляет полный алгоритм по миграции данных.

1.Использование внутренних интерфейсов программирования приложения (API) и скриптовых решений

API (англ. Application Programming Interface – интерфейс прикладного программирования) предоставляет программный доступ (разработанный программный код) к внутренним функциям САПР-систем, позволяя:

1) извлекать параметры, метаданные и геометрию напрямую из исходных файлов;
2) автоматизировать процессы экспорта/импорта;
3) частично восстанавливать логику модели.

Как в CREO, так и в КОМПАС-3D существуют свои API для работы с САПР. Для CREO к таким инструментам можно отнести:

1) J-Link; 2) Pro/TOOLKIT.

J-Link – это программный интерфейс приложения, который предоставляет возможность разработчикам создавать внешние приложения на языке программирования Java, которые в последующем могут взаимодействовать с ядром CREO, управлять моделью, создавать, редактировать и извлекать данные из чертежей, деталей, сборок и других объектов.

J-Link работает по принципу внешнего приложения, которое подключается к запущенному процессу CREO через локальное соединение, после чего можно производить необходимые операции для получения или модернизации данных [5].

Преимуществом J-Link является работа с высокоуровневым языком программирования Java. Тем не менее, данное решение имеет ограничение доступа к геометрии объектов.

Pro/TOOLKIT – это низкоуровневый API, написанный на языках программирования C и C++, который предоставляет прямой доступ к внутренним структурам данных и функциям ядра CREO [6]. Он может используется для:

- Создания пользовательских команд и меню; Автоматизации проектирования; Разработки специализированных САПР-приложений;
- Интеграции с ERP, PLM (например, Windchill) и другими системами; Расширения функциональности CREO за пределы стандартного интерфейса.

Основные возможности Pro/TOOLKIT:

- создание и редактирование детали, сборки, чертежи; Управление параметрами и размерами;
- чтение и изменение геометрии (поверхности, кромки, точки);
- генерация модели по шаблонам;
- добавление пользовательских интерфейсов;
- интеграция с внешними системами (SQL, Oracle, SAP, Windchill); Выполнение проверки и валидации 3Д-моделей.

Главным преимуществом Pro/TOOLKIT по сравнению с J-Link является полный доступ к геометрии объектов и сохранения структуры «дерева построения».

В компании «АСКОН» для САПР КОМПАС-3D существует свой интерфейс прикладного программирования – COM API. Данный инструмент служит для:

- управления деталями, сборками, чертежами;
- создания и редактирования геометрии;
- работы с параметрами и переменными;доступа к дереву построения.

COM API в КОМПАС-3D – это интерфейс автоматизации, основанный на технологии Component Object Model (COM), который позволяет управлять КОМПАС-3D программно из внешних приложений. Такие приложения с использованием данного инструмента могут быть написаны на следующих языках программирования [7]:

- VB.NET; C++; Delphi; C#.

Принцип работы COM API:

1. Приложение (например, на Delphi или C#) создает объект для работы с COM-интерфейсом – «Kompas.Application»;
2. Используя созданный объект, получаем доступ к активному документу или создаем новый;
3. Вызываем методы и свойства объектов (модель, эскиз, таблица и т.д.);
4. Выполняем построение, редактирование или экспорт.

Сравнение методов миграции данных CAD/PLM. Исследование авторов. Таблица 1 – Сравнение методов миграции.

Таблица 1 – Сравнение методов миграции.

Метод (технология)	Преимущества	Трудности
Нейтральные форматы (STEP,JT)	Поддержка разными системами САПР, разработанные разными контрагентами	Потеря атрибутов, дерева построения
Сторонние конвертеры	Автоматизация процесса	Ограниченная функциональность. Потеря дерева построения. Потеря данных
Прямая конвертация	Быстрота	Низкая сохранность связей. Потеря дерева построения. Потеря данных
API-решения	Максимальная сохранность данных	Сложность разработки, трудоемкость

Вывод: Изучив, исследовав использование внутренних интерфейсов программирования приложений и скриптовых решений, можно сделать вывод, что использование инструментов Pro/TOOLKIT компании «PTC» и COM API компании «АСКОН» для решения вопроса миграции данных является, с одной стороны, наиболее перспективным с точки зрения передачи максимального объема информации, а с другой стороны — наиболее сложным в реализации, поскольку по состоянию на середину 2025 года, по материалам из всемирной паутины — Интернет, нет никаких наработок в этом направлении.

2. Предлагаемое решение вопроса миграции от «АСКОН-ПроТех»

На сегодняшний день интегратором систем «АСКОН-ПроТех», занимающейся внедрением инструментов компании «АСКОН» предложена методика миграции данных изделий (3D-модели ДСЕ) в комплекс АСКОН. Она состоит из следующих шагов:

1) Выбираем в Windchill изделие для миграции в комплекс АСКОН;

2) Передаем информацию по НСИ (Нормативно-справочная информация) с данными, входящими в изделие. В системе ПОЛИНОМ:MDM создается справочник мигрированных объектов, включая атрибутивную информацию;

3) Передаем структурные и атрибутивные данные из Windchill в ЛОЦМАН, создавая тем самым структуру и состав сборок участвующей в миграции информации;

4) Миграция геометрической информации выполняются параллельно несколькими конструкторами:

4.1. Из CREO экспортируются геометрические модели и импортируются в ПОЛИНОМ через его интерфейс. Импортированная модель не параметризирована, параметрическую модель необходимо создать заново в КОМПАС;

4.2. Геометрическая модель изделия указывается в ЛОЦМАН как исходная. После открытия в КОМПАС создается структура изделия, идентичная структуре в ЛОЦМАН. Геометрия деталей привязана к самим деталям, НСИ берется из ПОЛИНОМ. Привязка деталей в сборках отсутствует. Атрибутивная информация передается из ЛОЦМАН в КОМПАС;

4.3. Конструктор пересобирает (переприязывает) сборки для восстановления привязок. Процесс может выполняться параллельно несколькими конструкторами;

4.4. При необходимости изменения импортированных изделий конструктор создает новые параметрические модели или изменяет

импортированную геометрию. В ЛОЦМАН создаются новые версии деталей, сборок, чертежей.

Представление данной методики в виде схемы-алгоритма показано на (Рисунок 1- **Миграция данных. Пошаговое описание методики от «АСКОН ПроТех». Составлено автором Н.А. Лазовым**).

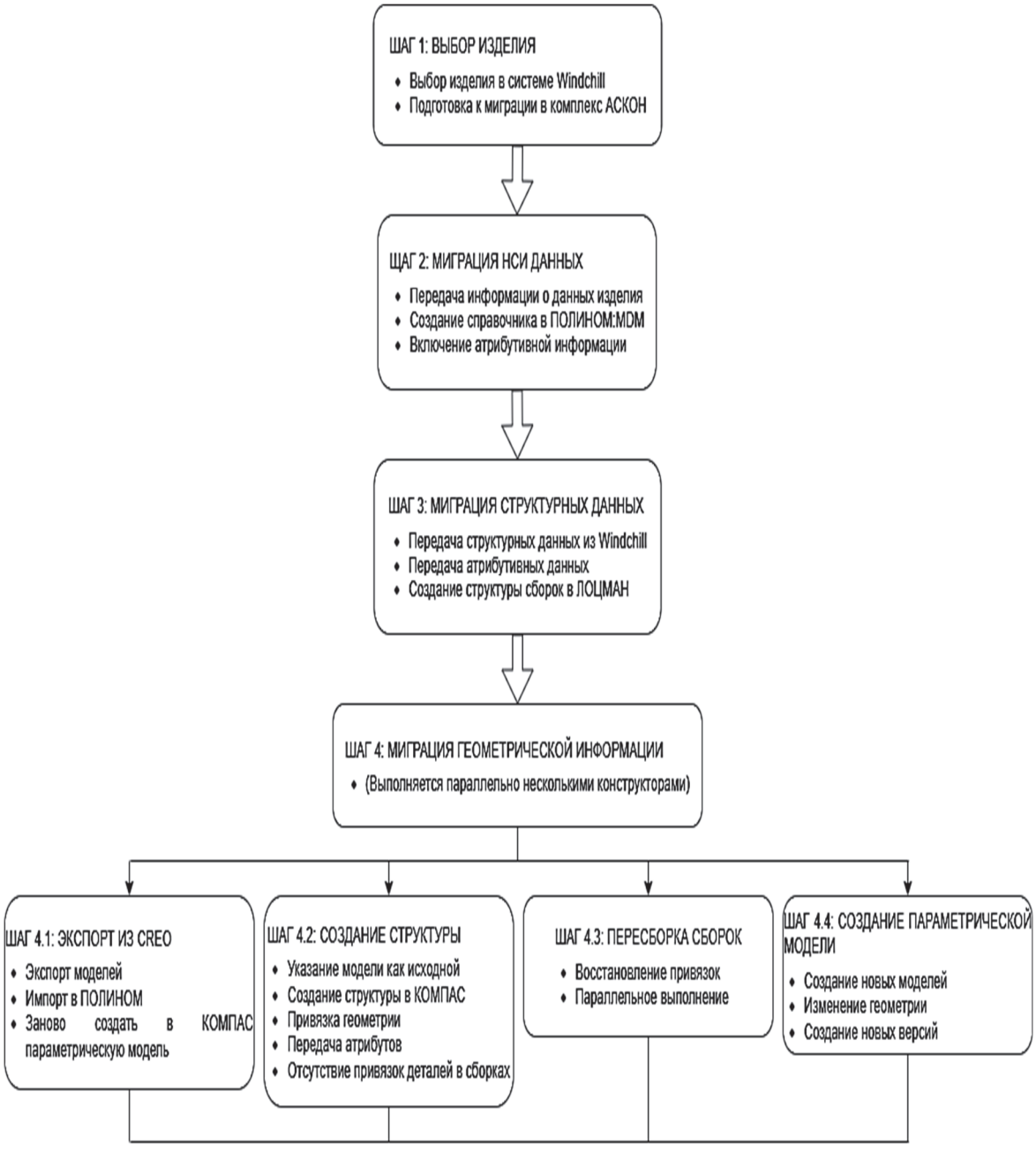


Рис. 1– Миграция данных. Пошаговое описание методики от «АСКОН ПроТех». Составлено автором Н.А. Лазовым

Помимо этого, данные по чертежам передаются, или через опубликованного вторичного представления Windchill в формате PDF в ЛОЦМАН, или через экспорт и импорт в КОМПАС двумерной информации

без сохранения ассоциативности моделей и чертежей (DXF, DWG). Соответственно, ассоциативность модели-чертеж (в продуктах PTC) не мигрирует (в продукты АСКОН), для восстановления ассоциативности чертеж необходимо создать заново.

Проведенный анализ представленной методики миграции данных изделий из системы Windchill в комплекс АСКОН выявил как положительные аспекты, так и ряд существенных ограничений.

***Сильные стороны**:*

1) **Системный подход к миграции**: методика предусматривает поэтапную миграцию различных типов данных - начиная от НСИ информации и заканчивая геометрическими моделями. Это позволяет структурировать процесс переноса данных и минимизировать ошибки;

2) **Автоматизация процессов**: этапы (пункты) 2 и 3 методики предусматривают автоматическую передачу НСИ данных и структурной информации, что значительно ускоряет процесс миграции и снижает вероятность человеческих ошибок;

3) **Параллельная обработка**: пункт 4 методики позволяет нескольким конструкторам одновременно работать над миграцией геометрической информации, что повышает общую эффективность процесса;

4) **Интеграция с существующими системами**: методика использует уже имеющиеся интерфейсы и интеграционные решения, что снижает затраты на реализацию.

Выявленные проблемы и ограничения:

1) Потеря параметрической информации: согласно пункту 4.1, при экспорте из CREO геометрическая информация становится непараметризированной. Это означает потерю всех преимуществ параметрического моделирования, что требует полного пересоздания моделей в КОМПАС;

2) Отсутствие привязок в сборках: пункт 4.2 указывает на отсутствие привязки деталей в сборках, что требует дополнительного этапа пересборки (пункт 4.3). Это увеличивает трудоемкость процесса и создает дополнительные риски ошибок;

3) Потеря атрибутивной информации: атрибуты модели CREO, не переданные ранее в Windchill, не попадают в КОМПАС и ЛОЦМАН. Это может привести к неполноте мигрированных данных;

4) Проблемы с чертежами: миграция чертежей осуществляется либо в формате PDF (без возможности редактирования), либо через DXF/DWG без сохранения ассоциативности. Это требует полного пересоздания чертежей для восстановления ассоциативных связей;

5) Дублирование усилий: Необходимость создания новых параметрических моделей и пересборки изделий приводит к значительному

дублированию работы, которая уже была выполнена при создании оригинальных моделей.

Вывод: Данная методика представляет собой рабочее решение для миграции данных, но сопряжена со значительными трудозатратами и потерей части информации.

3. Поисковые решения, исследования НТЦК по вопросу миграции данных между САПР CREO и Компас

На базе полученных результатов в НТЦК КИО ВС проводились исследования по выявлению возможных решений данной проблемы. Они были направлены на возможность создания эффективного инструмента для решения поставленных задач. В рамках проведенного анализа были изучены различные подходы и технологические решения, доступные на современном рынке CAD-систем. Особое внимание было уделено широким возможностям различных программных платформ и поиску оптимального технического решения.

Значительная часть времени во время исследования была потрачена на изучение широких возможностей различных программных платформ, которые могли бы стать основой для разработки эффективного решения. Был проведен детальный анализ преимуществ и недостатков каждой из рассматриваемых систем, изучены их API-интерфейсы, документация и примеры реализации. При этом большое значение придавалось не только текущим возможностям платформ, но и перспективам их развития в будущем.

Поиск оптимального технического решения представлял собой сложный многоэтапный процесс, включающий анализ требований, сравнение альтернатив и оценку потенциальной эффективности каждого из рассматриваемых вариантов.

Результатом данного исследования было принятия решения о разработке специализированного программного обеспечения на базе инструмента Pro/TOOLKIT от компании «PTC». Это решение было признано наиболее оптимальным с точки зрения соответствия поставленным задачам, и наличия необходимой функциональности.

Данное программное решение позволяет считывать структуру, геометрию, параметры модели и «дерево построения», что позволит в дальнейшем воспроизвести модель в КОМПАС-3D.

Процесс чтения модели инструментом Pro/TOOLKIT можно разделить на следующие этапы:

1) **Извлечение структурной информации модели**: Процесс получения структурной информации начинается с идентификации активной модели в текущем сеансе работы CREO Parametric. Система различает три основных типа моделей: детали, сборки и чертежи. Для

сборочных единиц реализуется рекурсивный обход иерархической структуры, при котором последовательно анализируются все уровни вложенности компонентов;

2) **Получение геометрической информации**: Извлечение геометрических данных осуществляется через анализ топологической структуры модели на уровне тел, поверхностей, кривых и вершин. Система обеспечивает доступ к точным математическим представлениям геометрических объектов, включая параметрические уравнения поверхностей, аналитические описания кривых и координатные данные вершин;

3) **Анализ параметрической информации**: Система предоставляет доступ к полному набору параметров модели, включая пользовательские атрибуты, размерные характеристики и вычисляемые значения. Осуществляется классификация параметров по их семантическому назначению и типам данных. Особое внимание уделяется извлечению ограничений и зависимостей между различными элементами модели, что позволяет сохранить логические связи при миграции данных;

4) **Чтение дерева построения**: Одной из ключевых возможностей Pro/TOOLKIT является доступ к истории создания модели, представленной в виде последовательности технологических операций. Система обеспечивает извлечение информации о каждом шаге построения, включая тип операции, используемые параметры, геометрические ограничения и логические зависимости. Для каждой операции сохраняются контекстные данные, позволяющие восстановить последовательность создания модели;

5) **Обработка и фильтрация данных**: В процессе извлечения реализуются различные механизмы фильтрации и сортировки информации в соответствии с заданными критериями. Система поддерживает инкрементальную обработку больших моделей, что позволяет эффективно работать с ресурсоемкими сборками. Осуществляется контроль целостности извлекаемых данных и обработка исключительных ситуаций, связанных с поврежденными или некорректными элементами модели;

6) **Формирование выходных данных**: Результаты анализа представляются в виде структурированных данных. Осуществляется преобразование данных с сохранением технологических связей. Сформированные данные содержат всю необходимую информацию для последующего воссоздания модели в среде КОМПАС-3D, включая геометрические характеристики, параметрические зависимости и структурные связи между компонентами изделия.

Данный инструмент позволил экспортировать все параметры дерева построения в формате текстового файла, содержащего полную

информацию о дереве построения, последовательности операций, геометрических параметрах элементов и их взаимосвязях.

Процесс преобразования данных из полученного текстового файла в готовую модель в КОМПАС-3D можно разделить на следующие этапы:

1) чтение структурированного текстового файла;
2) разбор параметров элементов;
3) построение дерева модели средствами COM API.

Первичная обработка данных начинается с чтения текстового файла, сгенерированного с использованием инструментария Pro/TOOLKIT. Данный файл содержит полное описание дерева построения детали в структурированном формате, что обеспечивает возможность последовательного анализа иерархической структуры модели. Процесс чтения реализуется через стандартные механизмы файлового ввода-вывода, при этом особое внимание уделяется корректной интерпретации структуры данных.

Чтение файла осуществляется построчно, при этом каждая строка представляет собой отдельный элемент дерева построения. Структура файла организована таким образом, что каждый элемент содержит информацию о своем типе, геометрических параметрах, позиционировании в пространстве и связях с другими элементами.

После считывания данных осуществляется детальный анализ параметров каждого элемента дерева построения. Процесс разбора включает в себя идентификацию типа геометрического примитива, извлечение числовых параметров, определение пространственного положения и установление топологических связей между элементами.

На заключительном этапе осуществляется построение эквивалентной модели в среде КОМПАС-3D с использованием программного интерфейса COM API. Данный этап представляет собой наиболее сложную часть преобразования, поскольку требует точного сопоставления примитивов различных САПР-систем и корректной передачи геометрической информации.

Построение дерева начинается с создания корневого элемента и последовательного добавления дочерних компонентов в соответствии с иерархией, установленной на предыдущих этапах. При этом каждый элемент создается с учетом его геометрических характеристик и пространственного положения. Особое внимание уделяется сохранению топологических связей между элементами, что обеспечивает корректность конечной модели. При построении каждого элемента производится тщательная проверка корректности параметров и их совместимости с требованиями КОМПАС-3D.

В результате выполненных процедур была успешно получена полноценная 3D-модель в среде КОМПАС-3D, полностью сохраняющая структуру дерева построения оригинальной модели. Это позволило не

только перенести геометрическую информацию, но и сохранить логическую последовательность создания модели, что обеспечивает возможность дальнейшего редактирования и параметризации в новой САПР-системе.

Используя результаты полученной программы и возможности инструмента COM API компании «АСКОН» становится возможным создания единого программного решения, позволяющего производить миграцию из одной САПР (CREO) в другую (КОМПАС-3D).

4. Практическое применение

Основной научно-технический вклад статьи заключается в разработке и обосновании альтернативного метода (технологии) миграции, основанного на глубокой интеграции через API обеих систем. Предложенный подход направлен на минимизацию потерь критически важной информации (особенно параметров и истории построения), обеспечение целостности структуры изделий (ЭСИ) и сохранение ассоциативных связей между моделями, чертежами и спецификациями. В исследование (работе) представлены принципы реализации метода, ключевые этапы процесса миграции и результаты апробации, демонстрирующие его преимущества перед анализируемыми стандартными подходами и существующим решением от АСКОН.

В будущем следует продолжать разработку API-решений - это видится самым перспективным направлением, учитывая безнадежность ожидания готовых решений от вендоров АСКОН.

Обобщение:

1. **Фундаментальная проблема неполной эквивалентности:** Установлено, что на текущем этапе развития САПР **трудоемка** прямая миграция цифровой 3D-модели (включая геометрию, атрибутивную информацию, дерево построения и историю создания) из системы PTC Creo Parametric в систему АСКОН КОМПАС-3D с сохранением полной функциональной и информационной эквивалентности. Это является ключевым ограничением для предприятий, осуществляющих переход между данными платформами.
2. **Ограниченность нейтральных форматов:** Исследование использования промежуточных форматов (STEP, JT) подтвердило их применимость для передачи геометрии, но выявило существенные недостатки: потеря атрибутивной информации, дерева построения (истории создания), параметризации и семантических связей между компонентами. Данные форматы не обеспечивают полноценную миграцию интеллектуальной составляющей модели.
3. **Отсутствие готовых комплексных решений:** Анализ существующих конвертеров и технологий прямой конвертации показал

отсутствие на рынке готовых инструментов, способных решить проблему миграции данных из Creo в КОМПАС-3D в полном объеме, включая атрибуты и структуру сборки.

4. **Перспективность API-подхода:** Разработка и применение собственных программных модулей (API) для взаимодействия с внутренними интерфейсами Creo и КОМПАС-3D доказали свою принципиальную осуществимость и перспективность как метод частичного решения проблемы. Успешно продемонстрирована возможность программного извлечения и обработки данных (включая спецификации и «дерево моделей») из Creo для последующего использования в среде АСКОН.

5. **Практическая подтвержденность частичных решений:** В рамках пилотного проекта (передвижная дождевальная машина МПД-500 и ее модификация) успешно апробированы и реализованы отдельные аспекты миграции:

– отработана технология передачи атрибутивной информации (разделы спецификации: «Материалы», «Покупные изделия», «Стандартные изделия») из Creo в PLM-систему АСКОН «Лоцман: МДМ Полином»;

– подтверждена работоспособность использования формата STEP для импорта геометрии деталей и сборочных единиц из Creo в КОМПАС-3Д;

– реализован разработанный API-инструмент для чтения структуры сборки («дерева моделей») из Creo. Начата практическая разработка - и она трудозатратная.

6. **Необходимость дальнейших разработок:** Несмотря на успехи пилотного проекта, задача полной автоматизированной миграции всей цифровой информации (особенно параметрической истории построения и сложных атрибутивных связей) из Creo в КОМПАС-3Д остается нерешенной и требует продолжения исследований и разработок, преимущественно в области создания специализированных конвертеров на базе API обеих систем.

Эти выводы обобщают проделанную работу, выделяют ключевые проблемы, подтверждают эффективность найденных решений на практике и указывают направления для будущих изысканий.

Выводы

Проведенное исследование проблем миграции данных между системами автоматизированного проектирования CREO Parametric и КОМПАС-3D позволило выявить что, использование инструментов Pro/TOOLKIT и COM API от компании «PTC» и «АСКОН» является наиболее обещающим вариантом для конвертации в формат САПР КОМПАС-3D.

Результаты исследования демонстрируют необходимость разработки специализированных инструментальных средств, обеспечивающих более полную и точную миграцию проектных данных между САПР CREO и КОМПАС-3D, а с использованием уже созданной программы для чтения «дерева моделей» это позволит значительно ускорить разработку необходимых инструментов.

Таким образом, проблема миграции данных в системах автоматизированного проектирования остается актуальной задачей, требующей дальнейших исследований и разработки комплексных решений, обеспечивающих максимально полную передачу данных, как геометрических, так и атрибутивных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кольцова, И. А. Синергия миграции и обмена данных при использовании импортозамещающих технологий / И. А. Кольцова, Ж. В. Кадолич // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 томах / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет ; редкол.: Д. В. Капский, А. С. Поварехо (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – Т. 1. – 324 с.

2. Обмен данными между САПР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://helpiks.org/9-69883.html?ysclid=mdmqcctk9u956345166. – Дата доступа: 28.07.2025

3. McClements, D. STEP File: How to View and Make a STEP File / D. McCleaments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dz6wltn9e7i51.cloudfront.net/resources/3d-printing/what-is-a-step-file/. – Дата доступа: 25.07.2025

4. JT – формат файла тесселяции Юпитера [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.fileformat.com/ru/3d/jt/. – Дата доступа: 25.07.2025

5. Начало работы с J-Link API для Creo Parametric [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/sandbox/113526/. – Дата доступа: 28.07.2025

6. Creo Toolkit – CREO TOOLKIT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://creo-toolkit.com. – Дата доступа: 25.07.2025

7. SDK КОМПАС-3D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.ascon.ru/KOMPAS_SDK/22/ru-RU/index.html. – Дата доступа: 25.07.2025

УДК 631.35

СИНЕРГИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ - КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД МИГРАЦИИ БИБЛИОТЕК СТАНДАРТНЫХ ИЗДЕЛИЙ PTC WINDCHILL В ЭКОСИСТЕМУ АСКОН

И.А. Кольцова[1], Ж.В. Кадолич[2]
[1]Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь
[2]Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация

В статье рассматривается решение комплексной задачи миграции библиотек стандартных изделий (далее - СТИ) из системы PTC (Creo/Windchill) в единое информационное пространство экосистему АСКОН (МДМ Полином, Лоцман:PLM, КОМПАС-3D) на опыте Научно-технического центра комбайностроения ОАО «Гомсельмаш» (далее - НТЦК).

Экосистема АСКОН — это комплекс программных продуктов для автоматизации всего жизненного цикла изделия (от проектирования до производства и управления), которые тесно интегрированы между собой и используют единые данные. Ключевая сложность заключается в фундаментальном различии идеологий хранения данных: система уникальных экземпляров в PDM Windchill (далее - Windchill) против параметрических генеративных моделей в МДМ Полином (далее - Полином). Это делает прямое автоматическое преобразование тысяч моделей невозможным.

Данная статья посвящена решению указанной проблемы путем разработки технологии преобразования атрибутов и геометрии СТИ в параметры генеративных шаблонов, обеспечивающей целостность данных и минимизацию рисков.

На примере ОАО «Гомсельмаш» рассмотрен опыт миграции библиотек стандартных изделий из PTC Creo/Windchill в экосистему АСКОН. Для преодоления фундаментального различия идеологий хранения данных предложена технология (методология) маппинга атрибутов, обеспечившая целостность данных и минимизацию потерь. Статья представляет практическую ценность для предприятий, осуществляющих переход между разнородными CAD/PLM-системами.

Технология маппинга (mapping) — это процесс установления соответствий (связей) между элементами данных в разных системах.

Ключевые слова: миграция данных, PTC Windchill, Creo, АСКОН, МДМ ПОЛИНОМ, Лоцман:PLM, КОМПАС-3D, стандартные изделия, параметрическая модель, маппинг атрибутов, интеграция систем.

Введение

Современное производство ОАО «Гомсельмаш» достигло такого уровня сложности, что его эффективное функционирование немыслимо без синергии цифровых технологий, объединяющих системы автоматизированного проектирования (CAD), управления инженерными данными (PDM) и полным жизненным циклом изделий (PLM). Эти системы формируют единое информационное пространство, становясь цифровой основой ОАО «Гомсельмаш», которая обеспечивает конкурентоспособность.

В условиях импортозамещения отечественные промышленные предприятия сталкиваются со стратегической задачей перехода с зарубежных CAD/PLM-систем на отечественные [1], [2].

Под стандартными изделиями (СТИ) понимаются изделия, примененные по государственным стандартам; отраслевым стандартам; республиканским стандартам; стандартам предприятий. В Windchill в контексте «Библиотека - Библиотека комплектующих» находится актуальная информация, например, по болтам, гайкам, шпонкам и другим стандартным изделиям (раздел спецификации «Стандартные изделия» ГОСТ 2.106» ЕСКД.Текстовые документы», состояние жизненного цикла «Выпущено»). В конструкторской спецификации раздел спецификации «Стандартные изделия».

В связи с этим, актуальнейшей практической задачей становится разработка и исследования технологий миграции данных, в первую очередь — библиотек стандартных изделий из Windchill PTC в среду АСКОН, а именно: в систему управления метаданными МДМ ПОЛИНОМ, с последующей интеграцией в PLM-систему Лоцман и использованием в CAD-системе КОМПАС-3D. Разные системы, технологии, разные разработчики, разные форматы данных и расширения файлов, фундаментальное различие в подходах к хранению и генерации геометрических данных.

Основная сложность заключается в фундаментальном различии подходов к хранению геометрической информации: от технологии строго уникальных моделей в Windchill к технологии параметрических генеративных моделей в ПОЛИНОМ.

В первую очередь необходимо перенести информацию по «Библиотекам». Данные по стандартным изделиям (СТИ) в системе Windchill расположены в отдельном контексте «Библиотека - Библиотека комплектующих», для конструкторов определен доступ для «Чтения» для данных из библиотеки, которые используются конструкторами при трехмерном проектировании и разработке конструкторской документации.

В Windchill актуальность информации поддерживается администраторами библиотеки. Данные библиотеки Windchill взаимосвязаны, проверены и актуальны с данными в заводской системе SAP.

Цифровые данные «Библиотека - Библиотека комплектующих» в Windchill содержат атрибуты (параметры) и цифровую (электронную) 3Д-модель данного стандартного изделия. При миграции необходимо наработать технологию экспорта/импорта:

- миграции атрибутов;
- миграции 3Д-моделей.

Сегодня нет готового решения от вендоров, АСКОН – и предстоит НТЦК разобраться, разработать и научно обосновать технологию(методологию) миграции, которая позволит преодолеть разрыв между системами, обеспечить целостность и корректность данных на всех этапах жизненного цикла и минимизировать риски потери критически важной информации по атрибутам и 3Д-моделям[3], [4].

Технологии хранения и генерации геометрических данных (3Д-моделей):

- PTC Windchill/CREO - применяется технология **уникальных экземпляров (Unique Instances)**. Каждая модификация детали (например, болт М8х20 и болт М8х25) представлена в системе как отдельный, уникальный файл геометрической модели.

- экосистеме АСКОН в Полином реализована технология **параметрических генеративных моделей (Generative Models)**. Система оперирует не массивом отдельных файлов, а едиными шаблонами, которые по запросу генерируют необходимую геометрию на основе заданного набора параметров (диаметр, длина и пр.).

В целевой системе, АСКОН Полином - рекомендован иной, более эффективный с точки зрения управления данных подход: создание одной параметрической модели-шаблона (например, «Болт»). Нужная геометрия генерируется и перестраивается «на лету» путем задания конкретных параметров (диаметр, длина, шаг резьбы, класс прочности и т.д.).

1. Анализ исходной и целевой систем данных.

1.1. Модель данных в PTC Windchill/Creo.

В конфигурации в системе Windchill функционирует по принципу управления уникальными экземплярами. В настоящий момент в НТЦК при работе с Windchill установлено и работает правило. Каждый экземпляр СТИ имеет атрибуты: наименование, обозначение, масса, ед.измерения, имя файла, версия модели, версия составной части и пр.. (Рис. 1.- Запись СТИ в Windchill). Каждому конкретному экземпляру СТИ сопоставлена индивидуальная модель.

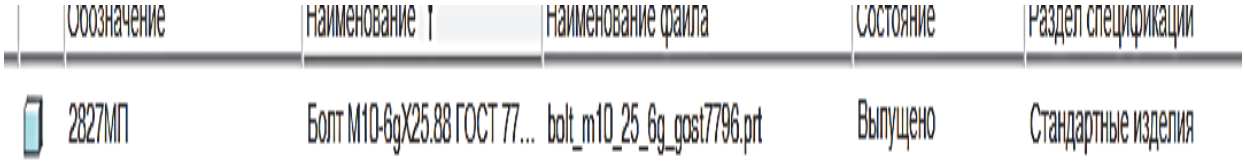


Рис. 1 – Запись СТИ в Windchill

В НТЦК Windchill каждое СТИ- уникальное. Имеет свои атрибуты и уникальную 3Д-модель.

Каждое стандартное изделие (например, болт М8х20) представлено в системе как самостоятельный объект со следующим набором данных (атрибутивных и графических представлений):

– уникальная геометрическая модель: файл детали в формате CREO (PRT). В CREO/Windchill модель СТИ уникальная;

– уникальный системный идентификатор (ID):Неизменяемый ключ объекта в базе данных Windchill;

– уникальный набор атрибутов: Наименование, Обозначение, Масса, Материал, Версия, Состояние жизненного цикла и др:

– уникальное имя файла, закрепленное за 3Д-моделью;

– множество других атрибутов (параметров).

1.2 **Таблицы семейств PTC CREO/Windchill.**

Таблицы семейств не используются. Пользователю запрещено использовать. Запрет на использование «таблиц семейств» (Family Tables) в CREO приводит к созданию тысяч геометрически подобных, но организационно независимых объектов. Это обеспечивает высокую прослеживаемость и отказоустойчивость, но порождает значительную избыточность данных и усложняет управление библиотеками.

Глобальная проблема миграции - передачи 3Д-моделей - из CREO/Windchill в Компас/АСКОН для раздела спецификации «Стандартные изделия» (далее СТИ).

Актуален вопрос. Как передать модель из Creo/Windchill (алгоритм передачи) в АСКОН Полином?

В АСКОН МДМ ПОЛИНОМ заложена технология работы с параметрическими моделями. МДМ ПОЛИНОМ для изделий, имеющих одинаковое функциональное назначение, параметры, типы размерных рядов изделий, рекомендуется создавать параметрические модели [4], [5].

1.3 **Сравнение технологии работы с файлами (графических представлений СТИ).**

Рассмотрим пример, **в PTC Windchill:** В НТЦК есть 1000 уникальных моделей болтов М8х20, М8х25, М10х30 и т.д. Каждая имеет свой уникальный файл, уникальный ID в системе и уникальные атрибуты.

В **АСКОН Полином:** имеем одну параметрическую модель "Болт", которая по заданным параметрам (Диаметр, Длина, шаг, резьба, Класс прочности, имя модели) генерирует (перестраивает) нужную геометрию.

Технология Полином[5] основана на работе с обобщенными 3Д-моделями Полином.

Для изделий, имеющих одинаковое функциональное назначение, рекомендуется создавать обобщенные (комплексные) 3D-модели. В этом случае замена в документе одного типа изделия на другой осуществляется без потери сопряжений и других связей. Типовой пример комплексной модели – PLib_Bolt_1_712.m3d. Пользователь может найти ее в Библиотеки компонентов. Как правило, обобщенной моделью является параметрическая модель или модель с исполнениями. Используя одну обобщенную модель, пользователь может создать типоразмерный ряд изделий. При высокой сложности обобщенной модели допускается создание разных моделей для изделий, имеющих одинаковое функциональное назначение. Например, для изделий типа «Болт» и «Винт». Изменение конфигурации модели выполняется путем добавления или исключения набора операций. При этом:

• добавление операции приводит к добавлению в модель всех ее родителей;

• исключение операции приводит к исключению из модели всех ее потомков.

Составные изделия. Составное изделие (сборка) должно быть представлено несколькими файлами:

• файл сборки формата .a3d;

• файлы деталей (компонентов сборки) формата .m3d.

Вывод: Прямого автоматического "преобразования" тысяч уникальных моделей в одну параметрическую не существует.

Получается, что скопировать файлы нельзя. Механизм передачи — это не просто копирование файлов, а сопоставление (все время надо сравнивать) атрибуты уникальной модели из Windchill с параметрами генеративной модели в Полином. Это самый важный этап. Для каждой уникальной модели из Windchill необходимо определить, каким параметрам в Полином она соответствует.

Из справки Полином [4],[5]. В Полином одна параметрическая модель — это 3D-модель геометрия, которых управляется не размерами, а формулами и параметрами. Задаем ключевые переменные (например, диаметр = 50мм, длина = 2 * диаметр) и система автоматически перестраивает геометрию при их изменении. В Полином одна базовая, параметрическая модель для того, что бы быстро получать на основе одной модели целое семейство (ряд) изделий разных типоразмеров, но одинаковой конструкции и функционального назначения (например, болты М6х20,

М8х30 и т.д.). Пример представлен в Таблица 1- Полином. СТИ Наименования и Имена файлов

Таблица 1- СТИ Полином Наименования и Имена файлов

НАИМЕНОВАНИЕ стандартного изделия ПОЛИНОМ	**ИМЯ ФАЙЛА модели ПОЛИНОМ**
Болт М12х1,25-6gх32.029 ГОСТ 15163-78	Plib_Tapered_bolt_GOST_15163_911.m3d
Болт М12х1,25-6gх90.029 ГОСТ 15163-78	Plib_Tapered_bolt_GOST_15163_911.m3d
Болт М10х1,25-6gх30.68.029 ГОСТ 15163-78	Plib_Tapered_bolt_GOST_15163_911.m3d
Болт М12х1,25-6gх56.029 ГОСТ 15163-78	Plib_Tapered_bolt_GOST_15163_911.m3d
Болт М10х1,25-6gх30 ГОСТ 15163-78	Plib_Tapered_bolt_GOST_15163_911.m3d
Болт М4-6gх20.023 ГОСТ 15163-78	Plib_Tapered_bolt_GOST_15163_911.m3d
Болт М12х1,25-6gх45.029 ГОСТ 15163-78	Plib_Tapered_bolt_GOST_15163_911.m3d
Болт М12х1,25-6gх63.029 ГОСТ 15163-78	Plib_Tapered_bolt_GOST_15163_911.m3d
Болт М12х1,25-6gх50.029 ГОСТ 15163-78	Plib_Tapered_bolt_GOST_15163_911.m3d

Из Таблицы 1 видно, что одной группе болтов соответствует один файл модели. Изначально, следует предусмотреть соответствие атрибутов и 3Д-моделей при миграции. При миграции данных как будет устанавливаться соответствие моделей, имен файлов (которые входят в сборочные единицы), параметров. Следует определить. Как модель из CREO/Windchill передаётся (алгоритм передачи) в АСКОН МДМ ПОЛИНОМ?

1.4 Для миграции данных необходимо исследовать вопросы соответствия атрибутов и 3Д-моделей:

– как устанавливается соответствие для каждой уникальной модели из Windchill - ставятся (определяются) в соответствие параметры для генеративной модели в ПОЛИНОМ.

– как устанавливается соответствие имен файлов? Имена файлов **не совпадают и не переносятся напрямую**. Или оставляем такое имя файла как в Windchill?

– **как имена файлов будут меняться в сборках при миграции?** Это необходимо для последующей замены компонентов в сборках.

– **как устанавливается соответствие параметров?** Параметры из атрибутов Windchill с параметрами Полином?

Предусмотреть ограничения, риски при передаче атрибутов и 3Д-моделей. При передаче конвертации моделей необходимо проверять:

– геометрию: потеря при передачи геометрии интерфейсов, резьбы, осей, массы;

– проверка моделей CREO/Windchill с моделью Полином;

– порядок передачи моделей Полином затем в Лоцман;

– загрузка в SAP.

1.5 Модель данных в АСКОН МДМ Полином. МДМ ПОЛИНОМ реализует принцип параметрического моделирования для управления библиотеками стандартных изделий. Его функциональность основана на следующих технологиях [5]:

- **Процесса генерации. Использование генеративная модели:** Для всего семейства изделий (например, всех болтов) создается одна параметрическая 3D-модель (шаблон). Ее геометрия управляется не размерами, а через программно-заданные параметры (Диаметр, Длина, Шаг резьбы).

- **Параметрическое управление:** Изменение значений параметров автоматически инициирует перестроение геометрии модели по заданным алгоритмам и формулам.

- **Экономия ресурсов:** Один файл шаблона заменяет тысячи файлов уникальных моделей, радикально сокращая объем хранимых данных и упрощая внесение конструктивных изменений во все семейство сразу.

Вывод: сегодня прямое преобразование (конвертация) тысяч уникальных .prt-файлов Creo/Windchill в один параметрический шаблон ПОЛИНОМ **технически невозможно**. Задача миграции трансформируется из задачи переноса файлов в задачу **сопоставления информации** (Data Mapping). Для каждого уникального объекта из Windchill необходимо определить, каким набором значений параметров в генеративной модели ПОЛИНОМ он может быть однозначно описан и воспроизведен.

2. Разработка технологии (методологии) миграции

Миграция данных – комплексный процесс переноса данных из одной системы хранения или формата в другую, которая включает:

4) Извлечение данных из источника Creo/Windchill (старая система, файл).

5) Трансформация (приведение к структуре, формату, стандартам новой системы).

6) Загрузка в целевую экосистему АСКОН-Полином.

Предлагаемый процесс миграции, состоит из последовательных этапов.

Этап 1. Подготовка и экспорт данных из Windchill

Цель: Сформировать полный и структурированный список мигрируемых объектов.

Методы: Используя отчетные механизмы Windchill или прямое обращение к базам данных, выполняется выгрузка всех атрибутов по каждому объекту СТИ в структурированный файл (форматов CSV, XML, JSON). Ключевые выгружаемые поля: Windchill ID, Имя файла,

Наименование, Обозначение, Масса, Версия, Ед.измерения, а также параметры, содержащиеся в наименовании (например, «Болт М8х20» -> D=8, L=20).

Первым шагом является автоматизированная выгрузка из Windchill не самих геометрических файлов, а их метаданных. Для каждого уникального ID 3Д-модели должны быть извлечены атрибуты:

- Наименование
- Обозначение; Версия; Состояние жизненного цикла;
- Раздел спецификации
- Масса
- Единица измерения
- Имя файла и др.

Эти данные формируют исходную базу для дальнейшего преобразования. Выгрузка может быть осуществлена с помощью стандартных отчетов Windchill или через его API (Application Programming Interface – это интерфейс прикладного программирования - набор правил и инструкций, которые позволяют разным программам взаимодействовать друг с другом).

Этап 2. Создание и параметризация шаблонов в ПОЛИНОМ

Цель: Разработать генеративные модели, покрывающие все номенклатурные ряды мигрируемых изделий.

Методы: Пользователь создает в Полином шаблоны для каждого класса изделий (болты, гайки, шайбы). В модели определяются управляющие параметры, имена которых должны быть стандартизированы и логически понятны (Диаметр, Длина, Шаг_резьбы). Алгоритмы и формулы обеспечивают корректное изменение геометрии.

Этап 2.1 Трансформация данных и построение таблицы соответствия (Mapping Table).

Это центральный и наиболее сложный этап. Его цель – установить связь между каждым «Уникальным_ID_Windchill» и набором параметров генеративной модели в Полином.

Предполагается три режима работы:

1. Автоматизированный: Для моделей, атрибуты которых (Наименование, Обозначение) однозначно и по заранее заданным алгоритмам (регулярным выражениям) могут быть парсированы в параметры (Диаметр, Длина, Класс прочности и пр.).

2. Полу-автоматизированный: Для случаев, требующих проверки и ручного подтверждения оператором.

3. Ручной: Для нестандартных или сложных случаев, где автоматическое сопоставление невозможно.

Результатом этапа является «Таблица Соответствия (Mapping Table)», которая является главным управляющим документом миграции. Ее структура:

«Windchill_ID | Параметр_1 | Параметр_2 | ... | Параметр_N | Имя_шаблона_в_ПОЛИНОМ»

Этап 3: Интеграция через API ПОЛИНОМ. Разработка программ

После формирования Mapping Table специальная программа-конвертер, используя API системы АСКОН ПОЛИНОМ, должна для каждой строки таблицы:

1. Найти в библиотеке ПОЛИНОМ нужную параметрическую модель-шаблон.
2. Передать ей набор параметров.
3. Инициировать процедуру генерации новой геометрии.
4. Сохранить сгенерированную модель в виде файла КОМПАС-3D (например, .kompas).

Для каждого предприятия необходимо решить алгоритм по «именам файлов» при миграции. Регламент именования файлов 3Д-моделей. Предлагается не сохранять исходные имена файлов из Windchill, так как они не несут смысловой нагрузки и не унифицированы. Имя файла в КОМПАС должно генерироваться по внутренним правилам ПОЛИНОМ или на основе переданных параметров (например, «Болт_М8_20_10.9.kompas»). Соответствие между «Windchill_ID» и новым именем файла должно фиксироваться в той же или дополнительной таблице соответствия (Имена файлов должны определяться в алгоритме ранее).

Этап 4. Маппинг атрибутов и параметров (Ключевой этап)

Цель: Установить однозначное соответствие между объектами Windchill и наборами параметров ПОЛИНОМ.

Методы:

1. **Анализ и нормализация данных:** Атрибуты из выгрузки Windchill приводятся к единому формату. Параметры из текстовых полей (Наименование) извлекаются с помощью скриптов (используемая функциональность регулярные выражения).
2. **Создание таблицы соответствия:** Формируется главная таблица миграции. Для каждого Windchill ID в ней прописываются:

-соответствующий шаблон в ПОЛИНОМ (например, «Болт_Шестигранный»);

-значения всех параметров для этого шаблона;

- новое имя файла для генерируемого экземпляра.

Этап 5. Пакетная генерация экземпляров в ПОЛИНОМ

Цель: автоматическое создание моделей в КОМПАС-3D на основе таблицы соответствия. **Методы:** Используя API ПОЛИНОМ, запускается скрипт, который для каждой строки таблицы:

a) выбирает нужный шаблон;
b) задает ему значения параметров;

c) выполняет генерацию геометрии;

d) сохраняет результат в файл с заранее заданным **новым именем** (например, Болт_М8х20_Кл.8.8.m3d). Важно отказаться от прямого копирования имен из Windchill для избежания конфликтов и следования новой системе именования. Предполагается хранить имя файла Windchill в Атрибутах Полином.

3. Установление соответствия (маппинг) - наиболее важный и наукоемкий этап.

Следует **с**опоставить каждую запись в реестре из Windchill с набором значений параметров в модели Полином.

Действия:

Сопоставление параметров: Для каждой уникальной модели анализируются ее атрибуты. На основе этих данных заполняются значения параметров ПОЛИНОМ. Например, для болта из Windchill с именем «М8х20»:

a) Атрибут Наименование -> Параметр в ПОЛИНОМ Наименование = "Болт"

b) Атрибуты, извлеченные из имени/обозначения -> Диаметр_резьбы = 8, Длина_стержня = 20.

c)Атрибут Масса -> Параметр Масса = [значение из Windchill] (для последующей проверки).

Создание таблицы соответствия: формируется таблица (например, в Excel), где каждой уникальной модели Windchill (ее оригинальный ID или имя файла) ставится в соответствие набор параметров для ПОЛИНОМа. Эта таблица становится главным управляющим документом миграции.

4. Обработка сборочных единиц и обновление ссылок.

Так как СТИ входят в сборочные единицы, то необходимо заменить СТИ в сборках**.**

Цель: Обеспечить целостность сборок после замены компонентов.

Методы: Это наиболее сложный технический этап.

a) Сборки Windchill экспортируются в нейтральный формат (STEP 242), сохраняющий дерево компонентов и имена файлов[6], [7].

b) Разрабатывается software-инструмент (например, скрипт на Python или другой язык прграммирования), специализированный конвертер), который загружает сборку, анализирует ее структуру и для каждого компонента находит в таблице соответствия его новое имя и путь в системе ПОЛИНОМ/Лоцман.

c) Инструмент производит замену ссылок в сборке.

d) Обновленная сборка импортируется в Лоцман PLM.

Обработка сборок и замена компонентов

Миграция отдельных деталей бессмысленна без обновления сборок, где они используются. Процесс требует создания отдельного скрипта для трансформации сборок Creo (.asm). Алгоритм его работы:

1. проанализировать структуру сборки CREO, получив список всех входящих в нее компонентов и их уникальных Windchill ID.

2. для каждого компонента, являющегося СТИ, найти через Mapping Table эквивалент в системе ПОЛИНОМ (параметры и, как следствие, имя сгенерированного файла .kompas).

3. заменить ссылку на оригинальный файл Creo (.prt) на ссылку на новый файл КОМПАС (.kompas) в структуре преобразуемой сборки. Замена должна происходить не по имени файла, которое меняется, а по привязке к уникальному ID из исходной системы Windchill. Это гарантирует точность и избежать ошибки.

5. Контроль качества и верификация при миграции.

После выполнения миграции следует проверить качество атрибутов и моделей.

Цель: минимизировать ошибки миграции.

Методы:

1) **Верификация геометрии:** Выборочное сравнение элементов (резьбовые поверхности, фаски, посадочные зоны) в исходной и сгенерированной моделях. Проверка на коллизии в сборках.

2) **Сверка метаданных:** Автоматическая проверка соответствия масс, моментов инерции и других атрибутов. Расхождения сверх допустимой погрешности требуют ручного анализа.

3) **Проверка целостности сборок:** Полная проверка сборок на наличие потерянных ссылок, недогруженных компонентов и ошибок сопряжения.

Верификация и контроль качества миграции. Для подтверждения корректности процесса миграции необходим строгий регламент выборочной проверки. Пункты для сравнения исходной и конечной моделей:

a) Проверка геометрии. Геометрическое соответствие: Сравнение ключевых размеров, полученных из чертежа или путем автоматизированного замера в CAD-системах. Особое внимание уделить сложным геометрическим элементам (резьбы, фаски, скругления).

b) Соответствие массо-габаритных характеристик (объемов): Сравнение массы и объема модели. Допустимые отклонения должны быть регламентированы (например, не более 1% из–за факта, разные математические ядра геометрического моделирования в CREO и КОМПАС).

c) Семантическая корректность: Проверка сохранности и правильности переноса основных атрибутов: Обозначения, Наименования, Раздела спецификации.

d) Функциональность: Проверка наличия и корректности критических элементов, таких как резьбовые поверхности, которые важны для последующих процессов сборки и создания чертежей.

Проверка должна охватывая все типы стандартных изделий и различные диапазоны параметров.

6. Анализ рисков при миграции и пути их уменьшения последствий

При миграции данных следует предупредить риски:

- **Потери геометрической информации:** При конвертации в нейтральные форматы (STEP) параметрическая информация и история построения теряются. Резьбы могут превратиться в аппроксимацию. **Решение:** Настройка конвертеров на максимальную детализацию. Для критичных элементов – ручная доработка в КОМПАС-3D после миграции.

- **Ошибки маппинга:** Неоднозначность наименований в Windchill может привести к некорректному определению параметров. Решение: Разработка сложных алгоритмов парсинга с машинным обучением или организация этапа верификации выборки.

- **Производительность:** Обработка тысяч сборок может занять значительное время. **Решение:** Оптимизация скриптов, параллельные вычисления, разбиение процесса на пакеты.

Выводы

Предложенная технология (методология) миграции данных из PTC Windchill в экосистему АСКОН представляет собой комплексный подход, основанный на технологии маппинга атрибутов, а не на прямой геометрической конвертации. Успех проекта зависит от тщательной подготовки данных, создания детализированных таблиц соответствия.

Ключ к успеху – создание детальной и точной таблицы соответствия атрибутов и параметров, которая является цифровым мостом между двумя различными технологиями хранения данных.

Результатом является не просто перенос данных, а их трансформация в качественно новую, более эффективную и управляемую форму. Внедрение параметрического подхода через МДМ ПОЛИНОМ позволяет радикально сократить объем хранимых данных, ускорить процесс проектирования за счет быстрой генерации новых типоразмеров и повысить точность данных всей цепочке CAD-PLM-ERP.

Данная работа может служить практическим руководством для предприятий, стоящих перед аналогичными задачами консолидации и миграции CAD/PLM-систем, и вносит вклад в развитие методик управления цифровыми двойниками изделий в условиях IT-среды.

Предложенная методология решает комплексную задачу миграции данных стандартных изделий между разнородными PDM-системами с принципиально разными технологиями к хранению геометрии. Ключевыми элементами решения являются:

a) Признание отсутствия прямого конвертера и необходимость промежуточного преобразования данных.

b) Использование таблицы соответствия (Mapping Table) как центрального управляющего элемента процесса.

c) Деление процесса на четкие этапы: выгрузка, трансформация, генерация через API, обработка сборок.

d) Децимация связи "файл-файл" и переход к связи "ID-параметры-файл".

Связь "Файл-Файл" - Как было в Windchill. Уникальный код, который ссылается не на конкретный файл, а на тип объекта (например, "Болт_Гост_7798".

Связь "ID-Параметры-Файл" (Как стало в ПОЛИНОМ).

ID (Идентификатор): Уникальный код, который ссылается не на конкретный файл, а на тип объекта (например, "Болт_Гост_7798").

Таким образом, "децимация" связи "файл-файл" и переход к "ID-параметры-файл" — это и есть суть методологии маппинга. Это процесс преобразования тысяч файлов в единую, интеллектуальную систему правил и шаблонов, что кардинально повышает эффективность работы с библиотеками стандартных изделий.

e) Разработка комплексного регламента верификации для обеспечения качества результата проверка после миграции.

Процесс требует значительных трудозатрат на подготовительном этапе (создание и наполнение таблицы соответствия), он окупается за счет последующего эффективного управления библиотекой стандартных изделий в новой системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. США запретили предоставлять IT услуги России: что это значит. – URL: https://kontur.ru/talk/spravka/52604ssha _zapretili_predostavlyat_ituslugi_rossii// (дата обращения: 19.05.2024).

2. Российский ИТ-рынок проходит через санкционную облачность. Обобщение. – URL: https://www.interfax.ru/russia/966517// (дата обращения: 19.08.2024).

3. Санкции в отношении IT-услуг и программного обеспечения. – URL: https://konsugroup.com/ news/it-sanctions-2024/ (дата обращения: 19.08.2024).

4. Аскон. Сквозная 3Д-технология – конкурентное преимущество бизнеса. – URL: https://ascon.ru/solutions/ct3d// (дата обращения: 19.08.2024).

5. Документация и технические спецификации АСКОН: «Руководство администратора Лоцман:PLM», «Методики параметризации в КОМПАС-3D», «Работа с библиотеками стандартных изделий в МДМ ПОЛИНОМ». – URL: https://ascon.ru/ (дата обращения: 10.10.2023).

6. Кольцова, И. А. Актуальные вопросы импортозамещения программного обеспечения для подготовки конструкторской документации / И. А. Кольцова, Ж. В. Кадолич // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 3 (102). – С. 116–124. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-116-124

7. Кольцова, И. А. Синергия миграции и обмена данных при использовании импортозамещающих технологий / И. А. Кольцова Ж. В. Кадолич // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, июнь 2024 г. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2024. – Т. 1. – С. 134–147.

УДК 339.138

ЭКСПОРТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ОРГАНИЗАЦИИ КАК ОСНОВА СТРАТЕГИИ ЕЕ РАЗВИТИЯ

С.В. Михолап, Д.Е. Муляр
ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь

1 Экспортный потенциал страны и его составляющие

Экспортный потенциал страны представляет собой комплексную характеристику, отражающую способности национальной экономики к производству товаров и услуг, конкурентоспособных на международных рынках. Он включает в себя не только количественные показатели, такие как объем экспорта, но и качественные аспекты, касающиеся уровня технологий, инновационных процессов, а также соответствия стандартам и требованиям мирового рынка.

Процесс формирования экспортного потенциала основывается на множестве факторов, которые можно условно разделить на две основные категории: сравнительные национальные преимущества и новые конкурентные преимущества.

Сравнительные преимущества охватывают такие аспекты, как:

1. Географическое положение – это фактор, напрямую влияющий на транспортные издержки и логистику, что имеет важное значение для международной торговли.

2. Наличие природных ресурсов: запасы минералов, полезных ископаемых и других природных ресурсов могут значительно повысить экспортный потенциал, особенно став основой для обрабатывающей промышленности.

3. Макроэкономические и политические условия: стабильная макроэкономическая среда и предсказуемая политическая ситуация создают уверенность у инвесторов и предпринимателей, способствуя росту экспортной активности.

4. Законодательная база: наличие четких и прозрачных норм, регулирующих внешнеэкономическую деятельность, способствует развитию экспорта.

5. Инфраструктурные аспекты: развитая транспортная и логистическая инфраструктура играют ключевую роль в снижении издержек и времени доставки товаров.

6. Уровень образованности населения: высокий уровень образования способствует повышению квалификации рабочей силы и внедрению инновационных технологий, что, в свою очередь, влияет на качество и конкурентоспособность продукции.

7. Производительность труда и относительная дешевизна рабочей силы: высокая производительность труда позволяет предприятиям производить больше товаров с меньшими затратами, в то время как доступные трудовые ресурсы могут снизить конечную стоимость продукции, делая ее более привлекательной для зарубежных покупателей [3].

На современном этапе можно наблюдать прямую пропорциональную зависимость между уровнем развитости экспортного потенциала и общей эффективностью функционирования хозяйственного комплекса. Эта взаимосвязь проявляется в том, что чем сильнее экспортный потенциал государства, тем выше уровень развития внутренней экономики.

Структура экспортного потенциала может быть представлена в виде трех ключевых стадий, каждая из которых играет важную роль в процессе формирования и развития экспортной деятельности.

1. Формирование: на этом этапе происходит создание основ экспортного потенциала. Важным аспектом формирования является выявление и оценка ресурсов, необходимых для дальнейшего производства товаров и услуг на экспорт.

2. Развитие: эта стадия включает в себя процессы, направленные на обновление и модернизацию существующих производственных мощностей. Ключевым аспектом на этом этапе является внедрение инновационных технологий и новых методов управления, что не только увеличивает объемы производства, но и существенно улучшает качество экспортируемой продукции.

3. Управление: уровень управления экспортным потенциалом имеет ключевое значение для обеспечения эффективной реализации стратегий, связанных с экспортной деятельностью. Этот этап охватывает формирование и реализацию комплексных стратегий, направленных на оптимизацию процессов выхода на зарубежные рынки, включая:

– планирование экспортного потенциала: на данном этапе важно определить стратегические цели, оперативные задачи и необходимые ресурсы, которые будут задействованы для эффективного развития экспортной деятельности;

– организация экспорта продукции: в этой стадии создается структура и механизмы для осуществления экспортных операций. Это включает в себя вопросы логистики, обеспечения финансовой поддержки на этапе выхода на рынок, а также разработку маркетинговых стратегий, направленных на продвижение товаров за границей;

– координация экспорта продукции: этот этап охватывает обеспечение взаимодействия между различными участниками экспортной деятельности - производителями, посредниками и государственными органами;

– мониторинг экспортной деятельности: на этом этапе осуществляется оценка эффективности экспортных операций. Мониторинг включает в себя сбор и анализ данных о результатах экспортной деятельности, что позволяет выявить успешные практики, а также области, требующие улучшения [1].

Важно отметить, что формирование, развитие и управление экспортным потенциалом зависят от различных факторов, которые можно разделить на внешние и внутренние.

Внешние факторы – это факторы, находящиеся вне контроля конкретных предприятий и связанных с ними субъектов. К ним относятся такие элементы, как глобальные экономические условия, состояние международной торговли, внешнеэкономические политики других стран, изменения в спросе на продукцию на международных рынках, а также различные политические и юридические риски.

Внутренние факторы – это факторы, которые предприятия способны контролировать и на которые могут влиять. Внутренние факторы включают производственные возможности, инновационный потенциал, уровень подготовки кадров, квалификацию менеджмента, финансовые ресурсы и организационные структуры [1].

Таким образом, экспортный потенциал представляет собой важный элемент экономической системы страны и играет ключевую роль в обеспечении сбалансированного и устойчивого экономического роста всех субъектов хозяйствования.

2 Экспортный потенциал ОАО «Гомсельмаш»

В условиях неопределенности и динамичности внешней среды организации вынуждены постоянно анализировать угрозы и возможности развития, прогнозировать рыночную ситуацию, выбирать и корректировать цели деятельности и способы их реализации. Гибкость в управлении, способность быстро перестраиваться, не упускать новые возможности, открываемые рынком и нововведениями, умение видеть перспективы развития – все это в настоящее время становится главным условием укрепления конкурентоспособности организации. Ориентация на потребительский спрос, проведение маневренной научно-технической инновационной политики – основные принципы управления развитием организаций [2].

С учетом изменения внешних факторов разрабатывается новая стратегия продаж на основе диверсификации рынков, которая должна найти отражение в стратегии развития ОАО «Гомсельмаш» до 2030 года.

Основными направлениями новой стратегии продаж ОАО «Гомсельмаш» являются:

наращивание продаж по следующим направлениям:

на рынки стран СНГ (Казахстан, Кыргызстан, Узбекистан, Таджикистан);

в африканский регион (Зимбабве, Того);

в страны Латинской Америки (Аргентина);

освоение новых рынков (перспективы поставок в страны «дальней дуги», а именно в Иран, Монголию, Нигерию, Гану);

создание новых совместных производств в РФ;

реализация программы по наращиванию поставок запасных частей, как через собственную товаропроводящую сеть, так и посредством внедрения объединенной автоматизированной системы обеспечения запасными частями ОАО «Гомсельмаш» по всему миру (позволит осуществлять в режиме реального времени управление запасами запасных частей на складах всех действующих дилеров).

Также стоит обратить внимание на проблемы в финансовой части. В РФ оказывается колоссальная государственная поддержка отрасли сельхозмашиностроения. В частности, отечественным производителям сельскохозяйственной техники предоставляются субсидии, которые направляются на возмещение стоимости приобретаемой техники в размере 10 %, 15 % в зависимости от региона, при условии соответствия производителей требованиям Постановления Правительства РФ от 27.12.2012 № 1432 «Об утверждении Правил предоставления субсидий производителям сельскохозяйственной техники». При покупке сельхозтехники, соответствующей требованиям Постановления Правительства РФ от 17.07.2015 года № 719 «О подтверждении производства промышленной продукции на территории Российской Федерации», производителям сельхозпродукции в регионах оказывается поддержка в виде льготных кредитов, а также льготного лизинга.

Действующие на территории РФ меры господдержки ограничивают производителей сельскохозяйственной продукции в выборе поставщиков сельскохозяйственной техники. В таких условиях конкурировать с российскими производителями на равных условиях белорусские производители сельскохозяйственной техники не имеют возможности.

С октября 2024 года Центральный Банк РФ повысил ключевую (базовую) процентную ставку, которая составила 21 %. На 1 октября 2025 г. процентная ставка составляет 17 %. Пропорционально росту процентной ставки наблюдается рост стоимости кредитных ресурсов для аграриев страны, а соответственно и потеря их привлекательности. Все это ведет к падению рентабельности сельскохозяйственных организаций и снижению их покупательской способности.

Указом Президента Республики Беларусь от 24 сентября 2009 г. №466 «О некоторых мерах по реализации товаров, произведенных в Республике Беларусь» закреплены величины компенсации со стороны государства в размере 3/4 ключевой ставки ЦБ РФ по лизинговым операциям и 2/3 ключевой ставки ЦБ РФ по кредитованию на приобретение белорусской сельскохозяйственной техники в РФ. Однако с учетом такого

стремительного роста ключевой ставки данная мера теряет свою былую эффективность, существенно снижая покупательскую способность аграриев. В этом случае решением проблемы может стать увеличение государственной поддержки со стороны Республики Беларусь до 100% компенсации ключевой ставки ЦБ РФ на операции лизинга и кредитования при покупке белорусской сельскохозяйственной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдокушин, Е.Ф. Международные экономические отношения : учеб. пособие / Е.Ф. Авдокушин. – М. : Маркетинг, 2015. – 267 с.

2. Баскакова, О. В. Экономика предприятия (организации) : учебник / О.В. Баскакова, Л.Ф. Сейко. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2013. – 372 с.

3. Дегтярева, О.И. Внешнеэкономическая деятельность: учебное пособие / О. И. Дегтярева, Т. Н. Полянова, С. В. Саркисов. – 3-е изд. – М. : Дело, 2014. – 315 с.

УДК 631.35

АКТИВАТОР ОБМОЛОТА НОВОГО ОБРАЗЦА

Ж.С. Садыков, Б.К. Кокебаев, А.А. Родин,
Е.Д. Макашева, С.А. Болотников, А.И. Ондасын
НАО «Казахский Национальный Аграрный Исследовательский университет», ТОО «Активатор обмолота»,
г. Алматы, Республика Казахстан

1. Введение

Рынок зерноуборочной техники на глобальном уровне демонстрирует устойчивый рост благодаря росту механизации и необходимости повышения эффективности сельского хозяйства. По оценкам, мировой рынок комбайнов в 2023 г. достиг около $47,6 млрд с перспективой роста ~4,7% в год.

Основными драйверами спроса являются технологические улучшения и растущая потребность в продуктах питания. Однако спрос на конкретные технологии повышения эффективности обмолота может существенно различаться по регионам. Рассмотрим четыре ключевых макрорегиона: СНГ, Азия, Европа и США, их особенности и потребности в подобном продукте.

2.1. Предпосылки и средства решения проблемы

Методы исследований: лабораторно-полевые; информационно-аналитические.

СНГ включает крупные аграрные страны с высоким производством зерна, такие как Россия, Казахстан, Украина, Беларусь и др. В этих странах парк зерноуборочных комбайнов велик, но значительная его часть – морально и физически устаревшая техника. Только в России насчитывается порядка 127 тыс. зерноуборочных комбайнов (на 2024 г.), и при этом ощущается дефицит примерно 34–37 тыс. единиц для полного удовлетворения потребностей аграриев. Многие хозяйства эксплуатируют комбайны старых моделей, у которых уровень потерь зерна при обмолоте сравнительно высок. Согласно нормативам в Беларуси, например, суммарные потери зерна за молотилкой не должны превышать 1,5%, однако на практике потери зачастую больше, особенно на изношенной технике. Актуальность активатора обмолота в СНГ очень высокая. Его установка на имеющиеся комбайны способна сократить потери зерна и увеличить пропускную способность без закупки нового комбайна. Исследования, проведенные в Беларуси, подтверждают эффективность такого подхода: разработаны пружинно-пальцевые активаторы соломотряса, которые являются одним из самых действенных способов уменьшить потери зерна

на заключительной стадии сепарации. Экономические расчеты и испытания на серийном комбайне КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS12» (ОАО «Гомсельмаш») показали целесообразность применения подобных активаторов. Это свидетельствует о том, что производители сельхозтехники в регионе уже заинтересованы во внедрении подобных технологий. Кроме того, в странах СНГ наблюдается растущий интерес к модернизации парка техники. Несмотря на снижение доходов аграриев в последние годы, продажи новых комбайнов в РФ выросли на 8,9 % в 2023 году (до ~5,96 тыс. шт.) за счёт необходимости обновления техники. Доминирующее положение на рынке занимает российский производитель «Ростсельмаш», однако также активно растёт импорт комбайнов, в особенности поставки из Беларуси (комбайны «Гомсельмаш») и КНР. Это говорит о готовности рынка СНГ воспринимать новые технические решения, тем более если они сочетают эффективность с более доступной ценой. Таким образом, спрос в регионе СНГ на активаторы обмолота оценивается как высокий – особенно в России и Казахстане, где большие площади уборки и остро стоит задача снижения потерь. Ключевыми факторами спроса здесь являются стремление повысить урожайность без увеличения посевных площадей, а также государственная поддержка технологий, повышающих продовольственную безопасность.

2.2. Решение поставленной задачи

Активатор обмолота зерна с повышенной эффективностью на 20% – это инновационное устройство, предназначенное для установки на зерноуборочные комбайны с целью улучшения процесса обмолота и сепарации зерна (рис. 1. Активаторы обмолота для разной урожайной массы). Активатор обмолота повышает эффективность выделения зерна из соломистого вороха примерно на 20 %, что ведет к снижению потерь урожая и увеличению производительности уборки. Применение активатора позволяет также частично снизить нагрузку на основные узлы комбайна и экономить топливо за счет более эффективного процесса обмолота (по оценкам – экономия ГСМ до 15 % при уборке). В результате фермеры и агрохозяйства могут получить больший выход зерна без необходимости приобретения дополнительной комбайновой техники. Ниже представлен комплексный анализ рынка для данного продукта, включающий оценку рыночного спроса по ключевым регионам, обзор конкурентов, определение целевой аудитории, каналы сбыта и стратегию выхода на рынки.

Маркетинговый анализ показал, что активатор обмолота зерна с увеличением эффективности на 20 % имеет существенный рыночный потенциал в разных регионах мира, особенно в странах с большой потребностью в повышении урожайности и ограниченными возможностями для покупки новых комбайнов. При правильной стратегии вывода на рынок – через демонстрацию преимуществ, локальные партнёрства и поэтапное масштабирование – данный продукт способен занять свою нишу и внести

вклад в решение проблемы потерь зерна при уборке. Главными факторами успеха станут доказанная эффективность в полевых условиях, экономическая выгода для клиентов и выстраивание доверия через сотрудничество с отраслевым сообществом. Такой подход позволит активатору обмолота успешно закрепиться на рынке и стать востребованным инструментом для аграриев в разных частях света.

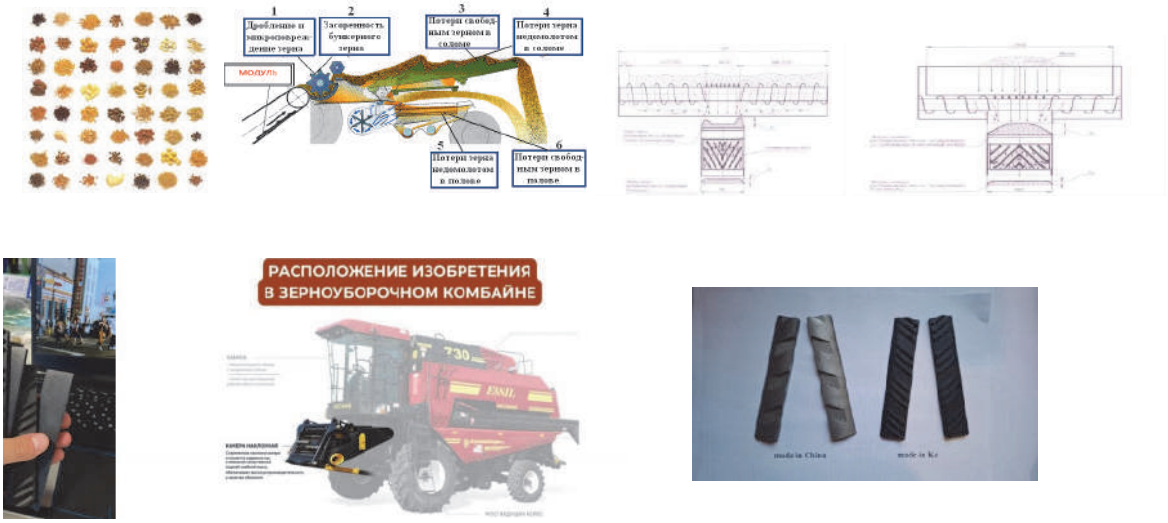


Рис. 1 – Активаторы обмолота для разной урожайной массы
Примечание – составлено авторами на основе источника [1-4]

2.3 Результаты и обсуждение

В сезон уборки урожая 2025 года нами проведены полевые испытания активаторов обмолота нового образца для разной урожайной массы (низкоурожайной - пшеницы; высокоурожайного - риса) при этом установлено, что он обеспечивает разгрузку молотильного аппарата, и предположительно, преобразование слоя скошенной зерновой массы в равномерный поток до молотилки - забиваний МСУ не обеспечено, а также дообмолотное выделение наиболее биологически ценного зерна, которое «теряется» при обмолоте комбайном без активатора обмолота. Все это обеспечивает ожидаемый экономический эффект на уборке пшеницы и риса (рис. 2. Апробация активатора обмолота на низкоурожайной массе; рис. 3. Апробация активатора обмолота на высокоурожайной массе). Технология обеспечивает эффективное смещение, разравнивание зерновой массы и исключение за счет этого количественных и качественных потерь зерна.

Несоответствий конструкции испытуемого образца активатора обмолота требованиям ССБТ не установлено, эксплуатация его безопасно. Необходимо продолжить испытания нового образца активаторов обмолота в 2026 году по зонам и на преобладающих культурах, выращиваемых в Казахстане.

Рис. 2 – Апробация активатора обмолота на низкоурожайной массе (уборка пшеницы в Илийском районе Алматинской обл.)
Примечание – составлено авторами на основе источника [1-4]

Рис. 3 – Апробация активатора обмолота на высокоурожайной массе (уборка риса в Каратальском районе области Жетiсу)
Примечание – составлено авторами на основе источника [1-4]

Преимущества использования инновационного активатора обмолота [1-4]:

– обеспечивает наименьшие потери продуктивной части выращенного урожая;

– удобен в эксплуатации; обеспечивает сменяемость активных элементов; снижает металлоемкость, улучшает и ускоряет ремонт техники;

– простота конструкции, универсальность (зерновые, масличные и кормовые культуры); низкие затраты, благодаря моделированию модуль-распределителя биомасс и последующей 3D печати;

– моделирования с распечаткой набора устройств-модулей, упакованных в кейс для его производства и продажи, используются для

обучения в учебных заведениях, для упрочения взаимосвязи науки, инженерного образования и бизнеса;

– снизить опасность технологической зависимости отечественной промышленности от зарубежных разработок;

– улучшение работы уборочной техники;

– есть возможность дальнейшего улучшения производительности;

–соответствие международным стандартам качества;

– может быть использовано для различных агроклиматических зон и полей разной урожайности;

– совместимость с любым зерноуборочным комбайном пропускной способностью от 3-х до 15 кг/с и жатками с шириной захвата до 8 метров и выше;

– за счет ее применения можно добиться уменьшения слоя биомассы в барабане, увеличения пропускной способности и снижения энергопотребления комбайна.

2.4 Заключение

Подтверждены результаты ранее проведенных исследований по активатором обмолота первого образца. По результатам полевых испытаний активаторов обмолота нового образца для разной урожайной массы (низкоурожайной - пшеницы и высокоурожайного - риса) установлено, что он обеспечивает разгрузку молотильного аппарата, и предположительно, преобразование слоя скошенной зерновой массы в равномерный поток до молотилки - забиваний МСУ не обеспечено, а также дообмолотное выделение наиболее биологически ценного зерна, которое «теряется» при обмолоте комбайном без активатора обмолота. Все это обеспечивает ожидаемый экономический эффект на уборке пшеницы и риса.

Несоответствий конструкции испытуемого образца активатора обмолота требованиям ССБТ не установлено, эксплуатация его безопасно.

Необходимо продолжить испытания нового образца активаторов обмолота в 2026 году по зонам и на преобладающих культурах, выращиваемых в Казахстане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садыков Ж.С. и др. Инновационные методы сбора биологически ценного зерна //Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: Сб. докл. межд. науч. – практ. конф.- Гомель: НТЦК ОАО «Гомсельмаш» РБ, 2023. ISBN 978-985-6477-56-3.

2. Садыков Ж.С. и др. Евразийский патент № 044624. Способ обработки скошенной зерновой массы в уборочной машине и устройство для его осуществления.

3. Садыков Ж.С. и др. Устройство для обработки скошенной зерновой массы в уборочной машине //Положительное решение ФЭ НИИС по заявке №2025/0399.1.

4. Садыков Ж.С. и др. Устройство для обработки скошенной зерновой массы в уборочной машине //Положительное решение ФЭ ЕАПВ по заявке №202592041.

УДК. 778.64

МНОГОРАЗОВЫЕ 3D-ПЕЧАТНЫЕ КАПСУЛЫ КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСЕВА И ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ

Д.Г. Асонов, Е.В. Мищенко
Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, г. Орёл, Россия

Аннотация. Статья посвящена исследованию возможностей формообразования микроканалов минимального диаметра в многоразовых 3D-печатных капсулах, предназначенных для применения в системах автоматизированного посева и выращивания растений. Авторами экспериментально определены предельные условия получения микроканала наименьшего возможного диаметра с использованием стандартного FDM-принтера с кинематикой Makerbot, а также рациональных типовых параметров печати для выбранного филамента. Методика включает серию воспроизводимых опытов с последующим оптическим и микроскопическим анализом образцов и статистической обработкой полученных данных. Результаты ориентированы на практическое применение при проектировании функциональных агротехнических изделий для различных устройств и условий эксплуатации.

Введение. Современное сельскохозяйственное машиностроение характеризуется интенсивной интеграцией аддитивных технологий, обусловленной необходимостью индивидуализации конструктивных решений и оптимизации использования ресурсов. Особое место занимают многоразовые 3D-печатные капсулы, выступающие инновационным элементом систем автоматизированного посева и выращивания растений. Капсулы обеспечивают селективное распределение влаги, создание благоприятных микроклиматических условий, а также возможность интеграции дополнительных технологических функций. Одним из критических параметров конструкции капсулы является минимально достижимый диаметр микроканала – ключевого элемента системы локального водоснабжения растений. Исторический анализ развития агротехнических средств демонстрирует переход от пассивных структур, таких как торфяные горшочки и таблетки, к интегрированным активным элементам на основе управляемой гидроёмкости и структурной адаптивности, что подробно рассмотрено, в частности, в работах, посвящённых гидрогелевым носителям [4] и микропористым керамическим материалам [6]. Применение 3D-печати для этих задач позволило перейти к концепции геометрической селективности, задаваемой на этапе проектирования цифровой модели изделия.

Объектом исследования является 3D-печатная многоразовая капсула [1], предназначенная для автономной доставки и дифференциального распределения влаги в корнеобитаемом слое почвы. Конструкция капсулы включает систему сквозных микроканалов различной длины и диаметра, обеспечивающих управляемое капиллярное снабжение растений водой [5]. В контексте настоящей работы ключевым объектом исследования является микроканал минимально достижимого диаметра, изготовляемый с использованием стандартного FDM-оборудования.

Цель исследования заключается в экспериментальном определении предельного диаметра микроканала, формируемого в процессе 3D-печати капсулы с использованием оборудования массового применения. Получение объективных технологических параметров необходимо для стандартизации производства, расширения области применения и обеспечения воспроизводимости результатов на различных конфигурациях.

Методология исследования включала изготовление серии идентичных по форме тестовых образцов с вариативными параметрами печати, что позволило стандартизировать процедуру исследования. Печать осуществлялась соплом диаметром 0,4 мм и одним из наиболее распространённых open-source слайсеров – Cura. Каждый образец проходил макро- и микроскопическое обследование на предмет целостности и измерение диаметра сформированных микроканалов. Результаты измерений подвергались статистической обработке с целью выявления зависимости между параметрами печати и достижимыми размерами микроканальных структур. Измерение размеров микроканалов осуществлялось с помощью микроскопа МБС-10; регистрация и калибровка изображений выполнялись с использованием счётной камеры Горяева, выступавшей в качестве мерной сетки при фотографировании и последующей обработке.

Современные методы создания микроканалов для аграрных и биотехнологических задач разнообразны и могут быть условно разделены на две основные группы. К традиционным технологическим подходам по контролю микросреды семени и корней относят такие решения как капсулы и гранулы на основе биополимеров с добавками влагоудерживающих агентов (гелей, диатомита) и/или пористых наполнителей [4, 6]; физико-химическую микрокапсуляцию с формированием случайно распределённых микропор; смеси гидрогелей и сорбентов для регулирования водоудержания (гидрогелевые контейнеры, агроперлит и др.). Однако перечисленные методы не позволяют гибко формировать заданные размеры микроканалов с высокой повторяемостью и топологической сложностью, что ограничивает их применимость для точного управления распределением воды и воздуха в зоне семени.

Среди инновационных подходов в данной области особое место занимают аддитивные технологии. Современные 3D-печатные методы включают:

– FDM/FFF-печать как наиболее доступный и массовый способ создания сложных геометрий, применяемый как в микроэлектромеханических системах, так и в сельском хозяйстве;

– SLA/DLP-печать, обеспечивающую высокую точность формирования каналов (до десятков микрометров), но отличающуюся высокой стоимостью, необходимостью дополнительной очистки изделий и ограниченностью в выборе используемых материалов;

– SLS-печать, позволяющую получать детали со сложной, в том числе пористой, внутренней структурой, однако практически не обеспечивающую управляемого контроля формы и размеров микроканалов.

Практическая реализация задачи формирования микроканалов в условиях послойного наплавления сопряжена с рядом технологических ограничений. Ключевая проблема заключается в том, что стандартные параметры слайсеров априори ориентированы на обеспечение монолитности структуры и предотвращение образования внутренних пустот или дефектов спекания слоёв [3]. Это существенно затрудняет управляемое формирование сквозных или замкнутых каналов минимальных размеров без значимой потери механической прочности и целостности изделия.

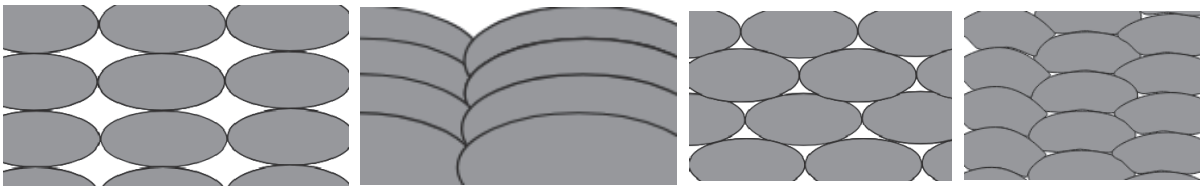
В связи с этим перед проведением эксперимента был осуществлён концептуальный анализ технологических факторов, влияющих на формирование экструдируемой нити и, как следствие, на геометрию микроканала. Были определены ключевые параметры, оказывающие максимальное влияние на достижимый диаметр каналов: высота слоя, скорость печати, температура экструдирования, коэффициент подачи, ориентация модели на рабочей платформе, а также интенсивность охлаждения печатаемой детали.

С целью получения объективных и сопоставимых данных исследование было сфокусировано на четырёх основных параметрах: коэффициент потока, ширина линии заполнения, высота слоя и ориентация печати. Каждый из указанных факторов последовательно варьировался в заданном диапазоне технологических значений, что позволило оценить их влияние на воспроизводимость формирования микроканалов минимального диаметра при сохранении структурной целостности базового фрагмента изделия.

Важным аспектом организации структуры микроканала является выбор режима наложения печатаемых дорожек: параллельное наложение либо наложение со смещением относительно предыдущего слоя. При использовании параллельного расположения (рис. 1, *а-б*), особенно на краевых значениях параметров печати, возникает риск недостаточного

спекания между соседними нитями, что может привести к снижению механической прочности и возникновению дефектов изделия. В противоположность этому, схема со смещением дорожек на половину ширины слоя (рис. 1, *в-г*) способствует более эффективному межслойному и междорожечному контакту за счёт перекрытия, повышая плотность структуры и прочность изделия.

Следует подчеркнуть, что включение микроканалов в структуру печатного изделия непосредственно влияет на его механическую прочность и устойчивость. В отличие от традиционной 3D-печати, где конструкция проектируется, исходя из необходимости монолитности и равномерного распределения нагрузок, образование внутренних каналов вызывает появление дополнительных концентраций напряжений и локальных зон пониженной прочности. Это существенно увеличивает требования к контролю параметров печати, обеспечению качества межслойного сцепления и оптимизации пространственной компоновки структуры.



а *б* *в* *г*

Рис. 1 – Варианты пространственного расположения дорожек:
а – расчётная схема параллельного размещения; *б* – фактическое расположение слоёв после печати при параллельном наложении;
в – расчётная схема размещения со смещением на 1/3 ширины слоя;
г – фактическое расположение слоёв после печати при смещённом наложении

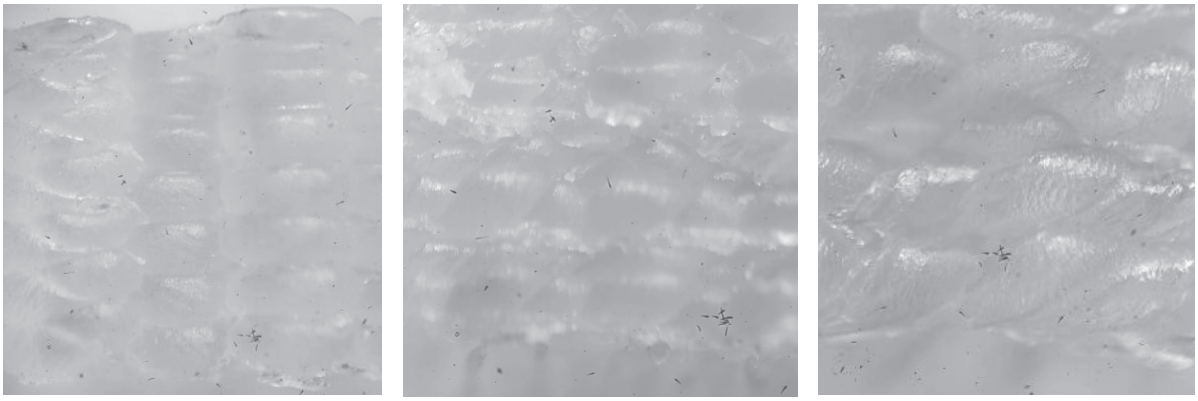
В ходе экспериментального исследования поэтапно варьировались и фиксировались основные параметры печати, влияющие на формирование протяжённых микроканалов минимального диаметра при сохранении механической прочности образцов. Для всех экспериментов применялись унифицированные настройки, соответствующие широкому спектру типового FDM-оборудования при использовании PETG-филамента и сопла диаметром 0,4 мм. Базовые технологические параметры включали: температуру рабочей платформы – 80 °C, температуру экструдера – 210 °C, скорость заполнения – 30 мм/с, скорость перемещений – 120 мм/с, плотность заполнения – 99 % (zigzag), интенсивность обдува – 100 %, функция коастинга активирована, ретракт – 3,0 мм при скорости 10 мм/с, рывок – 20 мм/с, ускорение печати – 1000 мм/с², ускорение перемещений – 1200 мм/с² [5].

На первом этапе экспериментальной серии варьировался коэффициент подачи потока (extrusion multiplier, flow rate). Было

установлено, что при значении ниже 50 % прочность структуры существенно снижается; при 35 % наблюдалось полное разрушение образца. С повышением коэффициента потока достигался стабильный результат, а оптимальное формирование микроканала наблюдалось при значении 65 % потока (рис. 2, *а*).

В ходе второго этапа анализировалась ширина линии заполнения. Образцы, напечатанные с шириной линии 0,4 мм, продемонстрировали оптимальное соотношение между прочностью и качеством наплавления (рис. 2, *б*).

На третьем этапе изучалась высота слоя, при которой достигается наилучший баланс между структурной устойчивостью и минимальным диаметром микроканала. Лучший результат был получен при высоте слоя 0,3 мм (рис. 2, *в*).



а *б* *в*

Рис. 2 – Наилучшие образцы по результатам этапов исследования:
а – основные параметры, поток 65 % (1.2);
б – основные параметры, ширина линии заполнения 0,4 мм (2.3);
в – основные параметры, высота слоя 0,3 мм (3.3)

В результате подбора рациональных технологических параметров был изготовлен финальный образец, структура которого включает серию микроканалов, геометрически представляющих собой ромбы со стороной 0,04 мм. Данная конфигурация подтверждена визуальными измерениями относительно сетки камеры Горяева (рис. 3), что позволило объективно оценить достигнутые размеры каналов и их воспроизводимость при стандартных условиях печати.

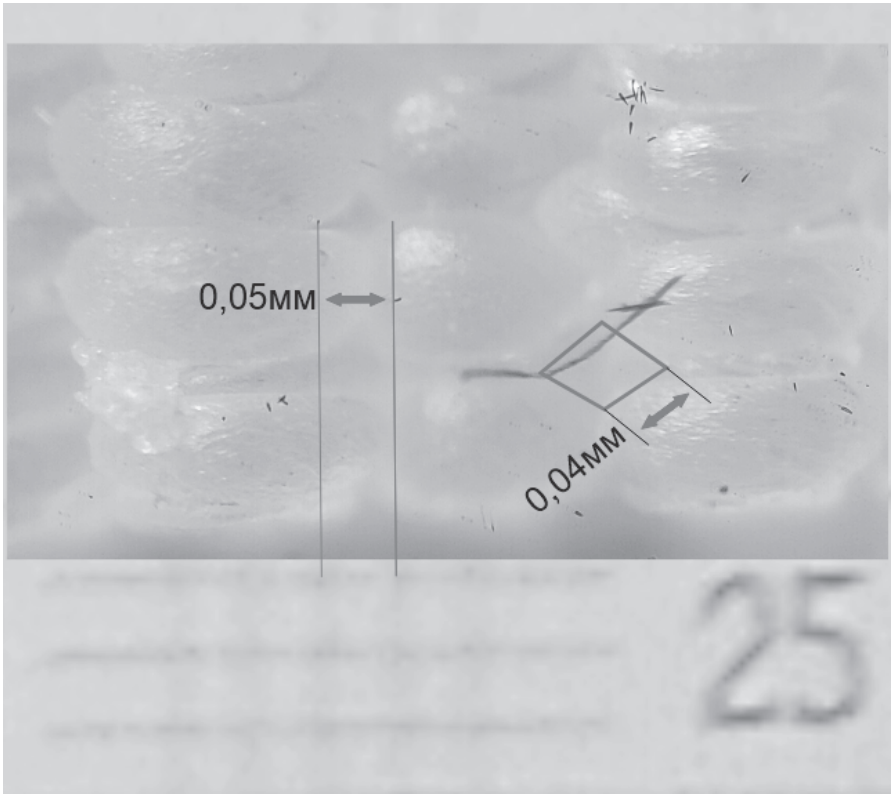


Рис. 3 – Морфология микроканала финального образца в сопоставлении с мерной сеткой камеры Горяева

Рассчитаем капиллярный подъём воды для получившегося микроканала, используя понятие «гидравлический радиус» *r* [2]:

$$h = \frac{2\sigma\cos\,\theta}{\rho g r}.$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости (0,0728 Н/м); θ –краевой угол смачивания (72,5°); ρ – плотность жидкости (1000 кг/м³); g – ускорение свободного падения; r – эффективный радиус капилляра (в данном случае – гидравлический радиус), м:

$$r = \frac{\text{Площадь поперечного сечения}}{\text{Периметр смачиваемой поверхности}} = \frac{a^2}{4a} = \frac{a}{4}.$$

При стороне квадрата $a = 0{,}05$ мм, получаем гидравлический радиус

$$r = \frac{0{,}00005}{4} = 0{,}0000125 \text{ (м)}.$$

$$h = \frac{2\times0{,}0728\times0{,}3}{1000\times9{,}81\times0{,}0000125} \approx 0{,}356 \text{ (м)} = 35{,}6 \text{ (см)}.$$

Анализ гидродинамических свойств микроканалов на основании расчёта гидравлического радиуса и капиллярного подъёма показал, что достигнутые размеры каналов обеспечивают значительное капиллярное перемещение жидкости (до 35,6 см), что существенно превышает типовые габаритные размеры сельскохозяйственных капсул (до 15 см). Эти данные свидетельствуют о технической возможности реализации необходимых капиллярных характеристик для автоматизированных систем полива и

водоснабжения растений на базе многоразовых аддитивно изготовленных капсул.

Таким образом, применение FDM-технологии с рациональными параметрами настройки позволяет формировать конструкционные микроканалы с размерами, достаточными для эффективного управления водой и питательными растворами в заданной агротехнической среде. Полученные результаты подтверждают технологическую состоятельность предлагаемого подхода и его применимость для создания как индивидуальных, так и серийных изделий для сельского хозяйства, соответствующих требованиям по влагообеспечению, а также критериям надёжности и функциональности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асонов Д.Г., Мищенко Е.В., В.В. Король 3D-печатные капсулы для удержания влаги в корневой зоне растений // Вестник техносферной безопасности и сельского развития. № 3 (42). 2025. – С. 28-34.

2. Гидравлика, гидрология, гидрометрия водотоков (раздел «Гидравлика»): пособие для обучающихся по специальностям 1-70 03 01 «Автомобильные дороги», 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены» / И.В. Качанов [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. – 179 с.

3. Мищенко, Е.В., Асонов, Д.Г., Король, В.В. Причины дефектов и проблем производства изделий методом FDM (FFF) 3D печати // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 2 (370). 2025. – С. 27-33.

4. Ревенко, В.Ю. Использование гидрогелей в растениеводстве / В.Ю. Ревенко, О.М. Агафонов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2018. – № 11-2. – С. 59-65.

5. Яцун, С.Ф., Мищенко, В.Я., Мищенко, Е.В. Исследование переноса жидкости через мембрану при различных типах воздействия // Хранение и переработка сельхозсырья. Издательство «Пищевая промышленность». № 5. 2011. – С. 10-11.

6. Capasso, I., Liguori, B., Verdolotti, L. et al. Process strategy to fabricate a hierarchical porosity gradient in diatomite-based foams by 3D printing // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – Article number 612. – URL: https://doi.org/10.1038/s41598-019-55582-0 (дата обращения: 04.10.2025).

УДК 004.925.84:[62-2:631.3]

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ПЕЧАТИ В ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

С.Н. Пивовар, С.В. Рогов
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь

Современное сельхозмашиностроение активно внедряет инновационные технологии, направленные на повышение эффективности, надёжности и ремонтопригодности техники. Одним из перспективных направлений стало использование аддитивных технологий (это метод создания трехмерных объектов, деталей путем послойного добавления материала), в частности 3D-печати, при изготовлении деталей и узлов сельскохозяйственных машин. Традиционные методы производства, основанные на механической обработке и литье, обладают высокой степенью отработанности, но зачастую требуют значительных затрат времени и ресурсов, особенно при создании сложных форм элементов или мелкосерийных партий.

Трёхмерная печать позволяет решать задачи, трудные для традиционных методов: изготавливать прототипы и функциональные элементы со сложной геометрией, сокращать объёмы производственных отходов и ускорять процесс восстановления деталей. Она упрощает производство комплектующих, снижает зависимость от длительных поставок и позволяет оперативно создавать редкие или снятые с производства запчасти, что особенно важно для аграрного сектора.

Традиционные методы производства часто требуют дорогостоящей оснастки, пресс-форм и производственных линий. Однако при использовании 3D-печати необходимость в этих дорогостоящих процессах отпадает: компоненты могут быть напечатаны непосредственно по цифровым проектам, что экономит время и деньги, делая этот метод привлекательным для мелкосерийного или индивидуального производства.

Классические подходы включают механическую обработку — токарную, фрезерную, шлифовальную, а также литьё, ковку и сварку. Эти методы требуют предварительного изготовления оснастки, значительных затрат времени на подготовку производства и часто сопровождаются высоким уровнем отходов. Кроме того, создание сложных геометрических форм может быть затруднено или вовсе невозможно без дополнительных операций, что увеличивает себестоимость и сроки изготовления. В условиях, когда необходима высокая точность, надёжность и индивидуальный подход к конструкции, традиционные технологии не всегда позволяют быстро адаптироваться к новым требованиям. Именно

здесь 3D-печать демонстрирует свои преимущества, предлагая гибкость, экономичность и ускорение производственных процессов.

3D-печать предоставляет возможность точной настройки производственных процессов. Это упрощает адаптацию узлов и деталей под конкретные сельскохозяйственные задачи: от корректировки существующей геометрии до разработки принципиально новых компонентов, что обеспечивает уровень гибкости и индивидуализации.

Стоимость изделий зависит от применяемого материала. На сегодняшний день наибольшую цену обычно имеют металлические детали из-за дорогого оборудования и сырья. Высокая стоимость таких изделий в большей степени обусловлена применением дорогостоящего оборудования и материалов. Но 3D-принтеры, работающие с полимерными материалами, позволяют получить продукцию с достаточно низкой себестоимостью, что делает их на сегодняшний день наиболее доступными и распространенными. Для 3D-принтера нет ограничений в воспроизведении деталей по форме, точности и сложности. Применение данной технологии значительно сокращает расход материала и время производства.

В сфере сельхозмашиностроении технологии трёхмерной печати открывают новые возможности, позволяющие решать разные задачи быстро, эффективно и качественно:

- быстрое проектирование и выпуск прототипов, компонентов и узлов
- разработка, внедрение новых конструктивных решений и элементов;
- восстановление, ремонт или замена вышедших из строя деталей [1].

Развитие аддитивных технологий, в том числе 3D-печати, стало ответом на существующие ограничения традиционных способов обработки материалов. В области сельскохозяйственного машиностроения особое внимание уделяется выбору метода печати и материалов, обеспечивающих высокую механическую прочность, износостойкость и устойчивость к агрессивным средам.

Основные методы, применяемых в сельхозмашиностроении:

FDM (Fused Deposition Modeling) — суть метода заключается в послойном наплавлении материала, подаваемого в виде пластиковой нити. В станкостроении используется преимущественно на этапе проектирования и тестирования

SLS (Selective Laser Sintering) — лазерное спекание полимерных порошков. Позволяет получать прочные и износостойкие элементы без необходимости в поддерживающих структурах.

SLM (Selective Laser Melting) и DMLS (Direct Metal Laser Sintering) — технологии, ориентированные на работу с металлическими порошками. Они обеспечивают высокую точность и прочность, что делает их особенно востребованными при производстве рабочих узлов сельскохозяйственной техники, таких как рамы, кронштейны, корпуса редукторов, крепёжные и износостойкие элементы рабочих органов машин.

Выбор материала также играет ключевую роль. В зависимости от требований к прочности, термостойкости и износостойкости применяются:

- Полимеры — применяются для изготовления элементов, не подверженных высоким нагрузкам, например, защитных кожухов, ручек, панелей управления.
- Металлы — алюминий, титан, сталь для несущих конструкций, соединительных узлов и других ответственных компонентов.
- Композиты — сочетают лёгкость и прочность, подходят для подвижных частей [2].

3D-печать в сельхозмашиностроении сегодня используется для создания опытных образцов, функциональных деталей и оперативной замены комплектующих. Однако её широкое внедрение ограничено высокой стоимостью, длительностью изготовления крупных элементов и необходимостью постобработки.

В сельхозмашиностроении 3D-печать чаще всего применяется для:

- проверки конструкции и эргономики узлов машин;
- выпуска сложной оснастки и крепёжных элементов;
- производства редких или снятых с производства запчастей;
- изготовления элементов систем подачи, охлаждения, воздуховодов и защитных кожухов;
- ремонта техники непосредственно в фермерских хозяйствах или сервисных центрах.

Одновременно с преимуществами проявляются и ограничения. Основным барьером, препятствующим широкому распространению 3D-печати, является высокая стоимость оборудования и расходных материалов, а также:

- Ограничения по размерам и времени печати — крупные детали печатаются долго и часто требуют разделения на сборочные узлы, что добавляет операции и снижает преимущества по срокам.
- Поверхностная отделка и допуски — результаты печати нередко нуждаются в постобработке (шлифовка, термообработка, механическая обработка посадочных мест) для достижения требуемой точности и

шероховатости, что существенно увеличивает время изготовления детали и её себестоимость.

- Процессный риск и повторяемость — качество партии может зависеть от параметров печати, состояния порошка и профиля термообработки. Для снижения рисков необходим строгий контроль и стандартизация печати.

Учет этих ограничений позволяет выстроить грамотную комбинированную стратегию: использовать 3D-печать там, где она даёт принципиальное преимущество (сложная геометрия, мелкие серии, ремонт), а в случаях с большими размерами, строгими допусками или низкой стоимостью материала — по-прежнему опираться на традиционную мехобработку и литьё.

Согласно анализу статистических данных, проведённому на основе результатов деятельности лаборатории аддитивных технологий за 2018–2023 гг., востребованность всех видов работ цикла аддитивного производства становится более сбалансированной. Если в 2018 г. соотношение составляло: 3D-печать – 35 %, проектирование – 35 %, сканирование – 27 %, литьё – 3 %, то к 2023 г. структура изменилась: 3D-печать – 20 %, проектирование – 30 %, сканирование – 31 %, литьё – 19 %.

По результатам анализа наблюдается существенное изменение структуры спроса на различные виды работ, входящие в цикл аддитивного производства. Если в 2018 году доминировали процессы 3D-печати и проектирования (по 35 %), а доля литья составляла лишь 3 %, то к 2023 году распределение стало более равномерным. Доля 3D-печати снизилась до 20 %, при этом возросла значимость этапов сканирования (с 27 % до 31 %) и литья (с 3 % до 19 %). Это свидетельствует о постепенном переходе отрасли от узкоспециализированного применения 3D-печати к комплексному использованию всего цикла аддитивных технологий. Подобная динамика отражает стремление предприятий сельхозмашиностроения к интеграции цифровых методов проектирования, точного воспроизведения геометрии деталей и комбинирования традиционных и аддитивных процессов для повышения эффективности и качества выпускаемой техники.

Дальнейшее развитие 3D-технологий для сельхозмашиностроения связано с повышением скорости печати, увеличением рабочего объёма принтеров, расширением ассортимента порошковых и композитных материалов, а также разработкой стандартов сертификации. Всё это позволит внедрять 3D-печать в серийное производство узлов, работающих под нагрузкой, и повысит устойчивость агропромышленного сектора к перебоям поставок [3].

В заключение можно отметить, что 3D-печать становится важным инструментом для сельхозмашиностроения, позволяя ускорять

проектирование, улучшать конструктивные решения и оперативно обеспечивать ремонтопригодность техники. По мере удешевления оборудования и стандартизации процессов аддитивные технологии будут всё чаще использоваться не только в опытных лабораториях, но и на заводах по производству сельскохозяйственных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмяшкин Е.А. Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники / П.В. Сенин, М.Н. Чаткин, Е.А. Кильмяшкин. — Саранск: МГУ, 2024. — С. 586–591.

2. Шкуро А.Е. Технологии и материалы 3D-печати: учеб. пособие / А.Е. Шкуро. — Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. — С. 97–98.

3. Коряков А.Е. Применение 3D-печати в машиностроении: эффективность, история и тенденции развития / А.Е. Коряков. — Минск: БНТУ, 2022. — С. 100–102.

УДК 621.791.92

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬХОЗМАШИН НАПЛАВЛЕНИЕМ СВЕРХПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Д.Д. Белебнёва, С.В. Рогов
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь

В сельхозмашиностроении применяется большое количество различной техники машин и механизмов от надежности и производительности которых зависит сельскохозяйственное производство. Выход из строя отдельных узлов и деталей, приводят к простоям машины и к значительным потерям, особенно в периоды посевной и уборочной кампаний. Сроки ремонта и его стоимость, определяются наличием и ценой запасных частей. Их отсутствие увеличивает время ремонта повышая тем самым себестоимость сельскохозяйственных работ. Применение новых технологий восстановления деталей позволяет существенно сократить время и затраты на ремонт. В современном сельхозмашиностроении все чаще используются предъявляет повышенные требования к и ремонтным технологиям изделий из сверхпрочных материалов, позволяющие увеличить долговечность работы машины. Традиционные методы сварки и пайки не всегда обеспечивают необходимый уровень прочности и долговечности, что стимулирует разработку новых технологических решений.

Одним из таких решений является метод наплавки с использованием композитных присадочных порошков, позволяющий сочетать преимущества твёрдого припоя (порошков) и высокотемпературных сварочных материалов, например: сплав Никеля (Ni) и Хрома (Cr) – нихромы (Х20Н80, NiCr80/20), никелевые сплавы с Cr, Fe, Mo – инконели (Inconel 625, Inconel 718, Inconel 738), кобальтовые сплавы – стеллиты (Stellite 6, Stellite 12), тугоплавкие сплавы на основе железа и никеля (ЭП617, ЭИ868, ЭП718), тугоплавкие металлы и их сплавы – Молибден (Mo), Вольфрам (W), Тантал (Ta), Ниобий (Nb) и порошковые материалы для наплавки (ПГ-СР2, ПГ-ХН80МТЮ, ПН-80НХ20, ПГ-КХН65ВТМЮ), что способствует формированию пространственной дендритной решётки и эвтектической матрицы. Отмечена способность структуры к самозалечиванию трещин в процессе последующей термообработки, а также снижение остаточных напряжений в сварных соединениях. Подчёркивается возможность получения прочных, устойчивых к окислению швов без необходимости предварительного подогрева.

Сущность метод заключается в том, что для достижения необходимого результата первоначально нужно нанести на основной

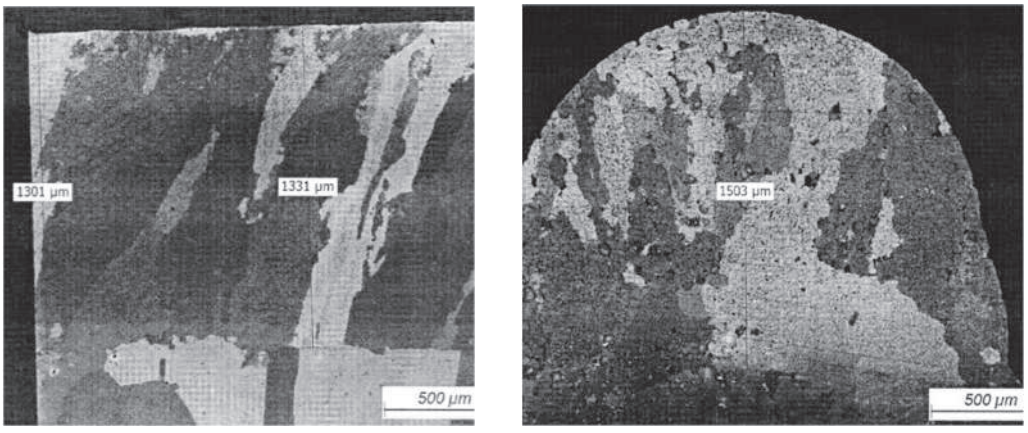
материал присадочный порошок (композитный), который содержит от 50 до 95% сварочного порошка (высокотемпературного) и от 5 до 50% порошка твердого припоя. Не мало важно следить за тем, чтобы нагрев присадки и основного металла с использованием сварочного источника тепла происходил локально и одновременно.

Следующий этап, это достижение полного расплавления припоя и частичного или полного перехода основного материала вместе с высокотемпературным сварочным порошком в жидкое состояние, образовывая сварочную ванну, однородность которой зависит от выбранных параметров.

В процессе, когда образованная нагревом сварочная ванна переходит на этап охлаждения и кристаллизации, начинает образовываться неоднородный наплавленный валик, включающий протяжённую взаимосвязанную решётку из высокотемпературных дендритов и междендритную эвтектическую матрицу.

После чего следует плановая термообработка, выполняемой при температуре выше солидуса твердого припоя, но ниже температуры солидуса основного материала, при которой наплавленный валик частично расплавляется, что под действием капиллярных сил приводит к самозалечиванию трещин. При этом общая геометрия наплавленного валика сохраняется благодаря устойчивой дендритной решётке, сформированной из высокотемпературного сварочного порошка [1].

На рис. 1 приведена микрофотография поперечного (a) и продольного (b) разрезов наплавленных сварных швов Mar M247 - AWS A5.8 BNi-9, полученных на сплаве Inconel 738 с использованием микроплазменной сварки, после термообработки.



a b

Рис. 1 – Микрофотография поперечного (a) и продольного (b) разрезов наплавленных сварных швов Mar M247 - AWS A5.8 BNi-9, полученных на сплаве Inconel 738 с использованием микроплазменной сварки наплавлением, после термообработки.

Восстановленная поверхность, содержит исходный промышленный бездефектный основной материал с поврежденной областью, замененной композитным сварочным материалом, содержащим протяженную решетку из высокотемпературных дендритов, полученную во время кристаллизации сварочной ванны, и матрицу из твердого припоя, содержащего депрессанты температуры плавления [2].

В зависимости от требуемого размера наращиваемого шва с использованием нужного количества проходов подбирается температура таким образом, чтобы температура плавления высокотемпературного сварочного порошка была меньше температуры сварной ванны приблизительно в 1,20 раза, однако температура плавления твердого припоя должна превышать температуру ванны. Все это необходимо для обеспечения требуемого химического состава и микроструктуры сварных швов.

Преимущества метода:

- Снижение остаточных напряжений – по сравнению с традиционными методами сварки.
- Повышение стойкости к окислению – структура соединений демонстрирует более высокую коррозионную и термическую устойчивость.
- Высокие механические свойства – прочность и долговечность сварных соединений превышают показатели классических швов.
- Гибкость применения – этот метод обычно используется для соединения, восстановления размеров, ремонта корпусов, валов и других узлов[3].

Не маловажным преимуществом является то, что результат проделанной работы обладает устойчивостью к окислению, превышающую устойчивость основного материала.

Таким образом, предложенный способ наплавки сверхпрочных сплавов: позволяет формировать уникальную композитную структуру соединений, улучшает механические и эксплуатационные характеристики деталей, расширяет возможности ремонта и продления срока службы элементов двигателей, валов и других немаловажных узлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патон Б. Е. Сварка и родственные процессы. — М.: Машиностроение, 1974. — 560 с.

2. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1990. — 528 с.

3. Козырев Н. А., Белов В. Е. Металлургия сварки плавлением: Учеб. пособие. — Екатеринбург: УрФУ, 2015. — 412 с.

4. Мрочек Ж. А., Кожуро Л. М., Филонов И. П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин: Учеб. Пособие. – Минск, 2000. – 286 с.

УДК 621.791.927.55:621.81

ПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В СЕЛЬХОЗМАШИНОСТРОЕНИИ

В.Ю. Ксензова, С.В. Рогов
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь

Современные интенсивные темпы развития агропромышленного комплекса требуют постоянного совершенствования и повышения эффективности машинно-тракторного парка. В сельхозмашиностроении применяется большое количество различных машин и механизмов — тракторы, комбайны, сеялки, почвообрабатывающие и кормоуборочные агрегаты, — от надежности и производительности которых напрямую зависит ритмичность и результативность сельскохозяйственного производства.

Простои сельскохозяйственной техники из-за поломок и длительного ремонта приводят к значительным потерям, особенно в периоды посевной и уборочной кампаний, когда каждая минута работы на счету. Сроки ремонта и его стоимость, как правило, определяются наличием и ценой запасных частей. Отсутствие нужных деталей увеличивает время восстановления техники и повышает себестоимость сельскохозяйственных работ.

Одним из эффективных путей решения проблемы дефицита запасных частей является восстановление изношенных деталей сельскохозяйственных машин**.** Применение технологий восстановления позволяет существенно сократить затраты на ремонт, повысить коэффициент технической готовности машин и продлить срок их службы.

Выбор оптимального и универсального способа восстановления особенно важен в сельхозмашиностроении, где номенклатура деталей широка, а условия эксплуатации крайне разнообразны — от пылевых до влажных сред. Среди множества методов восстановления значительную долю занимают дуговые способы, обеспечивающие высокую производительность и качество наплавленного слоя.

В качестве наиболее универсального источника дугового нагрева можно использовать плазменную дугу, которая позволяет реализовать плазменную наплавку — перспективный метод восстановления деталей сельскохозяйственной техники. Применение плазменной наплавки дает возможность использовать порошковые наплавочные материалы, подбираемые с учетом конкретных условий работы деталей (абразивный износ, коррозия, ударные нагрузки и т.д.). Это позволяет формировать на

восстанавливаемых поверхностях требуемые физико-механические свойства при минимальном тепловом воздействии на основную деталь [1].

В общем объеме работ по восстановлению деталей на ремонтных предприятиях на долю наплавок различных видов приходится порядка 77%, электроконтактного припекания — 6%, гальванических способов — 5%, электромеханической обработки — 4%, заливки жидким металлом — 2%, восстановления полимерами — 4%, других способов — 5%

Сущность плазменной наплавки заключается в том, что дуга (ток переменный) горит между двумя неплавящимися электродами, или же (ток постоянный) — между одним из неплавящихся электродов и присадочным материалом. Высокотемпературная плазменная дуга используется для нанесения износостойких покрытий на рабочие поверхности новых деталей, например, клапанов двигателей. Возможность практического применения струи плазмы определяется ее эффективной тепловой мощностью, скоростью плазменного потока и распределением температуры в струе, которые, в свою очередь, зависят от конструкции сопла горелки, расхода газа и силы тока. Указанные параметры определяют также глубину проплавления, не превышающую 0,1—0,6 мм. Потери теплоты в ходе плазменной наплавки могут достигать 35% [2].

Наиболее оптимальное рабочее напряжение и температура плазменной струи обеспечиваются в среде аргона и других инертных газов. При наплавке методом прямой дуги по отношению к наплавляемой детали применяют сжатую дугу прямого или косвенного действия. В зону наплавки подаются различные присадочные материалы: проволока, две проволоки, порошок одновременно с проволокой, только порошок. Наплавка может производиться по слою крупнозернистого порошка, заранее насыпанного на поверхность; с подачей порошка в сварочную ванну из основного металла; с подачей порошка в плазменную струю, плавлением его в этой струе и переносом на поверхность изделия.

Рассмотрим принципиальную схему установки для плазменной наплавки на рисунке 1.1.

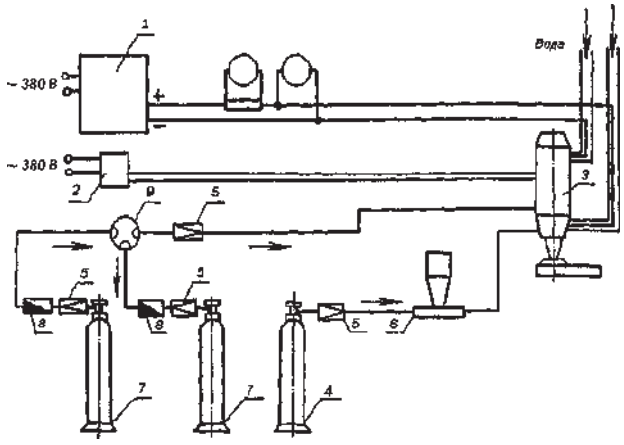


Рис. 1.1 – Принципиальная схема установки для плазменной

наплавки: 1 - основной источник тока; 2 - источник тока для возбуждения дуги; 3 - плазменная горелка; 4 - баллон с газом для транспортировки наплавочного порошка; 5 - газовый редуктор; 6 - дозатор; 7 - баллон с плазмообразующим газом; 8 - ротаметр; 9 - смеситель.

Плазменная наплавка обладает рядом преимуществ:

- Обеспечивается гладкая и ровная наплавленная поверхность, требующая минимального припуска на последующую механическую обработку (0,4-0,9 мм).
- Небольшая глубина проплавления (0,3-2,5 мм) и узкая зона термического влияния (3-6 мм) гарантируют, что доля основного металла в покрытии не более 5%.
- Малое тепловое воздействие на деталь позволяет сократить деформации и структурные изменения основного материала.
- Возможно формирование слоя толщиной от 0,2 до 6,5 мм и шириной от 1,2 до 45 мм. При использовании легкоплавких материалов можно добиться практически полного отсутствия оплавления поверхности, нанося покрытие на тончайшие поверхностные слои.
- Термический КПД плазменной наплавки в 2-3 раза выше, чем у электродуговых процессов, при производительности 0,4-5,5 кг/ч. В случае аустенитных нержавеющих сталей, производительность плазменно-порошковой наплавки сопоставима с электродуговой [3].

Плазменно-порошковая наплавка (ППН) – механизированный процесс, при котором источником теплоты служит сжатая дуга (плазма), а присадочным материалом – гранулированные металлические порошки, которые подаются в плазмотрон транспортирующим газом с помощью специального питателя.

На рисунке 1.2 отмечена схема плазменно-порошковой наплавки.

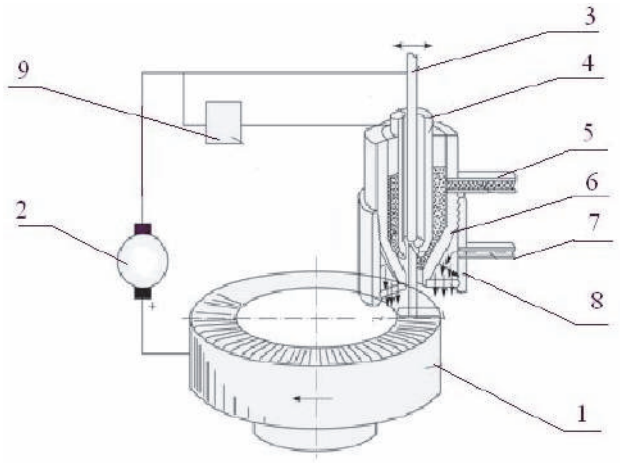


Рис. 1.2 – Схема плазменно-порошковой наплавки: 1 – изделие; 2 – источник питания плазменной дуги; 3 – вольфрамовый электрод;

4 – стабилизирующее сопло плазмотрона; 5 – ввод транспортирующего газа с порошком; 6 – фокусирующее сопло; 7 – ввод защитного газа; 8 – защитное сопло; 9 – устройство поджига дуги

Важной особенностью ППН является отличное формирование наплавленных валиков, стабильность и хорошая воспроизводимость их размеров.

Ключевые преимущества ППН, выявленные в ходе анализа:

- высокая производительность (до 10 кг/ч);
- высокое качество наплавленного металла;
- малая глубина проплавления основного металла (до 5 %);
- минимальные потери присадочного материала;
- возможность наплавки относительно тонких слоев (0,5…5,0 мм) [4].

Таким образом, плазменная наплавка занимает одно из ведущих мест среди современных технологий восстановления и упрочнения деталей машин. Благодаря высокой эффективности, широкому выбору применяемых порошковых материалов и высокой точности процесса данная технология позволяет надежно восстанавливать и повышать износостойкость самых разных деталей. Её применение в машиностроении особенно перспективно, так как оно способствует решению проблемы нехватки запасных частей, снижает затраты на ремонт и увеличивает срок службы оборудования за счёт придания рабочим поверхностям свойств коррозионной стойкости, жаропрочности и устойчивости к износу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курчаткин, В.В. Надёжность и ремонт машин / В.В. Курчаткин, Н.Ф. Тельнов, К.А. Ачкасов, - М.: Колос, 2000. - 776 с.

2. Мрочек, Ж.А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов, - Минск, 2000. – 267 с.

3. Ельцов, В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин / В.В. Ельцов, - Тольятти, 2015. – 335 с.

4. Киселёв, Ю. И., Гаврилов, Д. Н. Технологические особенности плазменно-порошковой наплавки сплавов на основе железа и никеля // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2020. – №9. – С. 59.

УДК 621.372:631.3

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Е.С. Садовников, С.В. Рогов
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь

Особенностью проблемы повышения надежности является ее связь со всеми этапами проектирования, изготовления и использования сельскохозяйственных машин, начиная с момента, когда формируется и обосновывается идея создания новой машины, и кончая принятием решения об ее списании.

Основные показатели надёжности – безотказность, долговечность, ремонтопригодность сельскохозяйственных машин. Методы повышения надёжности традиционно делят на три группы: конструктивные, технологические и эксплуатационные**.**

Конструктивные методы включают рациональные решения при проектировании: правильный выбор конструкции и материалов, закладывание запасов прочности (запаса ≈3), упрощение обслуживания и ремонта.

Технологические методы направлены на улучшение свойств материалов: применение закалки, термообработки, качественной сборки и нанесение защитных покрытий.

Эксплуатационные методы связаны с режимами работы и обслуживанием: соблюдение регламентов ТО, защита сельскохозяйственных машин от перегрузок.

Современные материалы открывают новые возможности повышения надёжности и долговечности деталей. Так, высокопрочные алюминиевые сплавы благодаря малой плотности и усиленному легированию дают эффект лёгкости при высокой прочности, а современные технологии легирования ещё больше улучшают их свойства. Наноматериалы и нанокомпозиты позволяют создавать покрытия и добавки, значительно повышающие износостойкость и уменьшающие трение в движущихся узлах. Применение новейших стальных сплавов повышенной прочности (третьего и последующих поколений) даёт существенный прирост ударостойкости и ресурса деталей в тяжёлых условиях работы. Кроме того, развиваются полимерные композитные материалы и высокопрочные пластики (например, для шин и уплотнений) с улучшенной жёсткостью, эластичностью и химической стойкостью.

Среди перспектив – «умные» материалы с самовосстанавливающимися поверхностями, изменяющими свойства под

нагрузкой. Внедрение этих инновационных материалов позволяет снизить массу и повысить ресурс машин без существенного удорожания их производства, что непосредственно отражается на надёжности конструкции.

Современные методы поверхностного упрочнения и обработки деталей:

1. Лазерная обработка (написание наплавкой или локальная закалка) обеспечивает формирование тонких упрочнённых слоёв с очень высокой твёрдостью. Лазерное упрочнение особенно эффективно для тонкостенных и труднообрабатываемых деталей: оно создаёт высокотвёрдые слои (до 67 HRC) при сохранении пластичного сердечника изделия, что повышает его ударостойкость и долговечность.

2. Ультразвуковая ударная обработка поверхности (ультразвуковое накатывание/напрессовка) вводит в приповерхностный слой высокие сжимающие остаточные напряжения. Такой метод значительно увеличивает плотность дислокаций, повышает твёрдость и дробит крупные зерна металла на фрагменты наноразмеров в глубине ~2–3 мкм. В результате упрочнённый слой получает улучшенную износостойкость и трещиностойкость. Кроме того, ультразвук снижает микронеровности поверхности, что дополнительно способствует долговечности узлов.

3. Плазменное упрочнение (напыление) представляет собой нанесение тонких функциональных покрытий (например, силиконсодержащих CVD-плёнок) на детали при атмосферном давлении. Такие покрытия формируют нанокомпозитный слой с повышенной жёсткостью и низким коэффициентом трения. Они обеспечивают высокую износостойкость, коррозионную и химическую инертность поверхности.

4. Криогенная обработка (прокаливание при сверхнизких температурах, ~–196 °C) – ещё один инновационный способ упрочнения. Холод способствует преобразованию остаточного аустенита в мартенсит и образованию дисперсных карбидов в структуре стали, что повышает твёрдость и износостойкость до 300 %. Например, криообработка инструментальных сталей увеличивает их твёрдость на 0,5–2,0 HRC и существенно продлевает срок службы режущего инструмента. Преимущество криогенного метода – однократный цикл обработки, сохраняющий свои эффекты на весь срок службы детали.

Современная цифровая революция открывает новые пути обеспечения надёжности через постоянный мониторинг и прогнозирование состояния сельскохозяйственных машин. Сегодня в сельскохозяйственной технике широко применяются телематические системы с датчиками температуры, давления, вибраций и других параметров. Анализ больших объёмов телеметрии с помощью ИИ-алгоритмов позволяет предсказывать

поломки до их фактического наступления, оптимизировать график техобслуживания и тем самым свести простои техники к минимуму.

Цифровой двойник агрегата сельскохозяйственной машины или рабочей операции позволяет моделировать различные сценарии нагрузки и износа без вывода оборудования из работы. По сути, это точная виртуальная копия детали или узла, позволяющая проводить детальный анализ и расчёт ресурса с учётом поступающих датчиков данных. В агросекторе цифровые двойники применяют для прогнозирования погодно-климатических рисков, но аналогичные технологии уже внедряются и для машин: имитационные модели на основе фактических данных оперативно показывают зоны наибольших напряжений и помогают планировать ремонтно-предупредительные меры.

Таким образом, комплекс инновационных технологий – от передовых материалов и обработок до цифровых систем мониторинга и оптимизированных конструкторских решений – способен существенно повысить надёжность деталей сельскохозяйственных машин. Новые высокопрочные сплавы и наноматериалы увеличивают долговечность конструкций, современные методы упрочнения позволяют создавать поверхностные слои с беспрецедентной износостойкостью. Цифровые технологии с телематикой и цифровыми двойниками обеспечивают раннее обнаружение дефектов и прогнозирование отказов. В совокупности эти инновации ведут к реальному снижению простоев, сокращению затрат на ремонт и повышению экономической эффективности агротехники. В итоге применение передовых технологий становится ключом к созданию более продуктивных, долговечных и экономичных сельскохозяйственных машин, что особенно важно в условиях растущих требований к урожайности и устойчивому развитию агросектора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метод повышения эксплуатационной надежности сложных сельскохозяйственных машин. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-povysheniya-ekspluatatsionnoy-nadezhnosti-slozhnyh-selskohozyaystvennyh-mashin. Дата доступа: 02.10.2025

2. Журавлёв, С.Ю. Основы надежности машин: учебное пособие. — Красноярск: ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», 2021. — 251 с.

3. Новиков И.И., Петров С.А. Современные конструкционные материалы для машиностроения: алюминиевые сплавы, нанокомпозиты и «умные» материалы // Наука и инновации. — 2020. — № 7. — С. 15–24.

4. Кирсанов А.А. Лазерная наплавка и упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. — 2019. — № 6. — С. 44–53.

5. Михайлов Е.П., Сидоров В.Н. Ультразвуковая обработка деталей из сталей и сплавов: структурные изменения и повышение износостойкости // Обработка металлов. — 2021. — № 2. — С. 50–59.

6. Смирнов Д.С. Плазменное упрочнение деталей сельхозмашин: теория и практика применения CVD-покрытий // Поверхностное инженерирование. — 2020. — Т. 18. — № 3. — С. 102–110.

7. Кузнецов А.Г. Криогенная обработка сталей и сплавов: повышение твёрдости и ресурса инструмента // Металловедение и термическая обработка. — 2018. — № 12. — С. 35–41.

8. Попов М.В. Цифровые двойники в агропромышленном комплексе: перспективы и ограничения // Агроинженерия. — 2022. — № 4. — С. 60–69.

УДК 621.43

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТНОГО КОНТУРА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЯ MMZ-2.5 DTI

А.В. Предко, Е.П. Тихонович
ОАО «УКХ «МИНСКИЙ МОТОРНЫЙ ЗАВОД»,
г. Минск, Республика Беларусь

При разработке новых двигателей и модернизации существующих конструкций возникает необходимость согласования параметров новых, вновь разрабатываемых элементов системы охлаждения (рубашки охлаждения) с уже имеющимися (водяной насос, радиатор, термостат). В данной работе представлены основные результаты расчета жидкостного контура системы охлаждения дизеля MMZ-2.5 DTI в транспортной (N_e = 100 кВт при n = 3000 мин$^{-1}$, g_e = 230 г/(кВт)) и генераторной (N_e = 43 кВт при n = 1500 мин$^{-1}$, g_e = 230 г/(кВт)) версий.

Требуемый расход охлаждающей жидкости через радиатор системы охлаждения определяется следующей зависимостью

$$V_{\text{ож}} = \frac{Q_{\text{со}}}{C_{\text{ож}} \cdot \Delta T_{\text{ож}} \cdot \rho_{\text{ож}}},$$

где $Q_{со}$ – тепловой поток, рассеиваемый радиатором системы охлаждения, Вт; $C_{ож}$ – теплоемкость охлаждающей жидкости (ОЖ), Дж/(кг·°С); $\Delta T_{ож}$ – перепад температуры охлаждающей жидкости; $\rho_{ож}$ – плотность охлаждающей жидкости.

В систему охлаждения встроен жидкостно-масляный теплообменник, поэтому в радиаторе системы охлаждения должна рассеиваться теплота, передающаяся из рубашек охлаждения блока и головки цилиндров, а также теплота из системы смазывания.

По данным из литературных источников в систему смазывания отводится 1,5 – 3 % от общего количества теплоты сгорания топлива [1], для случая с охлаждаемыми поршнями 4 – 6 % [2]. Удельное количество отводимой маслом теплоты для дизелей q = 230 – 520 кДж/(кВт·ч), при охлаждении маслом поршней количество теплоты дополнительно возрастает до 450 – 570 кДж/(кВт ч) [3].

Теплота сгорания топлива

$$Q_0 = \frac{G_t \cdot H_u}{3600},$$

где G_t – часовой расход топлива, кг/ч; H_u – низшая теплотворная способность дизельного топлива.

Тепловой поток, отводимый маслом системы смазывания:
- по источникам [1,2]

$$Q_{\text{м}}^{1,2} = 0.06 \cdot Q_{\text{о}};$$

- по источнику [3]

$$Q_{\text{м}}^{3} = \frac{q \cdot N_e}{3600} = \frac{550 \cdot N_e}{3600}.$$

Через рубашки охлаждения в систему отдается 0,16...0,25 [2], 13,2 %...19,2% [3] теплоты, выделившейся от сгорания топлива.

Тепловой поток от рубашки охлаждения

$$Q_{\text{ро}} = q_{\text{со}} \cdot Q_0 = 0.25 \cdot Q_0.$$

Суммарный тепловой поток в систему охлаждения

$$Q_{\text{со}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{ро}}.$$

В литературе [1] приводится зависимость для определения теплоты передаваемой охлаждающей среде для дизелей с наддувом

$$Q_{\text{в}} = \frac{\text{C} \cdot i \cdot D^{1+2m} n^{m}}{\alpha},$$

где C – коэффициент пропорциональности (для четырехтактных двигателей C = 0,45 – 0,53), принимаем C = 0,53; D – диаметр цилиндра, D = 8,7 см; m – показатель степени (для четырехтактных двигателей m = 0,6 – 0,7), принимаем m = 0,7; α – коэффициент избытка воздуха, для транспортного дизеля α = 1,6, α = 1,8.

Учитывая, что в рассматриваемую систему охлаждения включен жидкостно-масляный теплообменник параметр $Q_в$ может применяться и в наших расчетах.

Степень подогрева ОЖ в двигателе $\Delta T_{ож}$ = 6–8 ℃ [2], 6–12 ℃ [1], 5–10 ℃ [3], большие перепады температуры принимают для теплонагруженных двигателей. Следует учитывать, что с ростом средней температуры ОЖ растет экономичность двигателя. Температуры на входе и выходе из двигателя принимаем соответственно: $T_{ож\ вх}$ = 85 ℃ и $T_{ож\ вых}$ = 95 ℃, тогда

$$\Delta T_{\text{ож}} = T_{\text{ож вых}} - T_{\text{ож вх}} = 10\ ℃.$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

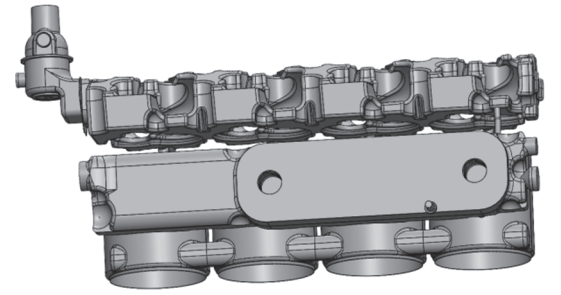
Табл. 1 – Результаты расчетов необходимых расходов ОЖ

n, мин$^{-1}$	N_e, кВт	G_t, кг/ч	$Q_м^{1,2}$, кВт	$Q_м^3$, кВт	$Q_{ро}$, кВт	$Q_{со}$, кВт	α	$Q_в$, кВт	$V_{ож}$, м^3/ч
3000	100	23,0	16,3	15,3	67,9	**84,2**	1,6	64,7	**8,60**
1500	43	9,5	6,7	6,6	28,0	34,7	1,8	**35,4**	**3,55**

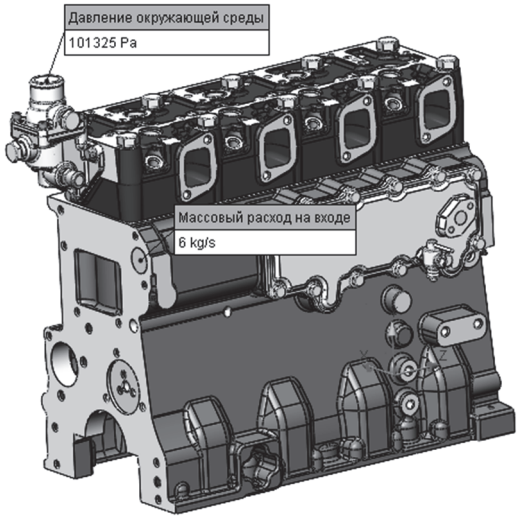
Определение расходных характеристик элементов жидкостного контура системы.

Расходная характеристика рубашки охлаждения строилась по расчетным точкам, полученным в результате моделирования течения охлаждающей жидкости.

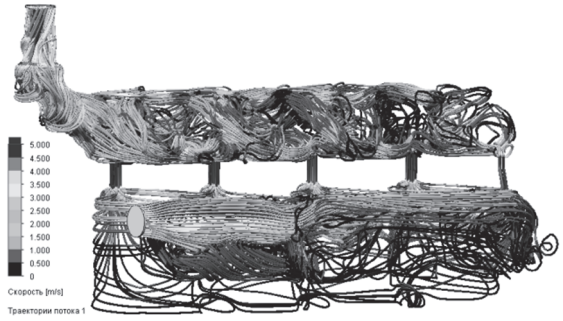
Общий вид проточной части контура системы охлаждения дизеля MMZ-2.5DTI показан на рис. 1а).



а)



б)



в)

Рис. 1 – Моделирования потоков ОЖ в рубашке охлаждения:
а) проточная часть, б) граничные условия на входном и выходном отверстиях, в) линии тока ОЖ при $G_{ож}$=2,5 кг/с.

В качестве начальных параметров задавались температуры и давлением охлаждающей жидкости во всем объеме контура: T_0 = 85 ºС, P_0 = 101325Па.

Задача решалась в адиабатной постановке, граничным условием на стенках контура принята шероховатость R_z = 50 мкм.

Для организации потока задавались граничными условиями на входном отверстии в блоке цилиндров и выходном отверстии в крышке корпуса термостата (рис. 1б).

На выходе условия окружающей среды $P_{вых}$ = 101325 Па и $T_{вых}$ = 85 ºС.

На входе задавались различными массовыми расходами $M_{вх}$ = 0,5 кг/с, 1,5 кг/с, 2,5 кг/с и температурой входящей жидкости $T_{вх}$ = 85 ºС.

Для количественной оценки используем параметры, характеризующие поток во входном и выходном отверстиях (табл. 2).

Табл. 2 – Результаты моделирования потоков ОЖ в рубашке охлаждения с термостатом

$M_{вх}$, кг/с	Вход		Выход		Результаты	
	$P_{вх}$, Па	$V_{вх}$, м^3/с	$P_{вых}$, Па	$V_{вых}$, м^3/с	$\Delta P_{рт}$, кПа	$Q_{рт}$, м^3/ч
0	101325.0	0	101325.0	0	0	0
0.5	106741.8	0.0005159	101325.0	0.0005159	5.42	1.86
1.5	149976.3	0.0015479	101325.0	0.0015479	48.65	5.57
2.5	237036.7	0.0025799	101325.0	0.0025800	135.71	9.29

Анализируя потери давления (напора) в жидкостном контуре системы охлаждения дизелей семейства Д-243(245) установлено, что до 30 – 35% их приходится на патрубок подведения охлаждающей жидкости к водяному насосу. Во избежание больших погрешностей отдельно учтем потери в подводящем патрубке водяного насоса 3LD-1307015-Б. Результаты моделирования потоков в подводящей трубе представлены в табл. 3.

Табл. 3 – Результаты моделирования потоков ОЖ в подводящем патрубке водяного насоса

$M_{вх}$, кг/с	Вход		Выход		Результаты	
	$P_{вх}$, Па	$V_{вх}$, м^3/с	$P_{вых}$, Па	$V_{вых}$, м^3/с	$\Delta P_{рт}$, кПа	$Q_{рт}$, м^3/ч
0	101325.0	0	101325.0	0	0	0
0.5	101443.8	0.0005159	101325.0	0.0005159	0.12	1.86
1.5	102289.0	0.0015479	101325.0	0.0015479	0.96	5.57
2.5	103925.7	0.0025799	101325.0	0.0025799	2.60	9.29

По данным ООО «Оренбургский радиатор» построим расходную характеристику гидравлического тракта радиатора 420-1301010-02 (табл. 4).

Табл. 4 – Гидравлические потери в радиаторе 420-1301010-02

Расход охлаждающей жидкости $Q_р$, м^3/ч	Гидравлическое сопротивление $\Delta P_р$, кПа
3.6	5,2
4.8	5,8
6	11,4
7.2	17.7

Расходные характеристики в общем случае описываются параболами, проходящими через точку (0,0).

Радиатор, труба подвода к водяному насосу и рубашка охлаждения с термостатом соединяются последовательно, поэтому при одинаковых расходах жидкости потери напора в контуре и радиаторе должны складываться. Уравнение совместной расходной характеристики контура системы охлаждения и радиатора будет иметь вид (см. рис. 2а)

$$\Delta P_{со} = \Delta P_{рт} + \Delta P_{тр} + \Delta P_{р} = 1.5722Q^2 + 0.0292Q^2 + 0.3373Q^2 = 1.9387Q^2.$$

Для проверки условия обеспечения требуемого расхода охлаждающей жидкости в контуре системы охлаждения дизеля отобразим в одной системе координат расходные характеристики контура системы охлаждения (восходящая парабола), характеристики жидкостного насоса (нисходящие кривые, взятые из отчета испытания насосов) и линии требуемых расходов охлаждающей жидкости для дизелей мощностей

100 кВт (n = 3000 мин$^{-1}$) – 8,60 м^3/ч, 43 кВт (n = 1500 мин$^{-1}$) – 3,55 м^3/ч (вертикальные пунктирные прямые) (рис. 2).

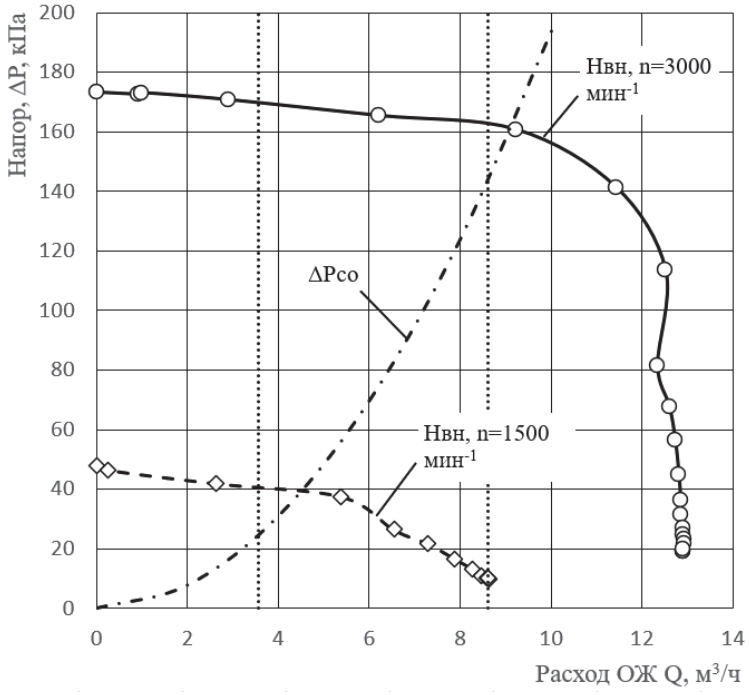


Рис. 2 – Совмещенные характеристики водяного насоса 3LD-1307015-Б и контура системы охлаждения дизеля MMZ-2.5DTI

Точки согласования (пересечения) гидравлической характеристики системы охлаждения ΔP_{co} с напорными характеристиками насоса располагаются правее вертикальных линий требуемых расходов охлаждающей жидкости, т.е. можно сделать вывод о достаточности производительности насоса. Без учета потерь давления в дюритовых патрубках подвода – отвода охлаждающей жидкости к радиатору по рис. 5 можно определить согласованные расходы жидкости. Для двигателя с N_e = 100 кВт, n = 3000 мин$^{-1}$ согласованный расход составит $Q_{согл}$ = 9,2 м^3/ч и с N_e = 43 кВт, n = 1500 мин$^{-1}$ $Q_{согл}$ = 4,5 м^3/ч.

При данных расходах охлаждающей жидкости перепад температуры на двигателе составит 9,3℃ и 8,1℃ соответственно, что можно считать приемлемым [1, 2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Колчин А.И. Расчёт автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов / А.И.Колчин, В.П. Демидов - 4-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2008. - 496 с.

2. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн.2. Динамика и конструирование: Учеб. /В.Н.Луканин, И.В.Алексеев, М.Г.Шатров и др.; Под ред. В.Н.Луканина. – М.: Высш. шк., 1995. – 319 с.

3. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей / С.И.Ефимов, Н.А.Иващенко, В.И.Ивин и др.; Под ред. А.С.Орлина, М.Г.Круглова – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. - 456 с.

УДК 631.35 + 621.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИЛОВОЙ НАГРУЖЕННОСТИ МЕХАНИЗМА АГРЕГАТИРОВАНИЯ САМОХОДНОЙ УБОРОЧНОЙ КОСИЛКИ ДЛЯ РЕЖИМА КОПИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОЛЯ

А.В. Котов[1,2], Д.Г. Кроль[2]
[1]ОАО «Сейсмотехника», г. Гомель, Республика Беларусь
[2]Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь

Введение. Для обеспечения максимальной загрузки современных высокопроизводительных уборочных комбайнов наблюдается тенденция к активному внедрению в технологический процесс самоходных уборочных косилок, оснащенных широкозахватными адаптерами. Конструкция механизма агрегатирования такой косилки за счет соответствующей регулировки или незначительной доработки предусматривает возможность обеспечения агрегатирования с адаптерами различных производителей. Однако, учитывая, что навешиваемые адаптеры могут существенно отличаться как массой, так и положением центра тяжести, то на практике оценка возможности такого агрегатирования предварительно проводится на соответствующих математических моделях. Такой подход позволяет для критически важных режимов работы не только проанализировать кинематическую схему работы механизма, но и оценить силовую нагруженность наиболее ответственных элементов конструкции (таких как силовые гидроцилиндры) без проведения соответствующих натурных испытаний.

Цель исследования. Моделирование и анализ силовой нагруженности гидроцилиндра угла атаки и гидроцилиндра подъема адаптера механизма агрегатирования самоходной уборочной косилки для режима копирования рельефа поля с учетом влияния коэффициента сопротивления перемещению башмака по опорной поверхности.

Постановка задачи. В качестве объекта исследования принят механизм агрегатирования косилки самоходной универсальной KSU-1 производства ООО «Комбайновый завод «Ростсельмаш»», кинематическая схема которого приведена на рис. 1.

Механизм агрегатирования представляет собой единую рычажную систему, объединяющую механизм навески и механизм уравновешивания. Данная конструкция обеспечивает работу с навешиваемым адаптером на различных режимах работы, включая режим копирования рельефа поля. В практике сельскохозяйственного машиностроения моделирование и анализ силовой нагруженности механизма агрегатирования на данном режиме проводят без учета коэффициента сопротивления перемещению башмака по

опорной поверхности, что требует проведения дополнительного исследования в правильности использования такого подхода.

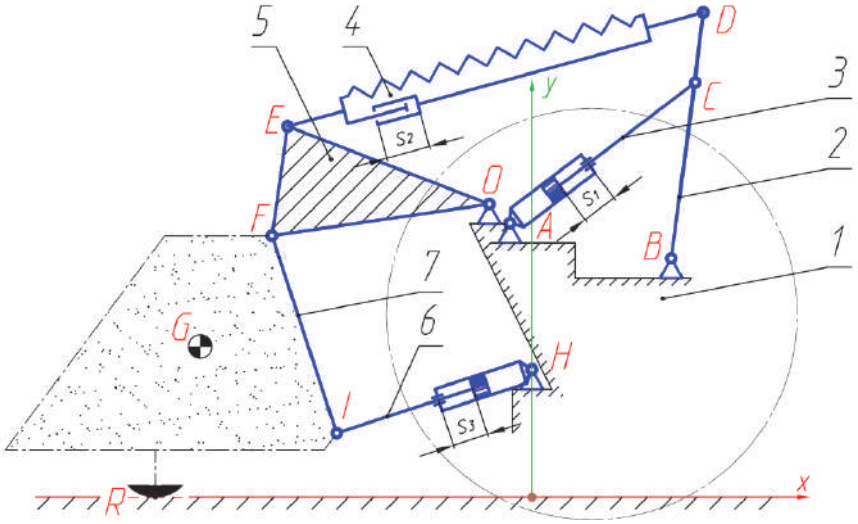


Рис. 1 – Кинематическая схема механизма агрегатирования:
1 – рама; 2, 5 – двуплечий поворотный рычаг; 3 – гидроцилиндр *AC* подъема; 4 – блок уравновешивающих пружин с телескопической тягой; 6 – гидроцилиндр *HI* угла атаки; 7 – адаптер

Для режима копирования рельефа поля настройка механизма агрегатирования под конкретный навешиваемый адаптер осуществляется за счет регулировки длины гидроцилиндров подъема (*AC*) и угла атаки (*HI*) адаптера с последующей их фиксацией (см. рис. 1). В результате механизм приобретает одну степень свободы, а навешиваемый адаптер может перемещаться в пределах свободного хода телескопической тяги (изменения обобщенной координаты s_2), копируя рельеф поля. При этом навешиваемый адаптер передает на опорные башмаки лишь часть своего веса, в то время как оставшаяся его часть компенсируется блоком уравновешивающих пружин.

Методы исследований. Для исследования силовой нагруженности рассматриваемого механизма агрегатирования была разработана соответствующая векторная математическая модель, на основе метода преобразования координат в неизменном базисе [1], которая позволила описать кинематику всех характерных точек. Для анализа нагруженности механизма использовался оригинальный аналитический способ силового анализа плоских рычажных механизмов с помощью нахождения векторов тангенциальных и нормальных составляющих реакций связей [2], а также применялось свойство векторного произведения для нахождения момента силы.

Расчетная схема механизма агрегатирования для проведения силового анализа приведена на рис. 2. Будем считать, что механизм агрегатирования отрегулирован и обеспечивает требуемую характеристику

копирования рельефа поля с навешиваемым адаптером, т.е. полученная расчетная величина вертикальной реакции на опорных башмаках находится в рекомендуемом диапазоне. Методика расчета данной характеристики для различных механизмов уравновешивания представлена в работах [1, 3]. Анализ силовой нагруженности проведем с учетом коэффициента сопротивления перемещению башмака по опорной поверхности, который связывает вертикальную реакцию с силой сопротивления перемещению как:

$$T_{70}(s_2) = f \cdot N_{70}(s_2),$$

где f – коэффициент сопротивления перемещению башмака.

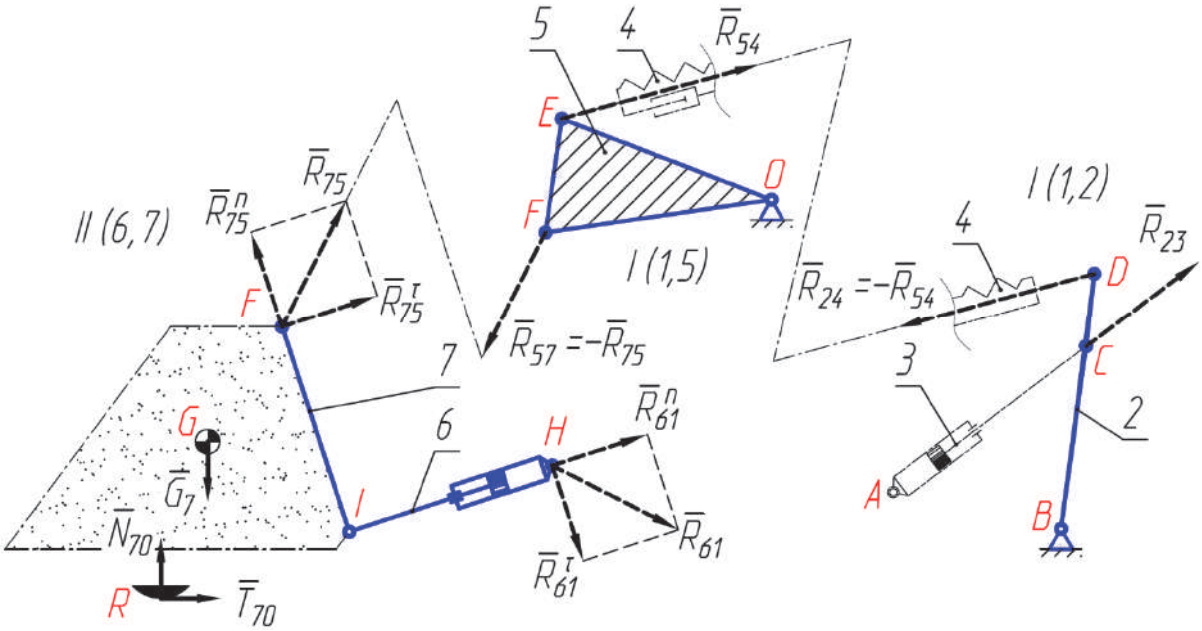


Рис. 2 – Расчетная схема механизма агрегатирования к силовому анализу

При проведении расчета пренебрегаем массово-инерционными характеристиками звеньев, которые на несколько порядков меньше соответствующих параметров навешиваемого адаптера. Рассмотрим структурную группу II(6,7) механизма, для которой аналитически найдем неизвестные векторы тангенциальных составляющих реакций связей в шарнирах F и H с помощью соответствующей функции пользователя [2]:

$$\bar{R}^\tau_{75}(s_2) = Rt(\bar{I}(s_2), \bar{F}(s_2), \begin{pmatrix} \bar{G}(s_2) \\ \bar{R}(s_2) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \bar{G}_7 \\ \bar{N}_{70}(s_2) + \bar{T}_{70}(s_2) \end{pmatrix}, \bar{0}); \quad (1)$$

$$\bar{R}^\tau_{61}(s_2) = Rt(\bar{I}(s_2), \bar{H}, (\bar{0}), (\bar{0}), \bar{0}). \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) каждому радиус-вектору точки приложения внешней нагрузки соответствует свой вектор силы, которые представлены в виде массивов соответствующей размерности. Чем больше внешних векторов сил действуют на звено рассматриваемой структурной группы, тем большую размерность будут иметь данные массивы. В случае отсутствия внешних нагрузок, в функцию пользователя подставляется нулевой вектор (вектор, составляющие проекции которого равны нулю). Так для звена *IF*

(см. рис. 2) массив радиус-векторов точек приложения внешних нагрузок и массив векторов сил имеют размерность [2×1], а для звена *IH*, на которое не действуют внешние нагрузки, имеют размерность [1×1] с нулевыми векторами.

Найдем вспомогательный вектор силы, равный сумме всех известных векторов сил (включая векторы найденных тангенциальных составляющих реакций связей в шарнирах *F* и *H*), но взятых с противоположным знаком:

$$\overline{R}_{IFH}(s_2) = \ (\overline{R}^{\tau}_{75}(s_2) + \overline{R}^{\tau}_{61}(s_2) + \overline{G}_7 + \overline{N}_{70}(s_2) + \overline{T}_{70}(s_2)) .$$

Векторы нормальных составляющих реакций связей в шарнирах *F* и *H* найдем с помощью соответствующих функций пользователя [2]:

$$\overline{R}^{n}_{75}(s_2) = Rn(\overline{I}(s_2), \overline{F}(s_2), \overline{H}, \overline{R}_{IFH}(s_2), \overline{F}(s_2)) ; \ \overline{R}^{n}_{61}(s_2) = Rn(\overline{I}(s_2), \overline{F}(s_2), \overline{H}, \overline{R}_{IFH}(s_2), \overline{H}) .$$

Векторы полных реакций связей в шарнирах *F* и *H* найдем как:

$$\overline{R}_{75}(s_2) = \overline{R}^{\tau}_{75}(s_2) + \overline{R}^{n}_{75}(s_2) ; \ \overline{R}_{61}(s_2) = \overline{R}^{\tau}_{61}(s_2) + \overline{R}^{n}_{61}(s_2) . \qquad (3)$$

Далее рассмотрим силовое равновесие двуплечего рычага *EOF* (см. рис. 2), для которого можно составить векторное уравнение моментов сил относительно т. *O* и найти неизвестный вектор реакции связи в шарнире *E*:

$$\overline{R}_{57}(s_2) = -\overline{R}_{75}(s_2) ; \ \overline{R}_{54}(s_2) = -\frac{(\overline{OF}(s_2) \times \overline{R}_{57}(s_2)) \cdot e_Z}{(\overline{OE}(s_2) \times Ort(\overline{ED}(s_2)) \cdot e_Z} \cdot Ort(\overline{ED}(s_2)) ,$$

где e_Z – единичный вектор оси *Z* принятой декартовой системы координат.

Аналогично для двуплечего рычага *DBC* (см. рис. 2) можно найти неизвестный вектор реакции связи в шарнире *C*:

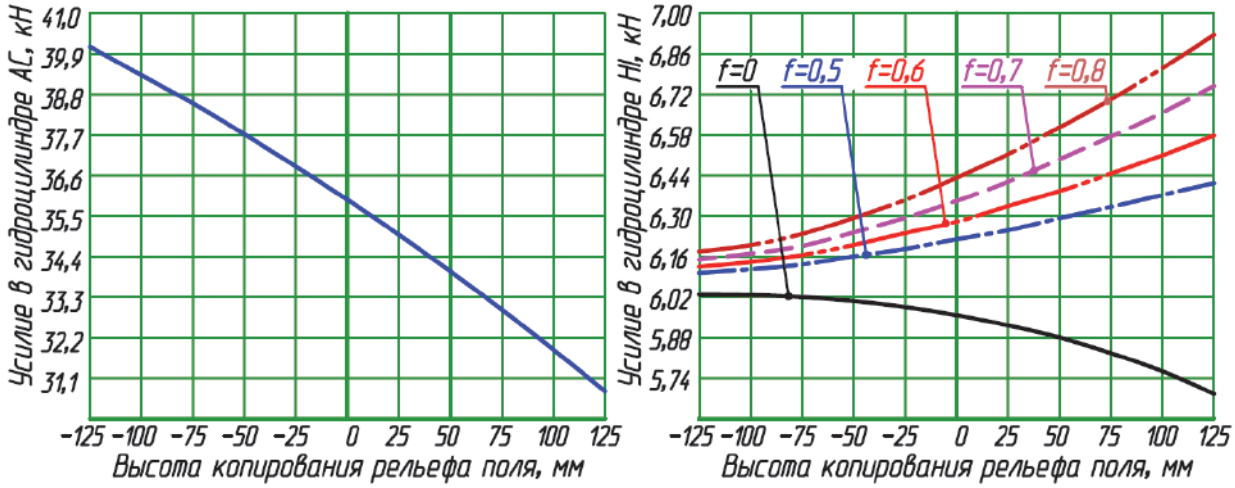
$$\overline{R}_{24}(s_2) = -\overline{R}_{54}(s_2) ; \ \overline{R}_{23}(s_2) = -\frac{(\overline{BD} \times \overline{R}_{24}(s_2)) \cdot e_Z}{(\overline{BC} \times Ort(\overline{AC}) \cdot e_Z} \cdot Ort(\overline{AC}) . \qquad (4)$$

В результате с помощью выражений (3) и (4) были найдены векторы реакций связей, модули которых определяют величину усилия, действующего в гидроцилиндрах *AC* и *HI* механизма агрегатирования.

Результаты и обсуждение. Приведем результаты анализа силовой нагруженности механизма агрегатирования косилки самоходной универсальной KSU-1 с жаткой-хедер транспортерной ЖХТ-9. Сравнительная оценка изменения величины усилия в силовых гидроцилиндрах механизма агрегатирования проводилась в диапазоне вертикального копирования рельефа поля ±125 мм от линии условного горизонта и коэффициентов сопротивления перемещению башмака 0; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8. На рис. 2 приведены полученные графические зависимости изменения усилия в гидроцилиндрах *AC* и *HI*, в зависимости от высоты копирования рельефа поля с учетом коэффициента сопротивления перемещению.

Полученные графические зависимости свидетельствуют о том, что учет коэффициента сопротивления перемещению башмака оказывает существенное влияние на величину усилия в гидроцилиндре *HI*. Величина

усилия в гидроцилиндре *AC* определяется только силой, развиваемой в блоке уравновешивающих пружин, которая в свою очередь зависит только от величины деформации пружин в процессе копирования адаптером рельефа поля.



а) б)

Рис. 2 – Изменение величины усилия в гидроцилиндрах *AC* (а) и *HI* (б)

Выводы. Результаты исследования позволили проанализировать силовую нагруженность гидроцилиндров механизма агрегатирования самоходной уборочной косилки. Предложенная методика может быть использована для предварительной оценки силовой нагруженности механизма агрегатирования самоходных уборочной косилки с различными навешиваемыми адаптера на предмет возможности расширения ее эксплуатационных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котов, А. В. Применение векторного анализа при проектировании рычажных механизмов / А. В. Котов, Ю. В. Чупрынин // Науч.-техн. прогресс в с.-х. пр-ве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2007. – С. 32-37.

2. Котов, А. В. Силовой анализ плоских рычажных механизмов векторным методом / А. В. Котов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – № 2(67). – С. 36-43. – DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-36-43.

3. Джасов, Д. В.. Математическая модель механизма уравновешивания и подъема косилки-плющилки ротационной / Д. В. Джасов, А. Д. Конявский, А. С. Шантыко, Ю. В. Чупрынин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – 2020. – Т. 9. – С. 27-30.

УДК 519.67 + 621.01

СПОСОБ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ПЛОСКИХ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С ПОМОЩЬЮ МАТРИЦ ОДНОРОДНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТ

А.В. Котов[1,2], Д.Г. Кроль[2]
[1]ОАО «Сейсмотехника», г. Гомель, Республика Беларусь
[2]Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь

Введение. Разработка математической модели любого плоского рычажного механизма непосредственно связана с проведением его кинематического анализа. Результаты такого анализа можно представить в виде массива числовых данных или в виде различных графических зависимостей. Но даже этих параметров часто бывает недостаточно, для оперативной оценки правильности полученного решения 1-ой задачи кинематического анализа, и тем более проверки 2-ой и 3-ей задачи.

Традиционно оценка адекватности полученных результатов кинематического анализа для математической модели плоского рычажного механизма проводится графическими методами для нескольких произвольных положений входного звена. Сопоставляя полученные графические данные из планов положений, скоростей и ускорений с их расчетными значениями, делается вывод об адекватности разработанной математической модели. Однако, такой способ является достаточно трудоемким и обладает относительно невысокой точностью, даже с учетом возможности применения различных графических пакетов [1].

На сегодняшний день подавляющее большинство математических моделей плоских рычажных механизмов разрабатывается при помощи современных математических пакетов или языков программирования. Данные компьютерные средства имеют достаточно широкий набор инструментов для визуализации графической информации, однако их потенциал применяется далеко не всегда. Потому разработка универсального способа визуализации результатов кинематического анализа для плоских рычажных механизмов является достаточно актуальной научно-практической задачей, решение которой позволит существенно ускорить разработку и отладку соответствующих математических моделей.

Цель исследования. Предложить универсальный способ визуализации решения кинематических задач для плоских рычажных механизмов с помощью матриц однородного преобразования координат и его реализацию в математическом пакете PTC.MathCAD.

Постановка задачи. Большинство известных способов графической визуализации решения кинематической задачи для плоских рычажных механизмов ограничиваются отображением лишь звеньев механизма в виде набора прямых линий [2]. Это в некотором роде облегчает восприятие смоделированной кинематической схемы механизма, но все еще не дает полной информации об его кинематике. Для проведения более полной визуализации решения кинематической задачи, как правило, требуются определенные навыки программирования с учетом специфики того или иного программного продукта, что не всегда является доступным.

При этом в компьютерной графике для визуализации различных графических объектов, как на плоскости, так и в пространстве активно используются матрицы однородного преобразования координат [3]. Возможность применения данных матриц в математических пакетах или языках программирования открывает дополнительные возможности по визуализации решения кинематических задач для плоских рычажных механизмов.

Методы исследований. Для осуществления визуализации графических объектов математической модели рычажного механизма на плоскости *XY* с помощью матриц однородного преобразования координат, вначале составляется базовая матрица исходного объекта, состоящая из координат его точек-вершин. Особенностью данной матрицы является то, что порядок расположения вершин должен соответствовать непрерывному обходу контура графического объекта, а третья координата всегда равна единице. Затем сформированная базовая матрица графического объекта, в зависимости от его положения и роли в математической модели, последовательно умножается на соответствующие матрицы однородного преобразования размером 3×3 (матрицу параллельного переноса, поворота, масштабирования и др.). В общем виде математическую запись указанных действий для произвольного графического объекта можно записать как:

$$P=\underbrace{\begin{pmatrix} scale & 0 & 0 \\ 0 & scale & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{масштаб}\cdot\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & r_x \\ 0 & 1 & r_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{перенос}\cdot\underbrace{\begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{поворот}\cdot\underbrace{\begin{pmatrix} ... & ... & ... \\ ... & ... & ... \\ ... & ... & ... \end{pmatrix}}_{и\ др.}\cdot\underbrace{\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & ... & x_i \\ y_2 & y_2 & ... & y_i \\ 1 & 1 & ... & 1 \end{pmatrix}}_{базовая\ матрица},$$

где *scale* – масштабный фактор для осей *X* и *Y* принятой системы координат; r_x, r_y – проекции радиус-вектора точки, в которую необходимо переместить графический объект; α – угол поворота графического объекта на плоскости относительно начала системы координат, рад; x_i, y_i – координаты i-ой точки-вершины базовой матрицы исходного объекта.

Результаты и обсуждение. Несмотря на то, что большинство рычажных механизмов сельскохозяйственных машин представляют собой пространственную конструкцию, для их исследования (с учетом ряда допущений) применимы плоские расчетные схемы. Поэтому предложенный

способ визуализации может быть успешно использован для указанных механизмов при разработке соответствующих математических моделей.

В рамках данной работы не представляется возможным показать все особенности визуализации решения кинематической задачи для плоского рычажного механизма с помощью матриц однородного преобразования координат. Поэтому ограничимся лишь несколькими примерами: графической визуализацией на кинематической схеме плоского рычажного механизма направляющих векторов, а также буквенных обозначений шарниров звеньев. На рис. 1 приведены примеры исходных графических объектов для такой визуализации на кинематической схеме, а на рис. 2 показано применение матриц однородного преобразования координат в составе пользовательских функций математического пакета PTC.MathCAD для их визуализации.

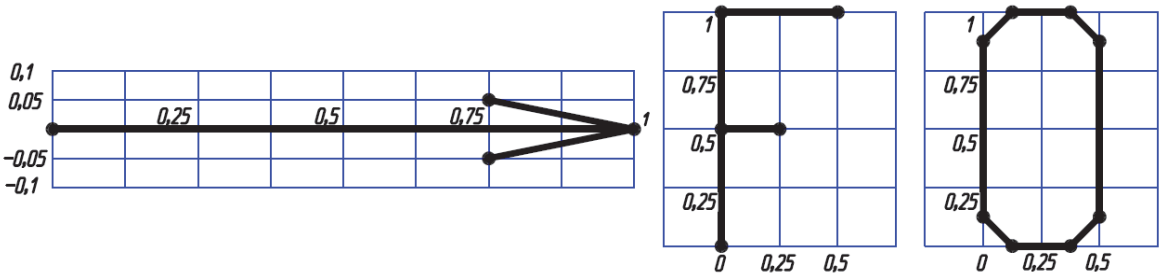


Рис. 1 – Исходные объекты для визуализации на кинематической схеме

$$\text{Arrow}(r, v, \text{scale}) := \left| \begin{array}{l} P \leftarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0.75 & 1 & 0.75 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0 & -0.05 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \\ STR \leftarrow \begin{pmatrix} \text{scale} & 0 & r_X \\ 0 & \text{scale} & r_Y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_X & -v_Y & 0 \\ v_Y & v_X & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ (STR \cdot P)^T \end{array} \right.$$

а)

$$\text{Letter}(r, \text{letter}, \text{scale}) := \left| \begin{array}{l} P \leftarrow \left| \begin{array}{l} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \text{ if letter} = \text{"F"} \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.125 & 0.375 & 0.5 & 0.5 & 0.375 & 0.125 & 0 \\ 0.125 & 0.875 & 1 & 1 & 0.875 & 0.125 & 0 & 0 & 0.125 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \text{ if letter} = \text{"O"} \end{array} \right. \\ STR \leftarrow \begin{pmatrix} \text{scale} & 0 & r_X + 0.5 \cdot \text{scale} \\ 0 & \text{scale} & r_Y - 1.2 \cdot \text{scale} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ (STR \cdot P)^T \end{array} \right.$$

б)

Рис. 2 – Пользовательские функции для визуализации направляющего вектора (а) и буквенных обозначений (б) в PTC.MathCAD

Пользовательские функции содержат следующие входные параметры: *r* – радиус-вектор точки, в которой требуется разместить для визуализации графический объект; *v* – вектор, который требуется визуализировать в виде направляющего вектора с учетом его модуля и направления; *scale* – масштабный фактор; *letter* – требуемая для визуализации буква латинского алфавита.

Предложенный способ визуализации предполагает, что заранее уже выполнен кинематический анализ плоского рычажного механизма одним из известных методов [4]. Тогда с помощью представленных пользовательских функций для графической визуализации на кинематической схеме требуемых объектов (например, аналога вектора линейной скорости точки *F*, а также ее буквенного обозначения), необходимо составить нижеприведенные выражения и поместить их по соответствующим осям *X* и *Y* декартового графика в математическом пакете PTC.MathCAD:

$$Arr(s,XY) = Arrow(\overline{F}(s), \overline{v}_{qF}(s), 150)^{<XY>};\ Let(s,XY) = Letter(\overline{F}(s), "F", 100)^{<XY>},$$

где *XY* – параметр, отвечающий за вывод отдельного столбца массива, содержащего координаты точек по осям *X* или *Y*; *s* – обобщенная координата.

По аналогии с приведенными на рис. 2 пользовательскими функциями может быть осуществлена визуализация других статических и динамических объектов кинематической схемы плоского рычажного механизма (пружин, гидроцилиндров, неподвижных опор, буквенно-цифрового обозначения и др.). На рис. 3 представлен пример графической визуализации для математической модели механизма агрегатирования самоходной уборочной косилки с помощью таких пользовательских функций, сформированных на основе матриц однородного преобразования координат. На рисунке представлено положение механизма агрегатирования при движении вниз навешиваемого адаптера в процессе копирования рельефа поля с визуализацией аналогов векторов скоростей для всех характерных точек.

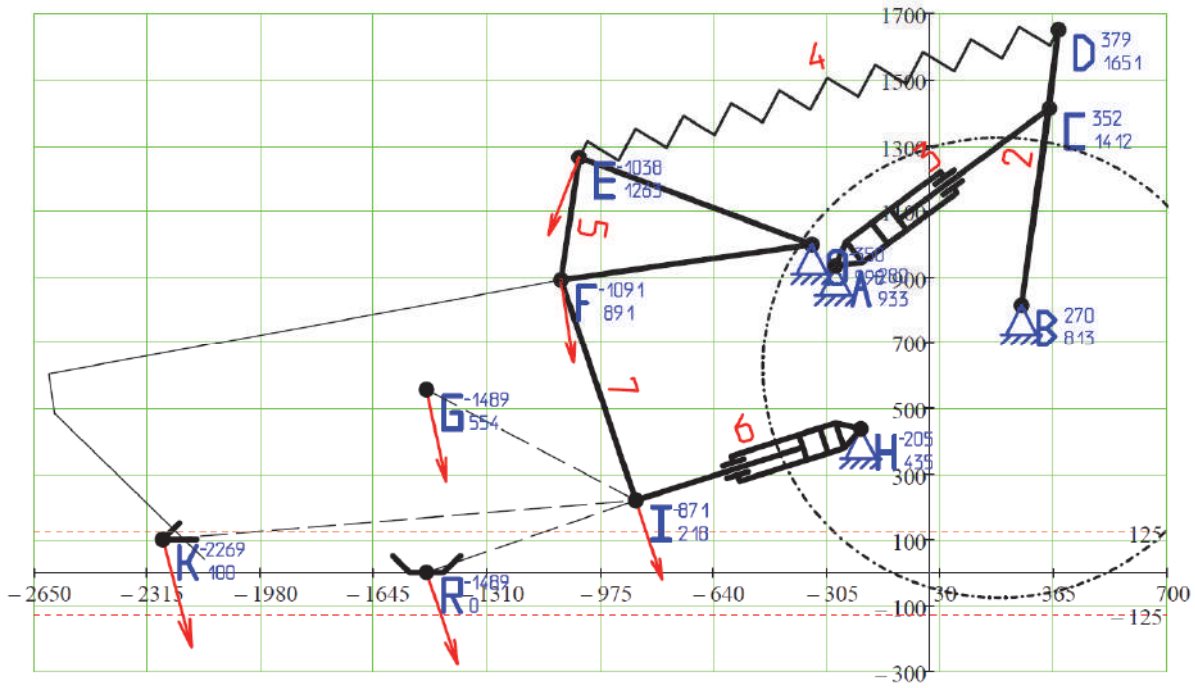


Рис. 3 – Графическая визуализация решения кинематической задачи для математической модели механизма агрегатирования самоходной уборочной косилки в математическом пакете PTC.MathCAD

Для визуализации на кинематической схеме звеньев рассматриваемого плоского рычажного механизма, все найденные радиус-векторы характерных точек объединены в один массив, порядок записи которых соответствует непрерывному графическому обходу контура механизма [5]. В результате такой визуализации решения кинематической задачи для любого положения плоского рычажного механизма можно всегда контролировать тот или иной интересующий кинематический параметр, а дополнительные возможности математического пакета PTC.MathCAD позволяют создавать соответствующие анимационные ролики [6].

Выводы. Предложенный способ визуализации решения кинематических задач для плоских рычажных механизмов с помощью матриц однородного преобразования координат позволяет обеспечить точное и наглядное представление результатов анализа и может быть реализован в большинстве математических пакетах и языках программирования с учетом специфики их работы с матрицами и графическими объектами. Данный способ позволяет уже на ранних стадиях математического моделирования контролировать полученное решение кинематического анализа. Предложенные в данной работе математические выражения не являются окончательными и могут в дальнейшем совершенствоваться. Возможным направлением дальнейших исследований может стать адаптация предложенного способа к другим математическим пакетам или языкам программирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков, И. А. К вопросу о кинематической разрешимости плоских рычажных диадных механизмов / И. А. Жуков, Е. В. Жукова // Журнал передовых исследований в области естествознания. – 2019. – № 6. – С. 20-28.

2. Сердега, Ю. П. Исследование и визуализация многозвенных механизмов с применением компьютерных технологий / Ю. П. Сердега, В. А. Волохов // Наука ЮУрГУ : Материалы 67-й научной конференции, Челябинск, 14–17 апреля 2015 года / ЮУрГУ, 2015. – С. 1585-1595.

3. Куликов, А. И. Алгоритмические основы современной компьютерной графики : учебное пособие / А. И. Куликов, Т. Э. Овчинникова. – 2-е изд. – Москва : ИНТУИТ, 2016. – 230 с.

4. Котов, А. В. Анализ уравновешенности кривошипно-ползунного механизма привода режущего аппарата методом векторов главных точек / А. В. Котов // Тракторы и сельхозмашины. - 2024. - Т. 91, № 2. - С. 167-180. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-606653.

5. Дворжак, В.М. Візуалізація схемотехнічного моделювання механізмів технологічних машин / В.М. Дворжак, Д.Л. Литвяк, І.С. Мелащенко [та ін.] // Технології та дизайн. – 2018. – № 4 (29). – С. 1-9.

6. Котов, А.В. Визуализация решения кинематической задачи для механизмов сельхозмашин в пакете PTC.MathCAD [Видео]. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=IBvSB78Pe74. – Дата доступа: 10.10.2025.

УДК 620.22–419.8:004.414.32

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

А.С. Петровский, И.Ю. Ухарцева
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь

Развитие современного машиностроения требует применения новых конструкционных материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. К числу наиболее перспективных относятся композиционные материалы. Современные композиционные материалы представляют собой многокомпонентные системы, состоящие из матрицы и армирующего элемента, обладающего высокой прочностью. В отличие от традиционных материалов композиты позволяют совмещать в себе лучшие свойства каждого из компонентов, обеспечивая повышенную прочность, лёгкость, износостойкость и устойчивость к внешним воздействиям [1].

Идея использования многокомпонентных материалов не нова. Ещё в Древнем Египте строители использовали первые композиты из смеси соломы и глины для создания кирпичей. Развитие авиации и космических технологий в XX веке потребовало материалов, обладающих высокой прочностью при минимальном весе, что дало толчок развитию полимерных и металлических композитов [2].

Особенно бурно создание композиционных материалов стало развиваться с появлением аддитивных технологий, которые лежат в основе прототипирования. С развитием технологий *3D*-печати появилось множество новых возможностей для использования композитных материалов, так как они позволяют создавать сложные формы, снижают расход материалов и сокращают производственные затраты [3]. Сегодня аддитивные технологии предоставляют возможность создавать материалы с заданными свойствами на молекулярном уровне, что делает композиты ещё более перспективными для различных отраслей промышленности, в том числе и для машиностроения.

Наиболее распространенными методами *3D*-печати с использованием композитов являются:

1.Метод послойного наплавления *FDM (Fused Deposition Modeling)***,** основанный на экструзии нити из термопластичного полимера, который может содержать армирующие добавки, такие, как углеродные или стеклянные волокна. Преимуществом данного метода является низкая стоимость, простота использования и возможность создания крупногабаритных деталей. Несмотря на относительно низкую точность и возможность расслоения в структуре при печати сложных геометрий, такой

метод применяют при производстве прототипов, небольших партий автомобильных деталей.

2. *SLA (Stereolithography)* – стереолитография использует жидкие фотополимеры, которые затвердевают под воздействием ультрафиолета. Композитные материалы для стереолитографии содержат добавки, улучшающие механические и термические свойства. Метод обладает высокой точностью и возможностью получения готовых изделий с гладкой поверхностью. Хотя стоимость расходных материалов высока и выбор композитных смол ограничен, стереолитография имеет довольно широкое применение в микроэлектронике.

3. *SLS* (*Selective Laser Sintering*) – селективное лазерное спекание осуществляют при использовании лазера для спекания порошковых материалов, включая композиты на основе полимеров и металлов. Метод позволяет получать высокопрочные детали и осуществлять печать сложных геометрий без поддержек. Несмотря на сложность в калибровке оборудования и высокой стоимости установки, его применяют в автомобилестроении и производстве функциональных прототипов.

4. *DMLS (Direct Metal Laser Sintering)* – лазерное спекание металлов позволяет создавать детали из металлических композитов, используя порошковые сплавы. Несмотря на дорогостоящее оборудование и сложность постобработки, высокая точность метода, прочность изделий и возможность работы с редкими металлами сделали его неоценимым при производстве деталей двигателей для машиностроительной и космической отраслей [4].

Особенности существующих методов *3D*-печати привели к использованию для прототипировании композиционных материалов, обладающих определенными свойствами.

Все чаще в современном машиностроении применяют полимерные композиционные материалы, которые используют преимущественно в тех случаях, когда ни один другой материал не отвечает возрастающим требованиям новой техники. Среди полимерных композиционных материалов наиболее часто применяют полилактиды *(PLA)* с углеродными волокнами, полиэфирэфиркетон *(PEEK)*-композиты и стеклопластик *(GFRP)*. Такие композиты обладают небольшой массой, высокой прочностью, устойчивостью к коррозии и химическим воздействиям, хорошей механической гибкостью и возможностью модификации для придания специфических свойств (термостойкость, электропроводность). Для нужд автомобиле- и машиностроения полимерные композиты используют для *3D*-печати термостойких, лёгких, но прочных деталей.

Металлические композиционные материалы, содержащие в металлической матрице армирующие добавки (карбид кремния, оксиды алюминия, титана, магния, углеродные нанотрубки), имеют высокую прочность, жёсткость и износостойкость, термостойкость, устойчивость к

экстремальным температурам, отличные электро- и теплопроводящие свойства. Для прототипирования в машиностроении наиболее часто используют алюминиевые композиты.

В основе керамических композиционных материалов лежит матрица, состоящая из керамики, а армирование обеспечивается волокнами или различными частицами. Материалы характеризуются высокой твёрдостью и термостойкостью, устойчивостью к химической и механической коррозии, огнестойкостью и низким коэффициентом теплового расширения. Например, углеродно-керамические композиты (C/SiC) применяют для изготовления методом *3D*-печати прототипов и деталей тормозных систем спортивных автомобилей, а оксидные композиты (Al_2O_3, ZrO_2) – для теплозащитных экранов [5].

В зависимости от поставленных задач можно подобрать композиционные материалы, которые отвечали бы всем требованиям эксплуатации изделий современного машиностроения и обладающие, например, такими свойствами, как механическая прочность, относительно низкая удельная масса, пожароопасность, невысокая стоимость, хорошая обрабатываемость, низкие затраты на утилизации и т.д.

Современные методы прототипирования позволяют решить ряд инженерных задач, направленных на снижение металлоемкости изделий, смоделировать и более точно определить нагрузки на проектируемые узлы и детали, снизить трудоемкость процесса их разработки и повысить качество продукции машиностроения в целом. [6].

Сегодня аддитивные технологии продолжают совершенствоваться. Основными направлениями развития являются разработка новых композиционных материалов, обладающих способностью к самовосстановлению, биодеградации, программируемыми свойствами такими, как изменение формы под воздействием внешних факторов. Сочетание аддитивных технологии с искусственным интеллектом позволит создавать самокорректирующиеся процессы печати и улучшать качество готовых изделий, а увеличение скорости печати повысить рентабельность производства, добиться более точного контроля за структурой и свойствами материала и уменьшить количество отходов [4,7].

Важным аспектом является необходимость создания новых методов тестирования и сертификации изделий, напечатанных с использованием композитных материалов, чтобы гарантировать их безопасность и долговечность.

Тем не менее, несмотря на высокую стоимость материалов и проблему гарантии и безопасности, композиты в аддитивных технологиях – это шаг в будущее, позволяющий разрабатывать инновационные изделия с уникальными свойствами, открывая новые горизонты в промышленности и науке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джонс, Р.М. Механика композитных материалов. / Р.М.Джонс — *CRC Press*, 2018 – 564 с.

2. Гершензон, Д.Я., Композиционные материалы и аддитивные технологии / Д.Я. Гершензон, С.М. Григорьев. – М.: Машиностроение, 2018.– 857с.

3. Гибсон, И. Технологии аддитивного производства: 3D-печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. / И. Гибсон, Д.У. Розен, Б. Стакер. –*Springer*, 2021 – 616 с.

4. Бикас, Х., Методы аддитивного производства и подходы к моделированию: критический обзор / Х. Бикас, П., Ставропулос, Г. Хриссолурис // Международный журнал передовых производственных технологий. – 2019. – Т. 104. – С. 2853-2875.

5. *3D*-печать композитов с полимерной матрицей: обзор и перспективы / Ван С., Цзян М., Чжоу З., Гоу Дж., Хуэй Д. // Композиты. Часть В: Инженерия. – 2017. – Т. 110. – С. 442-458.

6. Бобрышева, С.Н. Современные полимерные композиционные материалы в машиностроении / С.Н. Бобрышева, И.Ю. Ухарцева // Инновационное станкостроение, технологии и инструмент: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 30 нояб. 2023 г. / М-во пром-сти Респ. Беларусь [и др.]; под общ. Ред. М.И. Михайлова. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2024.– С.69-71.

7. Ковалёв, С.П. Металлические композиционные материалы: перспективы и проблемы / С.П. Ковалёв // Материаловедение. – 2019. – №6. – С. 52-58.

УДК 620.178.4

УСКОРЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗНОСОУСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ МНОГОСТУПЕНЧАТОМ НАГРУЖЕНИИ

С.А. Тюрин, М.О. Прядко
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь

Для экспериментальной оценки взаимного и совместного влияния процессов трения и механической усталости на работоспособность материалов и моделей силовых систем в сложных условиях нагружения в механике износоусталостного повреждения разработаны специальные методы износоусталостных испытаний [1-2]. Эти методы комплексных испытаний базируются, как правило, на инновационных решениях, многие из которых являются изобретениями [3-5].

Основные принципы разработанных методов таковы:

– методы включают три вида испытаний: на механическую усталость при консольном изгибе с вращением, на трение (качения или скольжения) и комплексные износоусталостные испытания (на контактно-механическую усталость, фрикционно-механическую усталость, фреттинг-усталость) (рис. 1);

– при всех видах испытаний используется единый цилиндрический образец (вал) с рабочим диаметром 10 мм;

– все виды испытаний реализуются на вращательном движении при частоте вращения образца 3000 мин$^{-1}$ (50 Гц);

– вводится система основных характеристик сопротивления износоусталостным повреждениям, которые разделены на обязательные и рекомендуемые;

– все характеристики предусмотрено получать экспериментально.

К настоящему времени типичные методы износоусталостных испытаний доведены до стандартного уровня (ГОСТ 30754-2001, СТБ 1448-2004, СТБ 1758-2007 и др.).

Установлено [6], что для определения истинного значения предела выносливости и других характеристик сопротивления усталости и износостойкости путем построения кривой усталости согласно требованиям стандарта [7], необходимо 300...400 часов. В случае же применения ускоренных методов (в частности, метод Локати) [8] (требуется ≈4 часа), при приемлемой погрешности. Следовательно, применение ускоренных методов позволяет сократить время испытаний в 70...100 раз.

В механике износоусталостного повреждения нашел широкое применение метод ускоренных испытаний при многоступенчатом нагружении. Его широко используют для ускоренной оценки как основной

характеристики сопротивления усталости металлических материалов – предела выносливости, так и ряда других параметров.

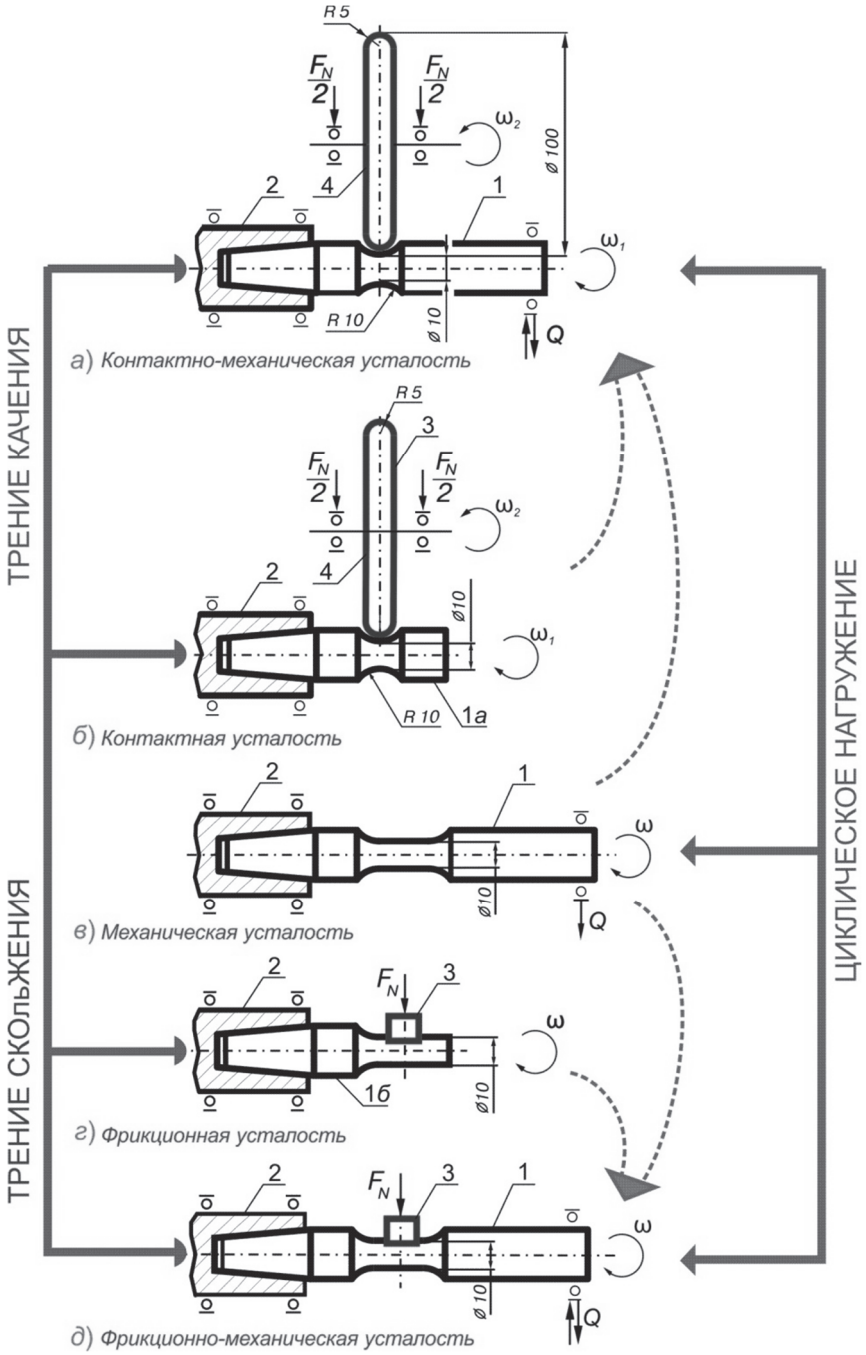


Рис.1 – Типичные схемы износоусталостных испытаний: 1 – образец; 2 – шпиндель испытательной машины; 3, 4 – контробразец; Q – изгибающая нагрузка; F_N – контактная нагрузка; ω_1, ω_2 – скорость вращения образца, контробразца

С использованием этого метода проведен комплекс испытаний для того, чтобы получить комплекс специфических характеристик износоусталостного повреждения в специфических же условиях.

На рис. 2 приведены результаты сравнительных испытаний образца стали 45 на механическую усталость, пары трения сталь 45 (вал) / сталь 25ХГТ (ролик) – на контактную усталость и аналогичной силовой системы сталь 45 (вал)/сталь 25ХГТ (ролик) – на контактно-механическую усталость в условиях прямого и обратного эффектов.

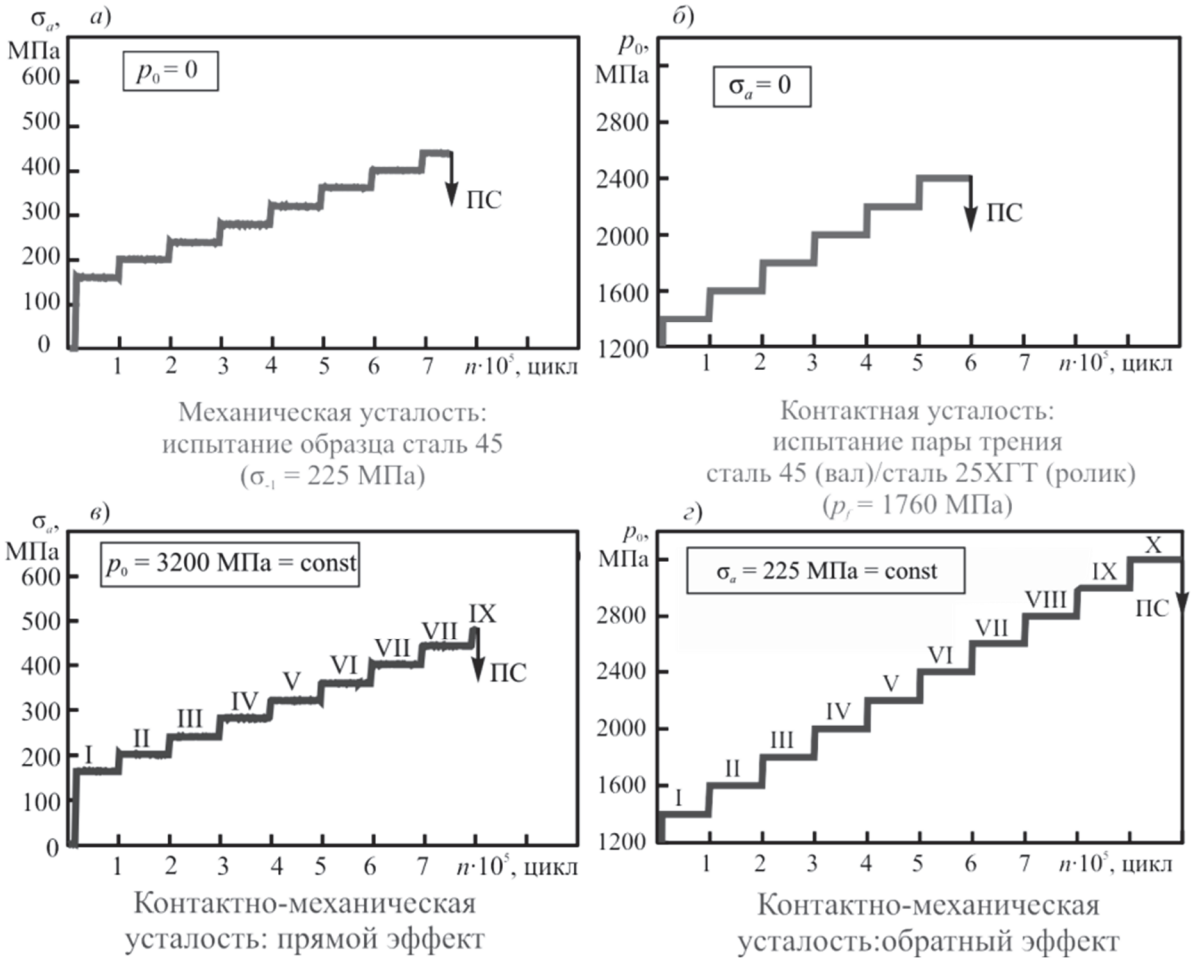


Рис.2 – Сравнительные результаты испытаний методом многоступенчатого нагружения

Анализ результатов испытаний (см. рис.2) показывает, что сопротивление износоусталостному повреждению и разрушению сравниваемых объектов существенно различно – по уровню предельных напряжений, по долговечности (суммарному числу циклов нагружения до наступления предельного состояния) и, наконец, по числу ступеней нагружения, которое может выдержать данный объект до перехода к предельному состоянию.

В табл. 1 дана сводка характеристик износоусталостного повреждения, численные значения которых можно получить по результатам испытаний методом многоступенчатого нагружения; там же приведены и необходимые формулы для их оценки

Описанный метод ускоренных испытаний при многоступенчатом нагружении стандартизован [9].

Табл. 1 Характеристики износоусталостного повреждения, полученные методом многоступенчатого нагружения

Характеристики свойств	**Механическая усталость**	**Контактная усталость**	**Контактно-механическая усталость**	
			Прямой эффект	**Обратный эффект**
Предельное напряжение, МПа	$\sigma_k = 440$	$p_k = 2400$	$\sigma_{kp} = 480$	$p_{k\sigma} = 3200$
Интервал нагруженности, МПа	$\Delta\sigma = \sigma_k - \sigma_н = 280$	$\Delta p = p_k - p_н = 1000$	$\Delta\sigma = \sigma_{kp} - \sigma_н = 320$	$\Delta p = p_{k\sigma} - p_н = 1800$
Интервал предельных напряжений, МПа	$\Delta\sigma_{\lim} = \sigma_k - \sigma_{-1} = 215$	$\Delta p_{\lim} = p_k - p_f = 640$	$\Delta\sigma_{\lim} = \sigma_{kp} - \sigma_{-1} = 255$	$\Delta p_{\lim} = p_{k\sigma} - p_f = 1440$
Параметры несущей способности	$K_{\lim} = \frac{\sigma_k}{\sigma_{-1}} = 1{,}956$ $\Delta K_{\lim} = \frac{\Delta\sigma_{\lim}}{\Delta\sigma} = 0{,}768$	$K_{\lim} = \frac{p_k}{p_f} = 1{,}364$ $\Delta K_{\lim} = \frac{\Delta p_{\lim}}{\Delta p} = 0{,}640$	$K_{\lim} = \frac{\sigma_{kp}}{\sigma_{-1}} = 2{,}133$ $\Delta K_{\lim} = \frac{\Delta\sigma_{\lim}}{\Delta\sigma} = 0{,}797$	$K_{\lim} = \frac{p_{k\sigma}}{p_f} = 1{,}818$ $\Delta K_{\lim} = \frac{\Delta p_{\lim}}{\Delta p} = 0{,}800$
Суммарная долговечность, цикл	$\sum n_\sigma = 7{,}51 \cdot 10^5$	$\sum n_p = 6 \cdot 10^5$	$\sum n_{\sigma p} = 8{,}04 \cdot 10^5$	$\sum n_{p\sigma} = 10 \cdot 10^5$
Суммарная живучесть, цикл	$\sum n(\Delta\sigma_{\lim}) = 5{,}51 \cdot 10^5$	$\sum n(\Delta p_{\lim}) = 4 \cdot 10^5$	$\sum n(\Delta\sigma_{\lim}) = 6{,}04 \cdot 10^5$	$\sum n(\Delta p_{\lim}) = 8 \cdot 10^5$
Предельная циклонапряженность, МПа·цикл	$\sum(n\sigma) = 2{,}18 \cdot 10^8$	$\sum(np) = 9{,}4 \cdot 10^8$	$\sum(n\sigma) = 2{,}42 \cdot 10^8$	$\sum(np) = 2{,}3 \cdot 10^9$

Выводы. Изложены основные принципы разработанных специальных методов износоусталостных испытаний, которые базируются на инновационных решениях, положенных в основу ряда изобретений. Показано, что применение ускоренных методов определения основных характеристик износоусталостного повреждения (в частности, ступенчатого нагружения) позволяет существенно сократить время испытаний. Проведенные испытания подтвердили эффективность и применимость предложенных методов испытаний на практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еловой, О. М. Экспериментальная механика локальных повреждений: методы исследований и некоторые результаты / О. М. Еловой, А. В. Богданович, С. А. Тюрин, В. В. Комиссаров // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. – Вып. 9. – Минск : ОИМ НАНБ, 2020. – С. 166–175.

2. Махутов, Н. А. Методы износоусталостных испытаний и их эффективность / Н. А. Махутов, А. В. Богданович, С. А. Тюрин, В. В.

Комиссаров // Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск : БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 149–162.

3. Способ испытаний материалов зубчатых колес на контактную и изгибную усталость: пат. 9247 Респ. Беларусь, МПК G 01M13/02/ В.А. Жмайлик, В.А. Андрияшин, Л.А. Сосновский, А.М. Захарик, В.В. Комиссаров, С.С. Щербаков; заявители ПО «Гомсельмаш», ОИМ НАН Б. – № a20040781; заявл. 19.08.2004; опубл. 30.04.2007. –2007. –6 с.

4. Способ износоусталостных испытаний материала рельса системы коле-со-рельс: пат. 10326 Респ. Беларусь, МПК G 01N3/56/ В.И. Сенько, Л.А. Сосновский; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». –№ a20050296; заявл. 28.03.2005; опубл. 28.02.2008. –2008. –5 с.

5. Способ испытания на контактно-механическую усталость материала рельса системы колесо-рельс-основание: пат. 10327 Респ. Беларусь, МПК G 01N3/56/ Г.П. Ожигар, Л.А. Сосновский, В.О. Замятнин, В.И. Матвецов, А.А. Сырокваш, С.С. Щербаков, А.А. Кебиков; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». –№ a20050297; заявл. 28.03.2005; опубл. 28.02.2008. –2008. –6 с.

6. Сосновский, Л. А. Методика экспериментального построения и анализ кривой усталости в диапазоне долговечности от 1 до 108 циклов / Л. А. Сосновский, С. А. Тюрин, Е. С. Таранова // Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Киев, 28–31 мая 2013 г. – Киев : ИПП НАНУ им. Г. С. Писаренко, 2013. – С. 273–275.

7. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость : ГОСТ 25.502–79. – Введ. 1981–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 25 с.

8. РД 50-686-89. Методические указания. Надёжность в технике. Методы ускоренных испытаний на усталость для оценки пределов выносливости материалов, элементов машин и конструкций. – М. : Издательство стандартов, 1990. – 27 с.

9. СТБ 1233-2000. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость (Стандарт Беларуси). –Минск: Госстандарт, 2000. –8 с.

УДК 621

СОТРУДНИЧЕСТВО ГГТУ ИМ. П.О. СУХОГО И ХОЛДИНГА «ГОМСЕЛЬМАШ»

О.А. Лапко
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Сотрудничество ГГТУ им. П.О. Сухого и холдинга «Гомсельмаш» является ярким примером эффективной интеграции науки и производства. Данное взаимодействие позволяет обеим сторонам получать значительные выгоды, способствуя развитию передовых технологий и подготовке высококвалифицированных кадров для машиностроительной отрасли. Совместные хоздоговорные работы охватывают широкий спектр направлений, от разработки и внедрения новых конструкционных материалов до оптимизации технологических процессов и повышения энергоэффективности производства.

Участие преподавателей университета в проектах холдинга «Гомсельмаш» обеспечивает возможность применения теоретических знаний на практике, что, в свою очередь, стимулирует научные исследования и разработки. Полученные результаты активно используются в учебном процессе, позволяя студентам знакомиться с современными тенденциями и инновационными решениями в машиностроении. Кроме того, сотрудничество способствует повышению квалификации преподавательского состава, который получает определенный опыт работы с передовым оборудованием и технологиями.

Так на базе Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого в июне 2024 года состоялось открытие специализированного класса ОАО «ГЗЛиН», входящего в состав холдинга «ГОМСЕЛЬМАШ» (рис.1).

Рис. 1– Открытие специализированного класса

Прохождение обучения в специально оборудованной аудитории дает возможность студентам лучше ознакомиться с особенностями производственных процессов и получить ценный практический опыт, что направлено на подготовку квалифицированных кадров для предприятия.

Открытие специализированного класса это еще один шаг в многолетнем и плодотворном сотрудничестве между ГГТУ имени П.О. Сухого и холдингом «ГОМСЕЛЬМАШ». Предприятие является одним из ключевых партнеров университета в подготовке инженерных кадров. Многие выпускники университета успешно работают на «Гомсельмаше», внося свой вклад в развитие отечественного машиностроения. Новый класс оснащен современным оборудованием и программным обеспечением, позволяющим студентам моделировать и анализировать различные технологические процессы, используемые на предприятии. В учебном процессе активно применяются реальные кейсы и задачи, с которыми сталкиваются специалисты «Гомсельмаша», что позволяет будущим инженерам не только получить теоретические знания, но и развивать практические навыки, необходимые для успешной работы на производстве.

Представители холдинга «Гомсельмаш» также принимают активное участие в учебном процессе, проводя мастер-классы, семинары и практические занятия. Студенты также проходят практику непосредственно на предприятии, что дает им возможность знакомиться с производством изнутри и получать представление о будущей профессии.

Подобное взаимодействие между университетом и предприятием является важным фактором развития экономики региона. Подготовка квалифицированных кадров, обладающих необходимыми знаниями и навыками, способствует повышению конкурентоспособности белорусской промышленности и обеспечивает ее устойчивое развитие.

Для «Гомсельмаша» сотрудничество с ГГТУ им. П.О. Сухого является ценным источником новых идей и разработок, позволяющих предприятию оставаться конкурентоспособным на рынке сельскохозяйственной техники. Совместные проекты позволяют решать конкретные производственные задачи, внедрять инновационные технологии и повышать качество выпускаемой продукции. Кроме того, предприятие получает возможность привлечения талантливой молодежи, которая проходит практику и стажировку на производстве, а впоследствии может стать частью трудового коллектива.

Таким образом, взаимодействие преподавателей ГГТУ им. П.О. Сухого и специалистов холдинга «Гомсельмаш» представляет собой взаимовыгодное партнерство, которое способствует развитию науки, образования и производства. Этот пример успешной интеграции является образцом для других предприятий и учебных заведений, стремящихся к инновационному развитию и подготовке высококвалифицированных кадров.

Также непосредственно сами преподаватели проходят стажировку на «Гомсельмаше». В 2025 году преподаватели ГГТУ им. П.О. Сухого проходили стажировку в отделе главного технолога в Отраслевой технологической лаборатории сельскохозяйственного машиностроения.

Целью стажировок является повышение квалификации преподавательского состава в области современных технологий и инновационных решений, применяемых в сельскохозяйственном машиностроении. Особое внимание уделяется изучению передовых методов проектирования, технологической подготовки производства и контроля качества выпускаемой продукции.

Во время прохождения стажировки преподаватели знакомятся с новейшим оборудованием, используемым на «Гомсельмаше», включая станки с ЧПУ, роботизированные комплексы и системы автоматизированного проектирования (САПР). Ими изучаются процессы обработки различных материалов, сборки узлов и агрегатов, а также методы контроля геометрических параметров и механических свойств деталей. Также стажировка посвящена вопросам оптимизации технологических процессов и повышению эффективности производства. Преподаватели принимают участие в разработке технической документации, анализе производственных проблем и поиске путей их решения. Особое внимание уделяется внедрению принципов бережливого производства и использованию современных информационных технологий в управлении производством.

Полученный опыт и знания затем используются преподавателями в учебном процессе для повышения качества подготовки студентов и их соответствия требованиям современной промышленности.

По завершении стажировки преподаватели делятся полученными знаниями и навыками со своими коллегами на кафедре, проводятся семинары и мастер-классы, на которых обсуждаются новые технологии и методы, изученные на «Гомсельмаше», разрабатываются новые учебные материалы, включающие примеры из реальной производственной практики предприятия. Это позволяет актуализировать учебные программы и приблизить их к требованиям современной промышленности. Преподаватели также активно используют приобретенные знания при разработке курсовых и дипломных проектов студентов. Студентам предлагаются темы, связанные с решением актуальных производственных задач.

Важным аспектом стажировки является установление тесных контактов между преподавателями и специалистами холдинга «ГОМСЕЛЬМАШ». Эти контакты позволяют организовывать экскурсии студентов (рис.2) на предприятие, приглашать специалистов предприятия для чтения лекций и проведения практических занятий, что способствует

повышению мотивации студентов к учебе и их заинтересованности в будущей профессии.

Кроме того, стажировка преподавателей на ОАО «Гомсельмаш» способствует укреплению сотрудничества между университетом и предприятием в целом, заключаются хозяйственные договоры, ведутся совместные научно-исследовательские работы, направленные на решение актуальных производственных задач. Результатом такого взаимовыгодного сотрудничества становится повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции холдинга «ГОМСЕЛЬМАШ» за счет внедрения передовых технологий и инновационных разработок. С другой стороны, университет получает возможность проводить исследования, имеющие практическую ценность.

Рис. 2 – Студенты ГГТУ им. П.О. Сухого на экскурсии

Результатом такого взаимовыгодного сотрудничества являются не только новые технологические решения и усовершенствованные производственные процессы, но и подготовка высококвалифицированных кадров, обладающих знаниями и навыками, необходимыми для успешной работы в современной машиностроительной отрасли.

Таким образом, сотрудничество ГГТУ им. П.О. Сухого и холдинга «ГОМСЕЛЬМАШ» является взаимовыгодным партнерством, способствующим развитию науки, образования и производства. Этот пример демонстрирует, как интеграция научного потенциала и производственного опыта может приводить к созданию инновационных продуктов и подготовке квалифицированных кадров, необходимых для успешного развития машиностроительной отрасли. Подобные взаимодействия необходимо развивать и укреплять, создавая благоприятные условия для обмена знаниями и технологиями между образовательными учреждениями и промышленными предприятиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, М. И. Машиностроение как фактор интеграционных процессов славянских государств / М. И. Михайлов, О. А. Лапко // Менталитет славян и интеграционные процессы: история, современность, перспективы : материалы XI Междунар. науч. конф., Гомель, 23–24 мая 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2019. – С. 14-17.

УДК 631.171:338

СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА МАШИН И ТЕХНОЛОГИЙ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА: ЕЕ ОСОБЕННОСТИ И РОЛЬ НА ТЕКУЩЕМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ

В.К. Липская
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

Введение. Доктриной национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь до 2030 г. предусмотрено развитие конкурентоспособного аграрного производства, а также создание социально-экономических условий для поддержания потребления основных продуктов питания на рациональном уровне [1]. В документе озвучен ряд нерешенных до настоящего времени задач в продовольственной сфере. К ним относятся: повышение эффективности производства и снижение себестоимости продукции; эффективность экспорта и конкуренции на внешнем рынке; создание интегрированных компаний; выстраивание устойчивой агропродовольственной системы в рамках Евразийского экономического союза.

В Российской Федерации также действует доктрина продовольственной безопасности. В последнее время роль ее возросла в связи с изменившимися условиями социально-экономического развития страны, появлением новых рисков и угроз продовольственной безопасности, вызванных главным образом введением экономических санкций со стороны ряда западных стран, повышением открытости национального агропродовольственного рынка, связанного с присоединением ко Всемирной торговой организации, и углублением интеграционных процессов в рамках Евразийского экономического союза [2].

Следовательно, для решения проблем, упомянутых доктринами обеих стран, требуется удовлетворение потребностей в продукции растениеводства за счет собственного ее производства. С этой целью необходимо увеличить объемы выпуска путем использования инновационных технологий, надежной техники современного уровня различающейся по производительности и технологической структуре. При этом разрабатывать и производить машины для аграриев как в России, так и в Беларуси целесообразно в рамках современной промышленной политики, которая ориентирована на изготовление перспективных машин для обеспечения внутреннего спроса, а также повышения и (или) поддержания достигнутого уровня конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках. В этой связи, создание «Системы машин и технологий Союзного

государства» имеет высокую степень актуальности и призвана стать важнейшим элементом планирования и прогнозирования развития сельскохозяйственного машиностроения.

Основная часть. В научной литературе в разные годы рассматривались вопросы разработки Системы машин Союзного государства. Эту тему в своих работах поднимали как белорусские, так и российские ученые, в их числе Казакевич П.П. [3], Чеботарев В.П. [4], Володкевич В.И., Шах А.В., Елизаров В.П., Бейлис В.М. и др. Большей частью они касались проблем, связанных с недостаточной оснащенностью сельскохозяйственных производителей техникой, особенно в Российской Федерации. Кроме того, приводились данные о том, какими должны быть новые современные машины, например, по энергонасыщенности, производительности, ширине захвата и т.д. Особое внимание уделялось их технической многофункциональности и универсальности, адаптивности к современным принципам управления. В то же время в литературе очень мало уделено внимания постановочным вопросам, которые являются существенными при создании современной Системы машин, т.е. не представлены подходы, особенности, рекомендации по содержанию и наполнению документа.

В июне 2023 г. в республике состоялась международная сельскохозяйственная выставка «БелАгро-2023», в рамках которой была проведена III Международная научно-практическая конференция Союза промышленников «Прогресс». Одной из тем, поднятой в рамках этой конференции была создание «Системы машин и технологий ЕАЭС», как главного элемента планирования и прогнозирования развития сельскохозяйственного машиностроения. В ней приняли участие Министерство промышленности, Министерство сельского хозяйства и продовольствия, Национальная Академия Наук, Министерство экономики Республики Беларусь, Российская Академия Наук, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», АО «Петербургский тракторный завод», ОАО «МТЗ», ОАО «Гомсельмаш», БНТУ, БАТУ, БГСХА.

Таким образом, вновь вызванный интерес к поднятой теме подтверждает ее значимость и актуальность.

Остановимся на определении понятия Система машин. В словаре Официальной терминологии под ним понимается совокупность машин и (или) оборудования, объединенных конструктивно и (или) функционально для выполнения требуемых функций [5]. В Большом энциклопедическом словаре сельского хозяйства представлено два значения этого термина: 1) рационально ограниченная совокупность технических средств, согласованно разрабатываемых и поставляемых сельскому хозяйству в плановом порядке; 2) утверждённый ведомствами-разработчиками систематизированный сводный перечень используемых и рекомендуемых к применению

технологических комплексов и технических средств для механизации работ в растениеводстве, животноводстве, мелиорации и обеспечивающих производство сельскохозяйственной продукции по интенсивным технологиям [6].

Стоит отметить, что такой перечень существовал в годы Советского союза. Первая Система машин была рассчитана на три года с 1954 по 1956 гг. Следующая действовала с 1957 по 1965 гг. и в нее входило 661 техническое средство по растениеводству, 239 по животноводству, 169 по мелиорации. Последняя представляла собой Систему машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства на 1986-1995 гг. и была одобрена постановлением Комитета Госагропрома СССР и утверждена совместным приказом девяти министерств и ведомств. Для сравнения, она включала более 2000 наименований технических средств по растениеводству, что в 3 раза больше, чем было представлено в первых вариантах [7].

Данный документ был основополагающим в условиях плановой экономики. Его огромная роль подтверждается тем, что все решения, связанные с проектированием новой техники, модернизацией серийной, снятием с производства устаревшей и т.д., принимались на основании информации представленной в нем. Учитывая важность и значимость Системы машин к ее разработке привлекался широкий круг научно-исследовательских и конструкторских организаций различных ведомств, а также вузов и машиноиспытательных станций.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время роль указанного документа будет несколько иной. Он будет носить скорее справочный, рекомендательный характер для потребителей продукции сельскохозяйственного машиностроения, поможет ориентироваться в многообразии доступных средств механизации в зависимости от почвенно-климатических условий эксплуатации машин, размера посевных площадей и др.

Заметим, что в Республике Беларусь в настоящее время действует подобный документ – «Система перспективных машин и оборудования для реализации эффективных технологий производства и первичной переработки основных видов продукции растениеводства и животноводства на 2021-2025 годы и на период до 2030 года». В белорусскую систему машин включена техника ОАО Гомсельмаш», которая выпускается в настоящее время, осваивается производством или находится на стадии разработки.

Что касается планируемой к разработке «Системы машин и технологий Союзного государства», в современном представлении она должна включать научно-обоснованный анализ и учет существующих и инновационных технологий производства сельскохозяйственной продукции; особенности его ведения в конкретных природно-климатических условиях; наличие материально-технических ресурсов, обеспечивающих это

производство, как серийно выпускаемых и находящихся на рынке, так создаваемых и планируемых к производству.

В этой связи, в Системе машин должны быть отражены следующие вопросы:

– существующие и инновационные технологии производства продукции сельскохозяйственного назначения, в том числе безлюдные;

– зоны механизации в Беларуси и России с учетом изменившихся природно-климатических условий, характеристик полей и условий работы машин;

– группировка хозяйств по размерам площадей для возможности предусмотреть какие в них применять средства механизации;

– агротехнические сроки проведения работ, которые должны быть пересмотрены с учетом изменившихся природно-климатических условий;

– технологическая потребность сельскохозяйственного производства Союзного государства в основных технических средствах для производства продукции растениеводства;

– средства механизации (находящиеся в производстве; разрабатываемые; перспективные, планируемые к разработке).

Заключение. Разработка и внедрение научно-обоснованной «Системы машин и технологий Союзного государства» позволит частично решить проблему технической оснащенности сельскохозяйственного производства, поскольку является важной составляющей эффективности сельского хозяйства и высокой конкурентоспособности продукции. Ее создание оценивается как сложный и высокозатратный процесс, который требует привлечения усилий огромного количества ученых Республики Беларусь и Российской Федерации, а также различных Министерств, в том числе региональных, научно-практических центров, исследовательских институтов и др.

Сохранившийся опыт формирования Системы машин для сельскохозяйственного производства в Советском Союзе позволил определить постановочные вопросы, которые в обязательном порядке должны быть отражены при создании данного документа.

ЛИТЕРАТУРА

1. О Доктрине национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь до 2030 года : постановление Совета Министров Республики Беларусь, 15 декабря 2017 г., № 962. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21700962. – Дата доступа: 10.06.2023.

2. О реализации Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://council.gov.ru/media/files/pzgbeWAHoKR918YkuYQvi8lW2e8Gs948.pdf. – Дата доступа: 10.06.2023.

3. Казакевич, П.П. Разработка Системы машин для сельского хозяйства Союзного государства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: kazakevich-p-p-razrabotka-sistemy-mashin-dlya-selskogo-hozyajstva-soyuznogo-gosudarstva.pdf. – Дата доступа: 10.06.2023.

4. Чеботарев, В.П. К вопросу формирования системы машин Союзного государства для реализации инновационных технологий производства продукции растениеводства и животноводства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/18657/1/k-voprosu-formirovaniya-sistemy-mashin-soyuznogo-gosudarstva-dlya-realizacii-innovacionnyh-tekhnologij-proizvodstva-produkcii-rastenievodstva-i-zhivotnovodstva.pdf?ysclid=lisjhd6qt776513422. – Дата доступа: 10.06.2023.

5. Официальная терминология [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://official.academic.ru/23106/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD_%D0%B8%D0%BB%D0%B8_%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F. – Дата доступа: 10.06.2023.

6. Сельское хозяйство. Большой энциклопедический словарь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://selskoe_hozyaistvo.academic.ru/2737/%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD?ysclid=lislcb0k1o87721014. – Дата доступа: 10.06.2023.

7. Система машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства на 1986-1995 годы. Ч. 1. Растениеводство. – Москва : ЦНИИТЭИ Госкомсельхозтехники СССР, 1988. – 958 с.

УДК 658.512.011.56

КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СЕЛЬХОЗСТРОЕНИИ

Д.Ю. Зайцев, С.В. Рогов
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Современная инженерная деятельность характеризуется неразрывной связью с использованием персональных вычислительных машин и микропроцессоров. Вычислительная техника стала неотъемлемым компонентом инженерной практики, применяясь для проведения расчётов, автоматизации проектирования, планирования и организации экспериментов, а также для обработки результатов испытаний машин, механизмов и аппаратов. Её использование для решения широкого спектра задач существенно оптимизирует труд специалистов и способствует повышению эффективности производственных процессов.

В сельхозстроении, в соответствии с глобальными тенденциями развития промышленной информатики, актуализирована задача перехода к системной информационной поддержке процессов жизненного цикла выпускаемой продукции. Однако, как показал анализ, несмотря на значительные успехи в автоматизации проектных работ, при создании новых моделей сельскохозяйственной техники сохраняется ряд нерешённых проблем. В процессе конструирования остаются участки, не охваченные компьютерными средствами, как на отдельных этапах проектирования, так и при работе с агрегатами и сборочными единицами. Отсутствие комплексного подхода к информатизации снижает эффективность конструкторской деятельности, затрудняет взаимодействие между подразделениями и замедляет внедрение инновационных решений в производство.

Одним из наиболее перспективных направлений развития отрасли является внедрение систем автоматизированного проектирования (САПР), предназначенных для повышения качества и сокращения сроков разработки сельскохозяйственной техники и объектов сельхозстроения. Применение САПР позволяет создавать трёхмерные модели изделий и сооружений, проводить виртуальные испытания, анализировать нагрузки и технологические параметры ещё до начала физического производства. Такие системы обеспечивают тесную интеграцию между этапами проектирования, технологической подготовки и производства, формируя единое информационное пространство предприятия. Кроме того, использование САПР способствует стандартизации проектных решений,

снижению количества конструкторских ошибок и повышению точности документации.

Неотъемлемой частью процесса информатизации становится внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), которые обеспечивают контроль, мониторинг и оптимизацию производственных операций. В сельхозстроении подобные системы позволяют автоматизировать процессы обработки, сборки, сварки, окраски и других технологических операций, что приводит к повышению производительности, стабильности качества и снижению себестоимости выпускаемой продукции.

Проведённое исследование позволяет определить, что компьютеризация должна быть направлена на решение ключевых задач, обеспечивающих повышение качества и конкурентоспособности продукции. К ним относятся устранение технических проблем, препятствующих повышению качества выпускаемых изделий, внедрение новых и более эффективных методов проектирования, а также совершенствование организации процессов разработки, подготовки документации и постановки изделий на производство. Важное значение имеет также интеграция систем автоматизированного проектирования с системами управления производственными ресурсами, что позволяет объединить процессы конструирования, технологической подготовки и планирования производства в единую цифровую среду.

К числу конкретных технических задач, требующих решения с применением компьютерных технологий, можно отнести повышение технологичности деталей и сборок с учётом специфики производства, увеличение долговечности и надёжности узлов и агрегатов, реализацию программ импортозамещения комплектующих и деталей, оптимизацию конструкций по показателям энерго- и материалоёмкости, а также разработку решений для улучшения функциональных характеристик сельскохозяйственной техники в соответствии с современными европейскими стандартами. Не менее важными направлениями являются обеспечение безопасности эксплуатации и комфортных условий работы оператора, повышение эффективности труда инженеров при работе с электронной документацией, организация выпуска и сопровождения всех видов электронных документов в рамках концепции информационной поддержки жизненного цикла продукции.

Переход к организации деятельности предприятий сельхозстроения на основе концепции поддержки жизненного цикла продукции требует формирования методологической базы, комплексно охватывающей этапы проектирования, технологической подготовки, управления производством, сбыта и эксплуатации. Эффективное внедрение цифровых технологий возможно лишь при наличии единой информационной среды, обеспечивающей совместную работу всех подразделений предприятия. В

этом контексте важную роль играют интегрированные решения класса PLM (Product Lifecycle Management), объединяющие функции САПР, PDM (управление инженерными данными) и АСУ ТП в единую систему.

На основе анализа внедрения средств компьютеризации в отрасли можно выделить ряд концептуальных принципов, определяющих стратегию развития сельхозстроения. Прежде всего, это принцип поэтапного совершенствования, предполагающий постепенное внедрение новых методов решения инженерных задач и трансформацию содержания проектных работ с использованием современных программных и информационных средств. Важную роль играет принцип виртуализации бизнес-процессов, направленный на формирование виртуальных производственных структур и построение сквозных циклов по видам работ и технологическим переделам. Существенное значение имеет и принцип организационной стабильности, предусматривающий внедрение инноваций без радикального изменения организационной структуры предприятия, с закреплением новых бизнес-процессов на уровне корпоративных стандартов. Завершает систему принцип системного планирования, обеспечивающий последовательное и планомерное проведение работ по компьютеризации с учётом сроков разработки, приёмки и ввода решений в эксплуатацию.

Практическая реализация данных принципов требует наличия квалифицированных кадров, владеющих современными методами применения вычислительной техники для решения инженерных задач. В целях подготовки таких специалистов с 2014 года в Гомельском государственном техническом университете имени П. О. Сухого осуществляется обучение по специальности первой ступени высшего образования 1-53 01 01-01 «Автоматизация технологических процессов и производств (машиностроение и приборостроение)». Подготовка ведётся с учётом современных требований к инженерной деятельности, что позволяет выпускникам эффективно участвовать в развитии и сопровождении систем информационной поддержки жизненного цикла продукции, а также внедрять и адаптировать системы автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами в организациях сельхозстроительного профиля.

Таким образом, проведённое исследование подтверждает критическую важность комплексного подхода к информатизации в сельхозстроении. Внедрение систем автоматизированного проектирования и автоматизированного управления технологическими процессами, а также реализация предложенных концептуальных принципов создают основу для формирования эффективной системы информационной поддержки жизненного цикла продукции. Это, в свою очередь, является ключевым фактором повышения технологического уровня, качества и конкурентоспособности отечественного сельхозстроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушаков, В. А. Информационные технологии в машиностроении : учеб. пособие / В. А. Глушаков. — Минск : БНТУ, 2019. — 212 с.

2. Коваленко, С. П. Автоматизация инженерной деятельности на машиностроительных предприятиях / С. П. Коваленко, И. Г. Матюшенко. — Гомель : Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, 2020. — 185 с.

3. Рудаков, И. Н. Компьютерные технологии в конструировании машин / И. Н. Рудаков. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 256 с.

4. Петрушенко, Л. А. CAD/CAM/CAE-системы в машиностроении : основы и применение / Л. А. Петрушенко, С. В. Рогов. — Гомель : БелГУТ, 2021. — 198 с.

5. Кравченко, А. Г. Информационная поддержка жизненного цикла продукции в машиностроении / А. Г. Кравченко // Вестник Белорусского национального технического университета. — 2022. — № 3 (132). — С. 45–52.

6. Семенов, П. В. Внедрение PLM-систем в тракторостроении: проблемы и перспективы / П. В. Семенов // Наука и техника. — Минск : Национальная академия наук Беларуси, 2023. — Т. 18, № 2. — С. 77–84.

7. Широков, Е. В. Автоматизация технологических процессов в машиностроении / Е. В. Широков. — Санкт-Петербург : Политех-Пресс, 2020. — 240 с.

8. Трофимов, Д. С. Развитие цифрового инжиниринга в Республике Беларусь / Д. С. Трофимов // Инженерный журнал. — Гомель : Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, 2024. — № 1. — С. 23–31.

УДК 621.436

СРАВНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ШАТУННОЙ ШЕЙКЕ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДИЗЕЛЯ 3LDG, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

А.А. Никишев, А.В. Предко, А.Н. Петрученко
ОАО «УКХ «МИНСКИЙ МОТОРНЫЙ ЗАВОД»,
г. Минск, Республика Беларусь

Статическими нагрузками принято называть значения крутящего момента, являющегося функцией угла поворота коленчатого вала и передаваемого шатунной шейке. В случае динамического нагружения шейка подвергается дополнительному воздействию моментов упругости и инерции масс, расположенных до рассматриваемого сечения. Сравнительный анализ проводился для первой шатунной шейки коленчатого вала дизеля 3LDG [1], работающего на номинальном режиме.

Величина крутящего момента, нагружающего первую шатунную шейку в зоне маслоподводящего отверстия, равна половине крутящего момента, создаваемого первым цилиндром и передаваемого второй коренной шейке.

Для расчета величин крутящего момента использованы зависимости, представленные в работе [2]. Текущее значение крутящего момента в зависимости от угла поворота коленчатого вала равно:

$$M_{\text{кр}}(\varphi) = P_{\Sigma} \cdot R \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos\beta},$$

где P_{Σ} – сумма газовой силы и силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс;

R – радиус кривошипа;

β – угол качания шатуна.

Сумма газовой силы ($P_{\text{г}}$) и силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс (P_j) рассчитывается с помощью выражения [2]:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{г}} + P_j,$$

Для расчета газовой силы используется выражение [3]:

$$P_{\text{г}} = p_{\text{г}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4},$$

где $p_{\text{г}}$ – давление газов в цилиндре;

D – диаметр цилиндра.

Давление газов в зависимости от угла поворота вала определялось из индикаторной диаграммы (рис. 1).

Для расчета сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс использовано выражение [3]:

$$P_j = m_j \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \left(\frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta} + \lambda \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^3 \beta} \right)$$

где m_j – масса деталей, совершающих возвратно-поступательно движение, определена в соответствии с методикой [3] (1,26 кг);

ω – угловая скорость, для частоты вращения коленчатого вала 3000 мин$^{-1}$ этот параметр равен 314,15 с$^{-1}$;

λ – постоянная КШМ, для значений длины шатуна 148 мм и радиуса кривошипа 45 мм этот параметр равен 0,304.

Угол качания шатуна, определяется с помощью выражения:

$$\beta = \arcsin(\lambda \cdot \sin \varphi).$$

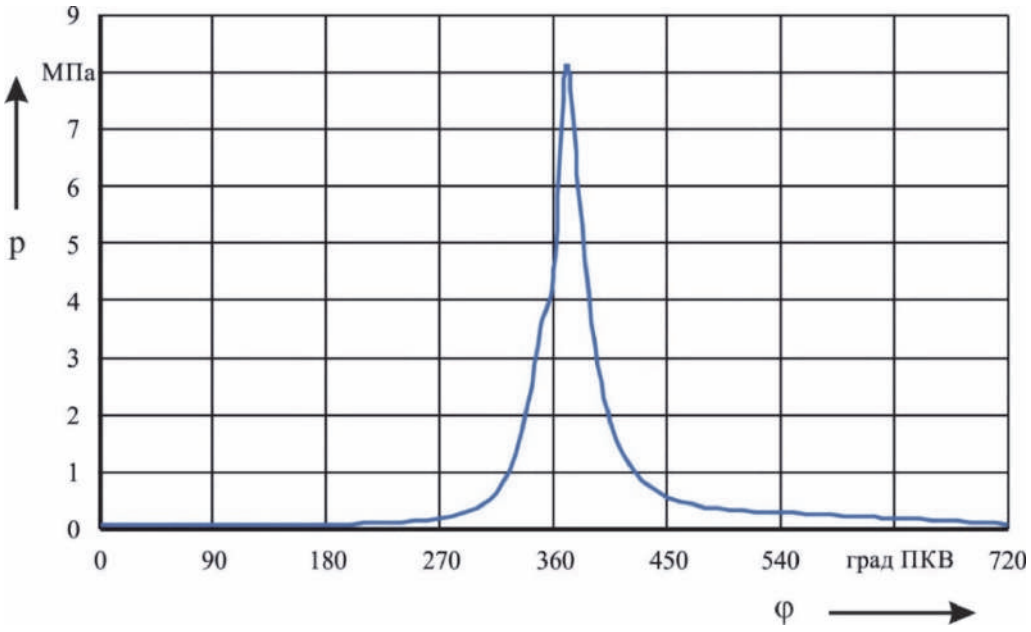


Рис. 1 – Индикаторная диаграмма дизеля 3LDG

В случае динамической нагрузки необходимо учитывать момент упругости ($M_{\text{упр}}$) и закручивающий момент инерции масс ($M_{\text{инер}}$), жестко связанных с коленчатым валом дизеля. Касательные напряжения, возникающие в сечении шатунной шейки, проходящем через ось маслоподводящего отверстия перпендикулярно оси шейки, определяются суммой моментов упругости и инерции масс, расположенных до рассматриваемой массы, а также половинной крутящего момента ($M_{\text{к}}$), создаваемого первым цилиндром:

$$M_{\Sigma} = M_{\text{упр}} + 0{,}5 \cdot M_{\text{к}} + M_{\text{инер}}.$$

Величина момента упругости, действующего на первую шатунную шейку рассчитывалась с помощью выражения:

$$M_{\text{упр}} = C_{\text{ш.ш}_1} \cdot \left(\Theta_{\text{ш.ш}_1} - \Theta_{\text{щ}_2} \right),$$

где $C_{ш.ш_1}$ – крутильная жесткость первой шатунной шейки;

$\Theta_{ш.ш_1}$ и $\Theta_{щ_2}$ – текущие значения углов закручивания соответственно первой шатунной шейки и второй щеки.

При расчете закручивающего момента инерции, нагружающего первую шатунную шейку (рис. 2), суммируются моменты инерции масс находящиеся правее шейки:

$$M_{инер} = \sum_{i=1}^{n} J_i \cdot \frac{d^2\Theta_i}{dt^2},$$

где J_i – момент инерции i-ой массы;

$\frac{d^2\Theta_i}{dt^2}$ – угловое ускорение i-ой массы, совершающей крутильные колебания;

n - количество рассматриваемых масс, находящихся правее первой шатунной шейки.

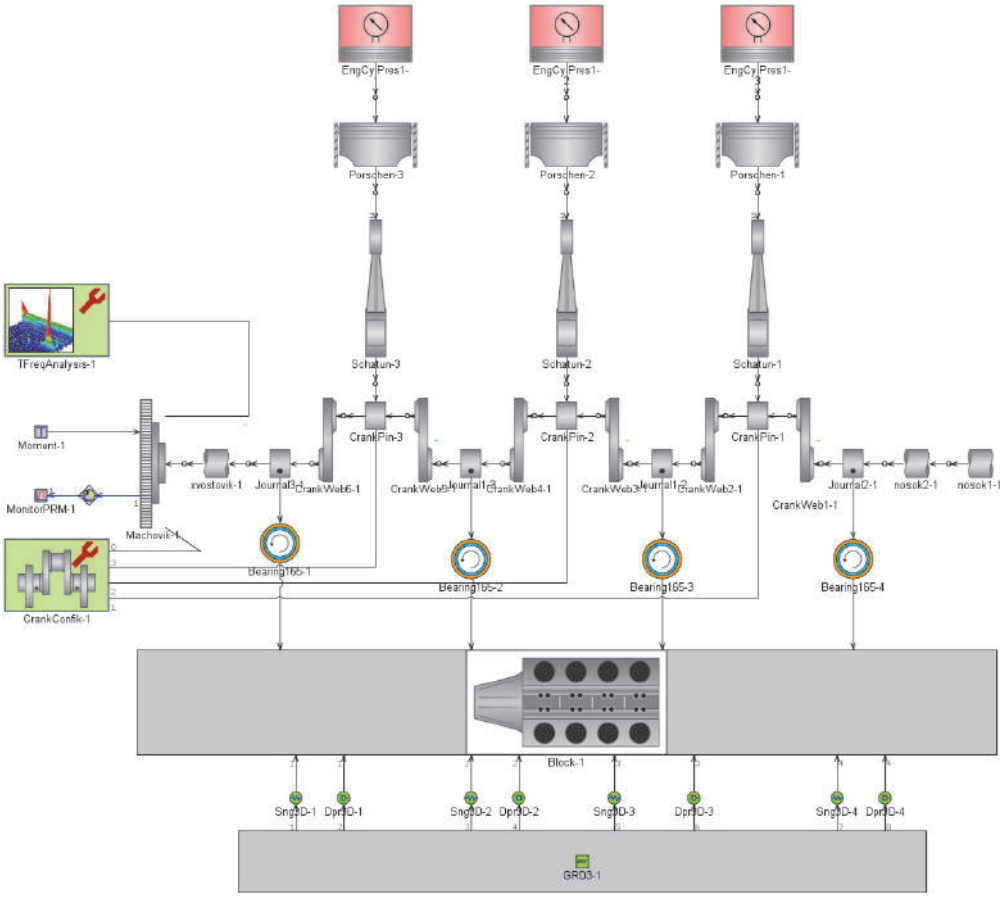


Рис. 2 – Схема крутильной системы дизеля 3LDG

Для решения поставленной задачи рассматривалась крутильная схема коленчатого вала, содержащая пять масс (четыре массы правее первой шатунной шейки и непосредственно сама шейка). Изменение моментов инерции каждой из масс и их сумма представлены на рисунке 3.

Результаты расчета крутящих моментов при статическом и динамическом нагружении коленчатого вала представлены на рисунке 4.

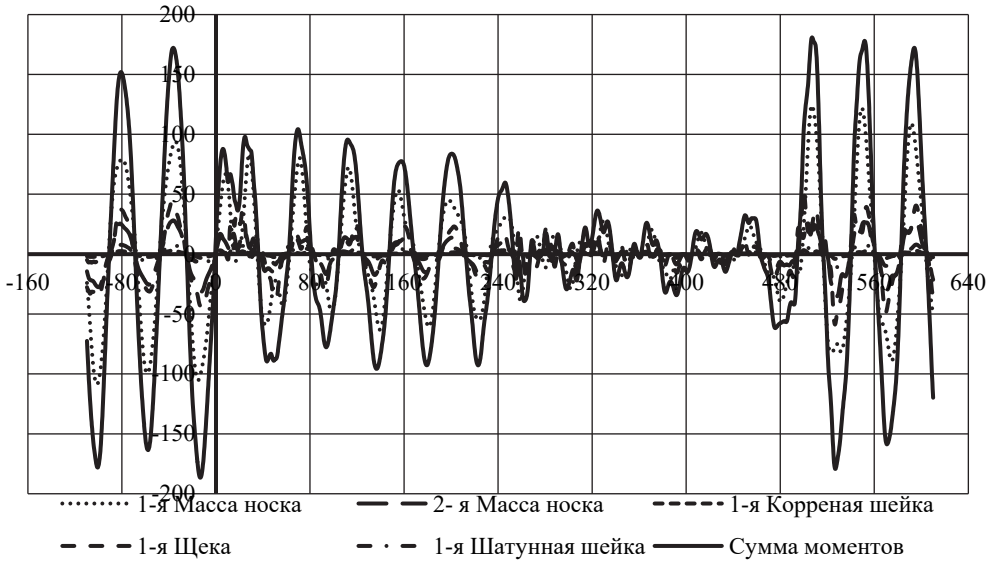


Рис. 3 – Изменение закручивающих моментов инерции масс (Н·м), расположенных правее первой шатунной шейки, самой шатунной шейки и их сумма в зависимости от угла поворота коленчатого вала (град ПКВ)

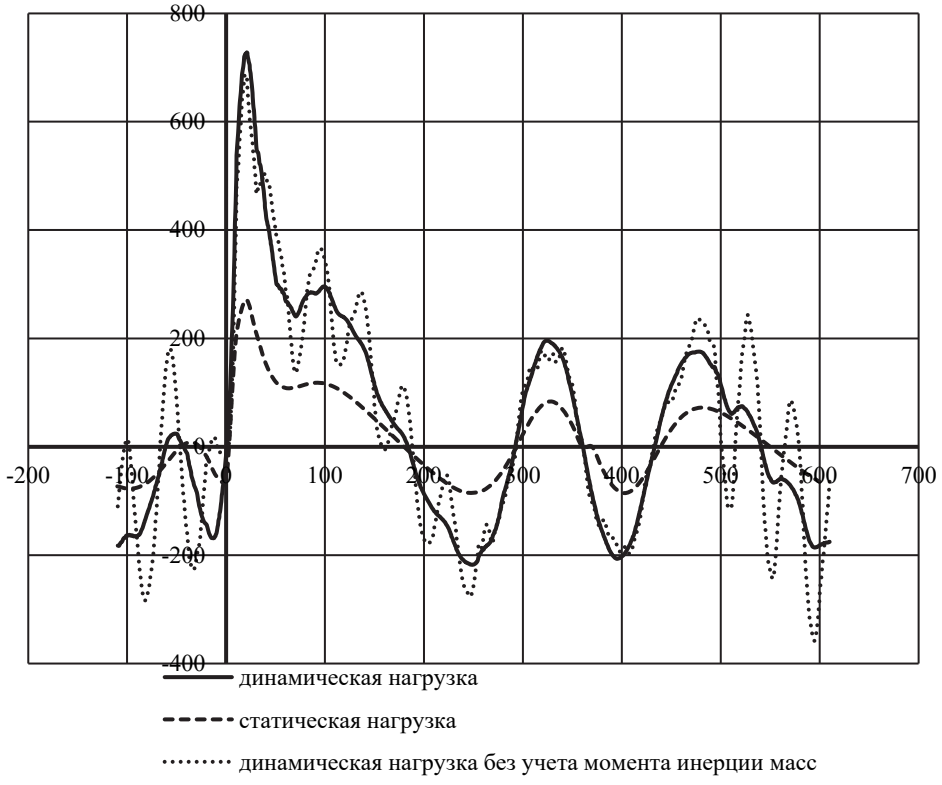


Рис. 4 – Изменение крутящего момента (Н·м), нагружающего шатунную шейку коленчатого вала, с учетом динамического и статического его нагружения в зависимости от угла поворота коленчатого вала (град ПКВ)

Касательные напряжения, возникающие в рассматриваемом сечении, определяются с помощь выражения:

$$\tau = \frac{M_\Sigma}{W},$$

где W – момент сопротивления сечения кручению.

Запас прочности конструктивных элементов коленчатого вала рассчитывается с помощью среднего значения касательных напряжение (τ_m) и ее амплитуды (τ_a) [2].

В случае статического нагружения среднее значение касательных напряжений и ее амплитуды равны:

$$\tau_m = 0{,}5 \cdot (\tau_{max} + \tau_{min}) = 0{,}5 \cdot \big(9{,}398 + (-16{,}508)\big) = -3{,}233 \text{ МПа}$$

$$\tau_a = 0{,}5 \cdot (\tau_{max} + \tau_{min}) = 0{,}5 \cdot \big(9{,}398 - (-16{,}508)\big) = 6{,}165 \text{ МПа}$$

- с учетом динамических факторов:

$$\tau_m = 0{,}5 \cdot (\tau_{max} + \tau_{min}) = 0{,}5 \cdot \big(25{,}154 + (-7{,}522)\big) = 8{,}816 \text{ МПа}$$

$$\tau_a = 0{,}5 \cdot (\tau_{max} + \tau_{min}) = 0{,}5 \cdot \big(25{,}154 - (-7{,}522)\big) = 16{,}338 \text{ МПа}$$

При неполном учете силовых факторов, нагружающих коленчатый вал, например, при исключении из рассмотрения моментов сил инерции масс, находящихся правее рассматриваемой шейки (рис. 2), изменятся среднее и амплитудное значение касательных напряжений следующим образом:

$$\tau_m = 0{,}5 \cdot (\tau_{max} + \tau_{min}) = 0{,}5 \cdot \big(23{,}792 + (-12{,}369)\big) = 5{,}712 \text{ МПа}$$

$$\tau_a = 0{,}5 \cdot (\tau_{max} + \tau_{min}) = 0{,}5 \cdot \big(23{,}792 - (-12{,}369)\big) = 18{,}081 \text{ МПа}$$

Амплитуда касательных напряжений при переходе от статического нагружения коленчатого вала к динамическому увеличивается более чем в 2,5 раза, среднее значение касательных напряжений в первой шейке коленчатого вала возрастает в 2,73 раза. Увеличение размаха крутящего момента при динамическом нагружении коленчатого вала необходимо учитывать при анализе прочности его конструктивных элементов.

Вместе с тем в случае исключения из анализа моментов инерции масс, совершающих крутильные колебания, увеличивается амплитуда касательных напряжений и снижается ее среднее значение, для рассматриваемого случае соответственно на 10,6 и 54,3%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Двигатели MMZ-3LDG, MMZ-3LDG.1 : ТУ BY 101326441.209-2013.

2. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – 4-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2008. – 498 с.: ил.

3. Яманин, А.И., Жаров, А.В. Динамика поршневых двигателей: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2003. 464 с.

УДК 631.3:004.896

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

К.С. Деблик, С.В. Рогов
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Современное сельское хозяйство переживает технологическую трансформацию, вызванную необходимостью повышения производительности, снижения затрат и минимизации влияния человеческого фактора. В условиях роста мирового населения и ограниченности ресурсов автоматизация и цифровизация аграрных процессов становятся не просто желательными, а жизненно необходимыми. Одним из ключевых направлений этой трансформации является внедрение интеллектуальных систем управления в сельскохозяйственную технику — тракторы, комбайны, опрыскиватели и другие машины.

Интеллектуальные системы управления представляют собой совокупность аппаратных и программных решений, способных собирать, анализировать и интерпретировать данные в реальном времени. Они используют методы искусственного интеллекта, машинного обучения, компьютерного зрения и граничных вычислений (Edge Computing) для принятия оптимальных решений по управлению сельхозмашинами.

Такие системы включают:

- датчики и сенсоры для мониторинга окружающей среды и состояния техники;
- модули обработки данных;
- алгоритмы принятия решений;
- интерфейсы взаимодействия с оператором или другими машинами.

Интеграция интеллектуальных систем в сельскохозяйственное машиностроение обеспечивает ряд значительных преимуществ:

- повышение точности операций: автоматическая настройка рабочих органов техники в зависимости от условий поля позволяет минимизировать потери и повысить качество обработки почвы, посева и сбора урожая.
- снижение расхода топлива: оптимизация маршрутов движения и режимов работы двигателя снижает энергозатраты.
- уменьшение износа техники: своевременное выявление неисправностей и адаптация режимов работы продлевают срок службы машин.

- снижение нагрузки на оператора: полуавтономные и автономные системы позволяют оператору сосредоточиться на контроле, а не на ручном управлении.

Одним из ярких примеров является разработка интеллектуальной системы управления сельскохозяйственными роботами, предложенная Старостиным И.А. и коллегами. Система использует граничные вычисления для обработки данных непосредственно на борту машины, что позволяет снизить зависимость от облачных сервисов и повысить надежность работы в условиях слабой связи [2].

Также в Беларуси активно развиваются технологии интеллектуального управления в рамках проектов ОАО «Гомсельмаш», где внедряются системы автоматического контроля и навигации для комбайнов и тракторов [1].

По данным аналитиков, объем мирового рынка цифрового сельского хозяйства в 2023 году составил $16,2 млрд, а к 2028 году ожидается рост до $25,4 млрд [3]. В России и Беларуси также наблюдается активное развитие: к 2026 году планируется цифровизация отрасли на 50%, а к 2028 году — полная трансформация. Внедрение ИИ стало одним из условий получения государственных субсидий для крупных агропредприятийagbz.ru.

Интеллектуальные системы включают следующие ключевые технологии:

- интернет вещей (IoT) — обеспечивает сбор данных с датчиков и их передачу в систему управления.
- искусственный интеллект и машинное обучение — позволяют анализировать большие объемы информации и предсказывать оптимальные сценарии работы.
- геоинформационные системы (ГИС) — используются для точного позиционирования техники и планирования маршрутов.
- граничные вычисления (Edge Computing) — обеспечивают автономную обработку данных без необходимости постоянного подключения к облаку.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение интеллектуальных систем сталкивается с рядом вызовов:

- высокая стоимость оборудования и программного обеспечения;
- необходимость подготовки квалифицированных кадров;
- проблемы совместимости между различными системами и производителями;
- риски кибербезопасности и защиты данных.

В ближайшие годы ожидается активное развитие следующих направлений:

- создание полностью автономных сельхозмашин;
- интеграция с беспилотными летательными аппаратами для мониторинга полей;

- развитие систем предиктивного обслуживания;
- внедрение блокчейн-технологий для отслеживания цепочек поставок.

Интеллектуальные системы управления в сельскохозяйственном машиностроении — это не просто технологическая новинка, а стратегически важный элемент устойчивого развития аграрного сектора. Их внедрение позволяет значительно повысить эффективность, снизить затраты и обеспечить продовольственную безопасность в условиях глобальных вызовов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веремеев Д. О. Интеллектуальные системы в сельскохозяйственном машиностроении / Д. О. Веремеев // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сборник тезисов докладов IV Международной научно-практической конференции, Гомель, 4 ноября 2020 г. – Гомель : НТЦК ОАО «Гомсельмаш», 2020. – С. 59–60.

2. Старостин И. А., Давыдова С. А., Ещин А. В. Интеллектуальная система управления сельскохозяйственными роботами: формирование структуры // Агроинженерия. – 2023. – № 3.

3. Шадрин К. Интеллектуальные технологии в сельском хозяйстве // АгроБизнес. – 2024.

УДК 631.3:004.896

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В СТАНКОСТРОЕНИИ

К.С. Деблик, С.В. Рогов
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Станкостроение — одна из базовых отраслей промышленности, обеспечивающая средства производства для машиностроения, авиации, энергетики и других секторов. В условиях цифровой трансформации и стремительного развития технологий, интеллектуальные системы становятся ключевым фактором повышения эффективности, гибкости и конкурентоспособности станкостроительных предприятий.

Попытки интеграции интеллектуальных алгоритмов в управление станками начались ещё в XX веке. Советская инженерная школа активно обсуждала взаимодействие человека и машины, вводя понятия «технический субстрат» и «гибридный интеллект» [1]. Сегодня интеллектуальные системы представляют собой совокупность алгоритмов ИИ, сенсорных устройств, цифровых моделей и машинного обучения, способных адаптироваться к изменяющимся условиям производства.

Согласно исследованию НИУ ВШЭ, ключевыми направлениями цифровой трансформации станкостроения являются:

- Автоматизация производственных процессов;
- Внедрение цифровых двойников;
- Предиктивное обслуживание;
- Периферийные вычисления;
- Интеграция робототехнических систем [2].

Эти технологии позволяют перейти от традиционного управления к безлюдному производству, где операторы выполняют функции мониторинга и стратегического управления.

Цифровой двойник — это виртуальная модель станка, полностью воспроизводящая его механическую структуру и операции. Компании Siemens и FANUC разработали решения, позволяющие отслеживать состояние компонентов, выявлять сбои и проводить профилактику оборудования [2]. Это снижает риски простоев и увеличивает срок службы техники.

Примером успешного внедрения ИИ является система Sonic Shark от Hufschmied (Германия), использующая звуковые датчики и алгоритмы машинного обучения для прогнозирования износа оборудования с точностью до 3% [2].

Интеллектуальные роботы — автономные системы, оснащённые ИИ, сенсорикой и средствами обработки данных. Они способны:

- Самостоятельно адаптировать режим работы;
- Проводить самодиагностику;
- Обучаться на основе накопленного опыта;
- Интегрироваться с другими производственными системами [3].

Совмещение интеллектуальных роботов с аддитивными технологиями (3D-печатью) позволяет создавать гибкие производственные линии, способные быстро адаптироваться к новым требованиям и индивидуальным заказам.

Преимущества внедрения интеллектуальных технологий:

- рост точности обработки: интеллектуальные алгоритмы позволяют минимизировать погрешности и обеспечить высокое качество продукции;
- оптимизация затрат на техническое обслуживание: системы предиктивного анализа позволяют заранее выявлять потенциальные неисправности и снижать расходы на ремонт;
- увеличение производственной эффективности: автоматизация и адаптивное управление ускоряют производственные циклы и повышают общую производительность;
- гибкость перенастройки оборудования: интеллектуальные системы обеспечивают быструю адаптацию станков под новые задачи без длительных простоев.

Трудности и ограничения внедрения:

- высокие инвестиционные затраты: внедрение интеллектуальных решений требует значительных финансовых вложений в оборудование и программное обеспечение;
- необходимость переквалификации персонала: сотрудники должны обладать новыми компетенциями для работы с цифровыми системами и ИИ;
- сложности интеграции с устаревшими технологиями: сопряжение новых интеллектуальных платформ с существующей инфраструктурой может вызвать технические и организационные проблемы;
- риски киберугроз и утечки данных: цифровизация производства требует усиленной защиты информации и устойчивости к внешним атакам.

Будущее станкостроения связано с дальнейшей интеграцией ИИ, развитием нейросетевых алгоритмов, расширением применения цифровых двойников и переходом к полностью автономным производственным комплексам. В условиях глобальной конкуренции и технологического суверенитета, интеллектуальные системы становятся не просто инструментом, а стратегическим ресурсом.

Интеллектуальные системы в станкостроении — это не просто технологическая инновация, а фундаментальная трансформация отрасли. Их внедрение открывает новые горизонты эффективности, устойчивости и

адаптивности производства. Важно не только следовать мировым трендам, но и формировать собственные решения, учитывающие специфику национальной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Как ИИ изменит станкостроение [Электронный ресурс] // Хабр. – URL: https://habr.com/ru/articles/910448/ (дата обращения: 30.09.2025).

2. Топ-7 направлений цифровой трансформации станкостроения [Электронный ресурс] // RobotUnion. – URL: https://robotunion.ru/glavnaya/tpost/c0mh8g1fi1-top-7-napravlenii-tsifrovoi-transformats (дата обращения: 30.09.2025).

3. Интеллектуальные роботы и аддитивные технологии [Электронный ресурс] // Sonatal. – URL: https://sonatal.ru/intellektualnye-roboty-v-stankostroenii-razvitie-additivnyh-tehnologiy-dlya-gibkoy-adaptatsii-proizvodstvennyh-liniy/ (дата обращения: 30.09.2025).

УДК 669.79

СРАВНИТЕЛЬНЫХ СПОСОБЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ЛИТЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ВТУЛОК

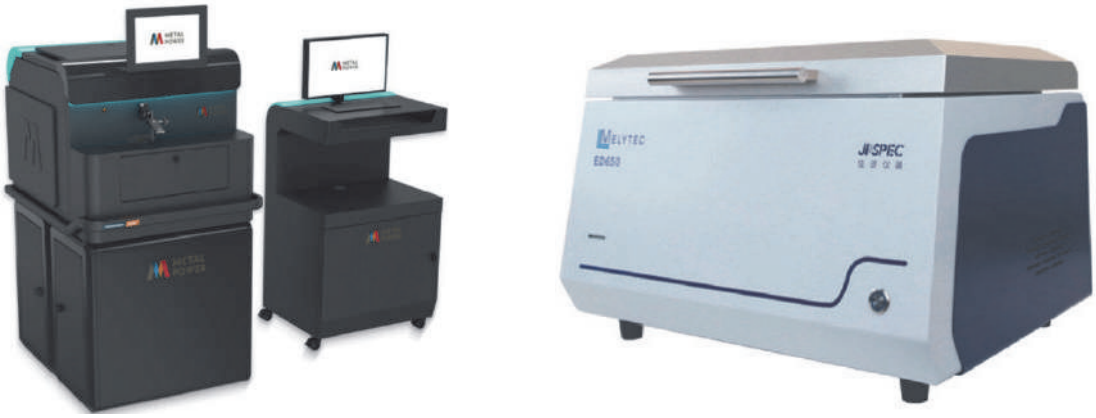
В.А. Калиниченко, С.Д. Шатилло
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

Для обеспечения надежности узлов трения используются втулки скольжения на основе медьсодержащих сплавов. Медь и ее сплавы характеризуются высокими антифрикционными свойствами. Однако ее физико-механические свойства довольно низкие, что ограничивает ее применение в высоконагруженных узлах трения и при повышенной температуре. Как результат имеет смысл использование композиционных материалов (КМ) применяются в различных отраслях промышленного производства [1-3].

На данный момент широко используют такие методы как: перемешивание с помощью импеллера, замешивание позволяющее получать изделия, армированные до 30 % по объему частицами размером 5-100 мкм, вдувание инертного газа, метод пропитки, ультразвуковое перемешивание, электромагнитное перемешивание, вибрационное перемешивание, ввод при помощи колокольчика [4]. Объектом исследований являлся микрогетерогенный КМ (МКМ) на основе бронзы БрКМц3-1, армированный гранулами карбида кремния фракции 100-300мкм полученная способом перемешивания.

Для надежности работы любого изделия немаловажным фактором является стабильность и повторяемость его свойств, а также, достоверность методики их оценки. Для анализа химического состава образцов КМ было принято решение, о сравнении двух измерительных приборов, работающих на принципе оптико-эмиссионного спектрометрии и рентгенофлуоресцентной энергодисперсионной спектрометретрии. Для работы были использованы аппараты Metavision 1008i3 (Индия) специализированный искрового оптико-эмиссионного спектрометр и настольный энергодисперсионный спектрометр Melytec ED650 (КНР).

Metavision 1008i3 – специализированный спектрометр, предназначенный для измерения химического состава металлов. Он позволяет контролировать содержание легирующих элементов и микропримесей на уровне 5–10 ppm. Прибор обладает возможностью одновременной установки до 11 основ. Позволяет производить измерения азота и кислорода от 10 ppm, а также возможность измерения растворимых и нерастворимых включений (Al, Ti, B, Ca и т. д.) от 10 ppm. В опции прибора встроена возможность добавления новых основ и элементов, расширения и построения калибровок.

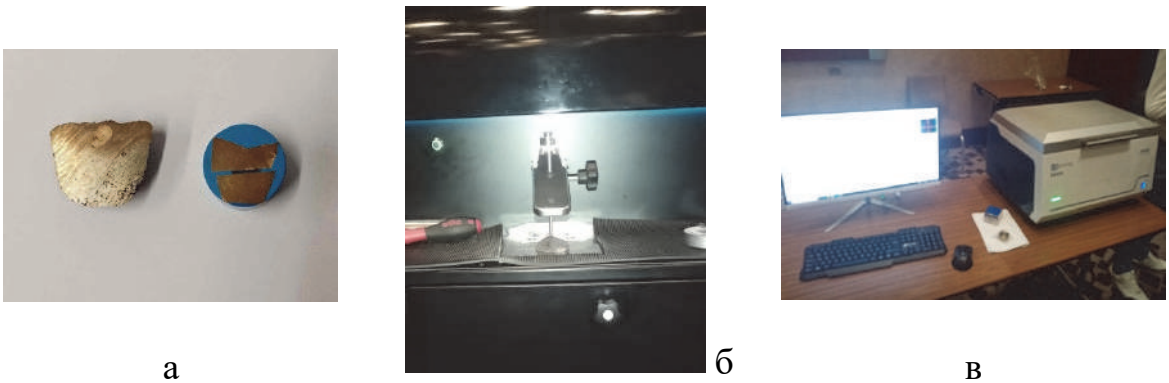


а б

Рис. 1 – Внешний вид анализаторов.
а - общий вид настольного искрового оптико-эмиссионного спектрометра Metavision 1008i3, б - настольный энергодисперсионный спектрометр Melytec ED650.

Melytec ED650 это компактный высокопроизводительный рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный спектрометр классического типа. Предназначен для элементного анализа массивных, порошковых, спрессованных и сплавленных образцов. Прибор позволяет производить измерения в различных газовых средах: воздух, вакуум, гелий, азот и обладает возможностью передачи данных измерений в заводскую сеть предприятия. Диапазон измерения массовой доли элементов (от C до Am) от 0,0001 до 100 %/

Для оценки пригодности приборов для анализа КМ были изготовлены пробы, отлитые из одной плавки. Проба была разрена с помощью отрехного круга, причем одна ее половина не подвергалась дальнейшей обработке, а вторая была залита в модельный пластик и отшлифована (рис. 2а).

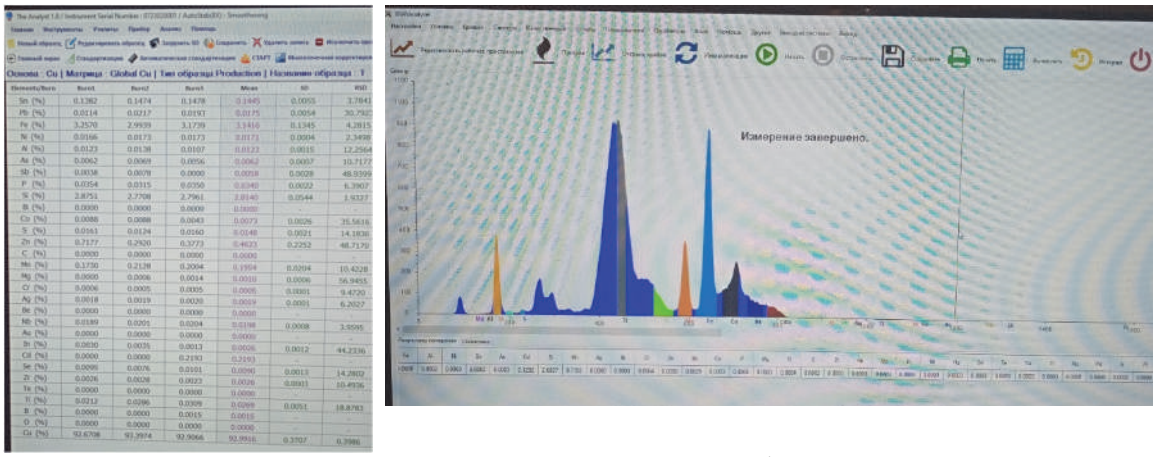


а б в

Рис. 2 – Проведение анализа химического состава.
а – образцы для испытаний, б – образец, установленный в спектрометре Metavision 1008i3, в – образец, установленный в спектрометре Melytec ED650.

Исходя из способов подготовки образцов получилось, что образец подвергнутый резке был легко применим к обоим спектрометрам и даже не смотря на свою коническую форму легко в них устанавливался (рис. 2б и 2в). Образец, прошедший металлографическую обработку, оказался не подходящим для настольного искрового оптико-эмиссионного спектрометра Metavision 1008i3, так как был покрыт электроизолятором.

Далее у образцов подходящих для проведения измерений был проанализирован химический состав. В обоих случаях время измерения составило около 10 минут. Однако на настольном искрового оптико-эмиссионном спектрометре Metavision 1008i3 был проведен анализ по трем точкам с их усреднением (рис. 4а), в то время как на спектрометре Melytec ED650 только одно. Данный факт определялся необходимостью времени ожидания на создание подходящей атмосфере в камере для проведения исследований. Визуализация данных с обоих приборов представлена на рис. 4.



а б

Рис. 4 – Визуализация данных исследований.
а – спектрометр Metavision 1008i3, б –спектрометр Melytec ED650.

Данные полученные с обоих приборов сведены в сборную таблицу 1. Как видно из таблицы оба прибора имеют широкий спектр анализируемых металлов в том числе и редких. Вызывает некоторое сомнение наличие в образцах Ta, Te и Hg обнаруженного спектрометром Melytec ED650. Однако возможность проведения с его помощью анализа негабаритных деталей характеризует его с положительной стороны. Вызывает сожаление, что данные приборы являются частично применимыми для анализа КМ, так как настроены на определение чистых элементов, а не карбидов или оксидов часто выступающих в виде армирующей составляющей КМ.

При определении качества анализа матрицы можно сравнить полученные значения с исходным составом бронзы БрКМц3-1 по ГОСТ 18175-78.

Табл. 1. Химический состав материала, определенный разными технологиями.

Химический элемент	Содержание в образце, %	
	спектрометр Melytec ED650 (рентген)	спектрометр Metavision 1008i3 (лазер)
Cu	**93.3912**	**92.9916**
Pb	0.0002	0.0175
Fe	3.0608	3.1416
Al	0.0002	0.0123
Ni	0.0003	0.0171
Sn	0.0002	0.1445
As	0.0003	0.0062
Cd	0.1202	0.2193
Si	**2.6827**	**2.8140**
Mn	**0.7193**	**0.0010**
Ag	0.0060	0.0019
Bi	0.0003	0.0000
Cr	0.0004	0.0005
Zn	0.0000	0.04623
Sb	0.0029	0.0058
Co	0.0003	0.0073
P	0.0006	0.0340
Mg	0.0003	0.0010
Ti	0.0004	0.0269
S	0.0003	0.0148
Zr	0.0003	0.0026
Nb	0.0003	0.0198
Mo	0.0003	-
In	0.0003	0.0026
W	0.0003	-
Hg	0.0003	-
Se	0.0003	0.0090
Te	0.003	0.0000
Ta	0.0003	-
Tl	0.0003	-
Ru	0.0000	-
Pb	0.0000	-
Ir	0.0000	-
Pt	0.0000	-
C	-	0.0000
B	-	0.0015

Основными легирующими элементами являются Si по ГОСТ 2,7-3,5%, рентгеновский спектрометр показал 2,68%, а лазерный 2,81%. Исходя из ГОСТ содержание Mn составляет 1,0-1,5% при этом рентгеновский спектрометр показал 0, 71%, а лазерный 0,001%.

Вывод. Изученные приборы не подходят для анализа КМ, но в качестве экспресс анализа вполне применимо, особенно в цеховых условиях, если не требуется высокая достоверность данных. При этом наиболее приемлемым является прибор спектрометр Metavision 1008i3, так как практически не имеет ограничений на габаритный размер детали и дешевле своего аналога на 25%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрушевич, А. А. Литейная технология изготовления деталей сельскохозяйственной техники из композиционных материалов / А. А. Андрушевич, В. А. Калиниченко // Мат. МНТК «Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК»; Минск 7–8 июня 2018 г. – Минск: БГАТУ, 2018. – С. 225 – 228.

2. Калиниченко В.А. Литые композиционные материалы: состояние и перспективы получения / Калиниченко В.А., Андрушевич А.А. // Литье и металлургия. 2022. №4. – С. 79–87.

3. Калиниченко В.А. Технологические подходы создания литых композиционных материалов на основе меди. / Калиниченко В.А., Андрушевич А.А. // Литейщик России. №7. 2020. – С. 38–41.

4. Материаловедение композиционных и порошковых материалов: учебное пособие / А.А. Кузина, Е.А. Носова. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 92 с.

УДК 669.79

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАЛИВКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.А. Мацинов, В.А. Калиниченко
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

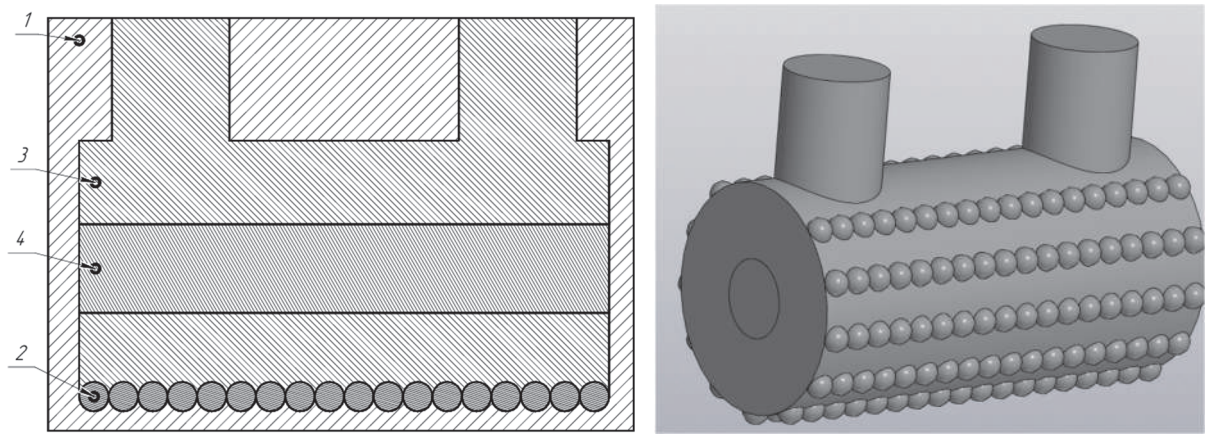
Для увеличения срока службы фрикционных узлов возможно как использование износостойких бронз типа БрАЖ, так и композиционных материалов (КМ) на основе цветных сплавов, а том числе и меди [1, 2]. Данный тип материалов сочетающий и во многом превышающий по свойствам материалы его оставляющие применяется в различных отраслях промышленности для тяжелонагруженных узлов трения [3]. Как показывает практика, весьма перспективна заливка в горизонтальные формы что обусловлено легкостью их прогрева в типовых термических печах. Для исследования была использована стандартная форма представленная на рис. 1а, которая после заливки была разрезана в продольном направлении рис.1б.

а б

Рис. 1 – Горизонтальная форма.
а – перед, б – после заливки.

В районе зоны заливки и в самом теле отливки наблюдается рассредоточенная пористость, при этом в области выпора она достигает своего максимума. Для проверки качества современных моделирующих программ было принято залить данную отливку виртуально. Модели реальной отливки, для виртуальной заливки, были созданы в системе трехмерного проектирования КОМПАС-3D (рис. 2).

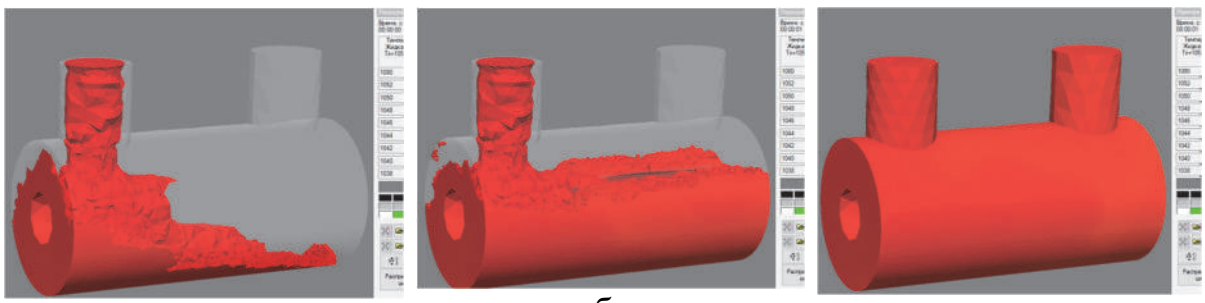
Виртуальная заливка моделей осуществлялась в системе компьютерного моделирования литейных процессов PoligonSoft. СКМ ЛП «ПолигонСофт» – пакет математических моделей, позволяющих моделировать заполнение формы расплавом, перенос тепла (теплопроводностью, конвекцией и излучением), затвердевание отливки, образование усадочных дефектов раковины, макро- и микропористость.



а б

Рис. 2 – Втулка с дробью в горизонтальная форма.
1 – Форма (Сталь 45Л); *2* – Чугунная дробь (10мм); *3* – Бронза (БрА9Мц2Л); *4* – Стержень (Сталь 45Л)

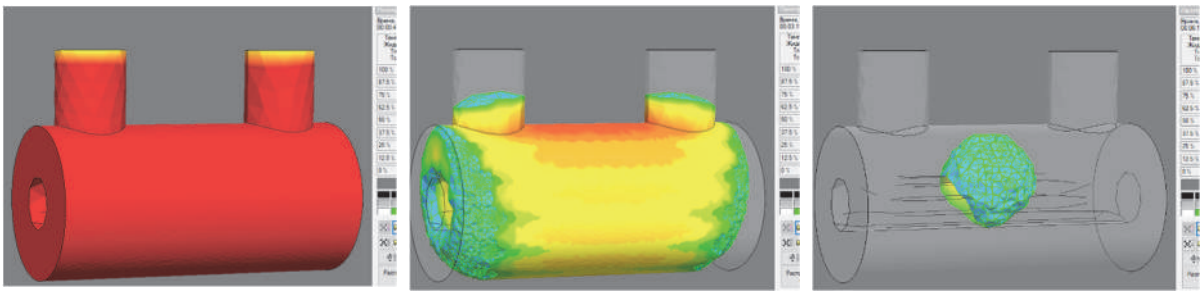
За исходные параметры для всех заливок были взяты следующие параметры: материал формы – Сталь 45Л; заливаемый металл – бронза БрА9Мц2Л; внутренний стержень – Сталь 45Л. Скорость заливки составила – 1 м/с. Температура заливаемого металла и формы – 1080 °С. После задания всех нужных параметров программа PoligonSoft производит вычисление трех показателей: течение металла (заливка); охлаждение отливки; пористость (усадка). Процесс заливки металла представлен на рисунке 3.



а б в

Рис. 3 – Показатели заливки.

На рисунке 3 мы можем наблюдать, что отливка заполняется корректно и полностью, время заливки – 2 секунды. Процесс охлаждения отливки характеризуется лишь небольшим смешением области, которая охлаждается в последнюю очередь, и временем охлаждения составляющего 406 секунд (рис. 4).



а б в

Рис. 4 – Показатели охлаждения.

Как видно, из рис. 4 фронты охлаждения идут от сторон у центру, не смотря на полый центральный стержень, способствующий вентиляции отливки. По окончанию процесса охлаждения окончательное распределение пористости представлено на рис. 5.

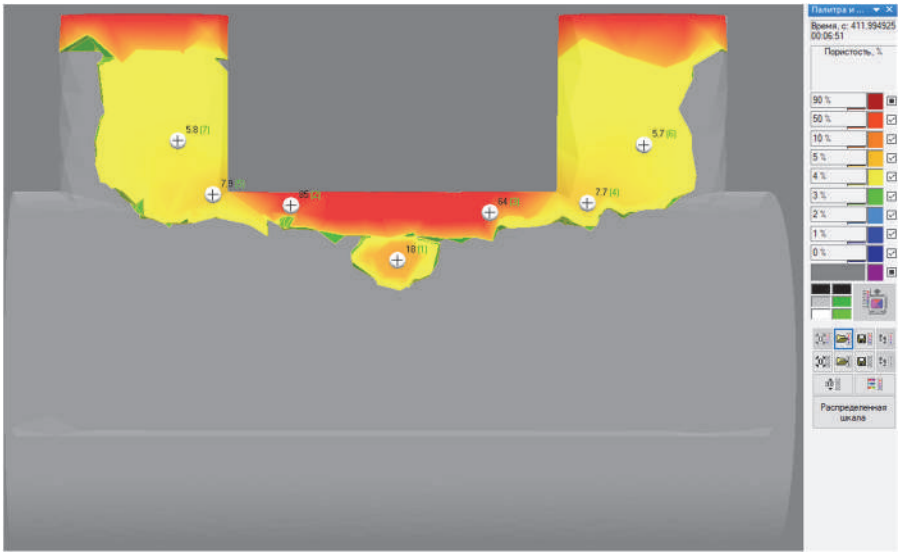


Рис. 5 – Показатели пористости (усадки) при заливке в горизонтальную форму при температуре разогрева формы 1080°С.

Вывод. Проведенная компьютерная заливка показывает целый ряд схожих моментов с полученной реальной отливкой. Полное сходство наблюдается в зонах контакта подвода металла и выпора с заготовкой втулки после заливки (рис. 1б) и на компьютерной модели (рис. 5)

характеризующееся повышенной пористостью и несплошностью полученной отливки. Однако при сравнении тела отливки, в реальном изделии превалирует рассредоточенная пористость, в отличии от сконцентрированной пористости по центру отливки в модели. Не смотря на это необходимо отметить приемлемую точность использованного программного обеспечения для прогнозирования дефектов в отливках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калиниченко В.А. Литые композиционные материалы: состояние и перспективы получения / Калиниченко В.А., Андрушевич А.А. // Литье и металлургия. 2022. №4. – С. 79–87.

2. Калиниченко В.А. Технологические подходы создания литых композиционных материалов на основе меди. / Калиниченко В.А., Андрушевич А.А. // Литейщик России. №7. 2020. – С. 38–41.

3. Андрушевич, А. А. Литейная технология изготовления деталей сельскохозяйственной техники из композиционных материалов / А. А. Андрушевич, В. А. Калиниченко // Мат. МНТК «Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК»; Минск 7–8 июня 2018 г. – Минск: БГАТУ, 2018. – С. 225 – 228.

УДК 621.785.1

УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВА СТАЛИ 45 С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ

Д.М. Гуцев[1], В.Г Кудрицкий[1], И.В. Царенко[2]
[1] Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь
[2]Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Введение. Повышение износостойкости поверхностей трения традиционно остаётся одной из ключевых задач машиностроительных технологий. По известным данным значительная часть мощности машин расходуется на преодоление работы сил трения [1]. На сегодняшний день существует огромный арсенал технологий, направленных на повышение износостойкости: легирование специальными дорогостоящими материалами, объёмная или поверхностная ТВЧ закалка, наплавка высокотвёрдыми износостойкими материалами с последующей механообработкой, химико-термическая обработка, как, например, хромирование, азотирование или цементация поверхности и т.д. [2—4] Эти процессы широко известны, и в определённой степени повышают износостойкость и срок службы деталей. Однако они достаточно трудоёмки, энерго- и материалоёмки, имеют продолжительный технологический цикл.

Одним из возможных вариантов повышения износостойкости быстроизнашивающихся участков поверхностей деталей является технология локального лазерного упрочнения, позволяющая повысить износостойкость и срок службы деталей без применения дорогостоящих расходных материалов, без необходимости трудоёмких и энергоёмких подготовительных и последующих доводочных операций [5—7].

Повышение износостойкости поверхности после лазерной закалки достигается за счёт структурно-фазовых изменений поверхностного слоя на глубину 0,3—1,0 мм без оплавления поверхности, без нарушения макро- и микрогеометрии поверхности детали. В случае оплавления поверхности глубина структурно-фазовых изменений может достигать 3,0 мм. Такая возможность обеспечивается за счёт заданного распределения плотности мощности в пятне излучения. Благодаря возможности локального упрочнения, высокой скорости обработки и автоматизации, лазерное поверхностное термоупрочнение отличается коротким технологическим циклом, относительно низкой удельной энерго-, трудо-материалоёмкостью и, соответственно, низкой стоимостью.

Несмотря на многолетние исследования в области лазерного упрочнения поверхности и на сегодня остаётся актуальной задача оптимизации режимов лазерной обработки, изучения особенностей воздействия лазерного импульса на структуру поверхности и её свойства, [8–9].

Данная работа посвящена выработке технологического режима упрочнения стали 45 лазерной закалкой с целью повышения ее триботехнических характеристик.

Цель работы. Оценить влияние технологических параметров процесса лазерной обработки поверхности стали 45 на её триботехнические характеристики и разработке рекомендаций для получения максимальной износостойкости.

Материалы и методы исследований. Исследуемые образцы — шайбы диаметром 40 мм, толщиной 10 мм из стали 45с параметром шероховатости *Ra* 2,5.

Лазерную обработку проводили на экспериментальной технологической установке на базе твердотельного лазера TL-400 [10]. Лазерное излучение генерировалось в кристаллах алюмоиттриевого граната АИГ: Nd^{+3}. Длина волны излучения 1,064 мкм, максимальное значение средней мощности 400 Вт. Диаметр лазерного пучка на выходе из резонатора $6 \cdot 10^{-3}$ м.

Триботехнические испытания проводились с помощью микротрибометра MTU-2K7 [11] по схеме сфера-плоскость при возвратно-поступательном движении сферы-контртела относительно плоскости исследуемого образца. Износ поверхности трения определялся прямым измерением ширины дорожки трения Н.

При проведении триботехнических испытаний оценивался коэффициент трения f и износостойкость образца по ширине дорожки трения Н. Ширину дорожки трения Н определяли прямым измерением на растровом электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan, Чехия) при увеличениях от 100 до 5000. Элементный анализ проводился методом EDX (энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии) на этом же микроскопе с использованием приставки INCA X-act (Oxford Instruments, Англия).

Определение микротвердости проводили на микротвёрдомере ПМТ-3М (ЛОМО, Россия) по методу Виккерса. Измеренные результаты были конвертированы в шкалу Роквелла с использованием корреляции по стандарту ASTM E-140.

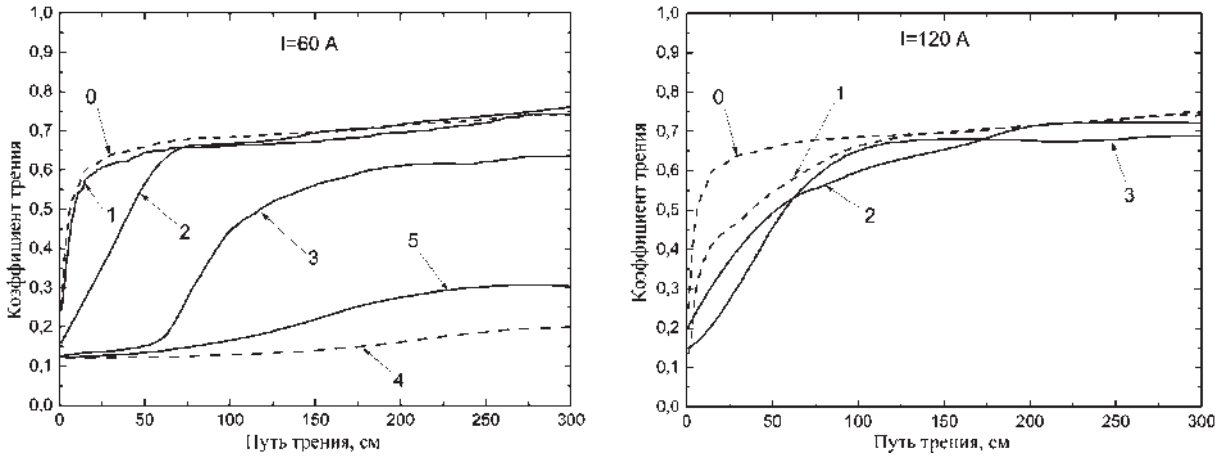
Энергия лазера в импульсе определялась с помощью измерителя энергии ИКТ1-Н.

Результаты исследований и их обсуждение. В таблице 1 представлена оценка влияния параметров технологических режимов лазерной обработки (тока накачки I, длительности импульса τ) на значения

энергии в импульсе Е, передаваемой на обрабатываемую поверхность. Изменение силы тока в диапазоне 60—120 А и времени импульса от 5 до 25 мс позволило получать изменение энергии в импульсе в пределах от 0,3 Дж до 4,1 Дж. Согласно полученным результатам одну и ту же энергию можно передать поверхности с помощью различных комбинаций значений I/τ. Так, например, энергетический импульс в 0,8 Дж поверхность может получить при её обработке либо током 60 А в течении 15 мс, либо током 120 А в течении 5 мс. Изучение морфологии поверхностей методом микроскопии показало, что обработанные одинаковой энергией, но различными режимами воздействия поверхности имеют существенные различия. Эти же различия прослеживаются и при триботехнических испытаниях (Рисунок 1 а, б)

Табл.1 Зависимость энергии в импульсе Е (Дж) от времени импульса τ (мс) и тока накачки I (А)

Ток накачки *I*, А	Энергия в импульсе *E* (Дж) в зависимости от времени импульса τ (мс)				
	5	10	15	20	25
60	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2
120	0,8	1,4	2,0	3,5	4,1



а) б)

Рис. 1 — Зависимости влияния режимов обработки на коэффициент трения: на рисунке «а»-0 — исходная поверхность; 1 — после обработки энерги-ей 0,3 Дж, 60 А/5 мс; 2 — 0,5 Дж, 60 А/10 мс; 3 — 0,8 Дж, 60 А/15 мс; 4 — 1,0 Дж, 60 А/20 мс; 5 — 1,2 Дж, 60 А/25 мс; на рисунке «б»-0 — исходная поверх-ность;1 — 0,8 Дж, 120 А/5 мс; 2 —1,4 Дж, 120 А/10 мс; 3 — 2,0 Дж, 120 А/15 мс

Табл.2 Триботехнические характеристики образцов до и после лазерной обработки

N	Параметры лазерной обработки			Триботехнические характеристики			HRC	*H*, мкм
				Зона приработки		Зона установившегося трения		
	I, А	τ, мс	*E*, Дж	f_{50}	V_K	*f*		
0	0	0	0	0,6	11,4	0,75	35	511
1	60	5	0,3	0,6	8,1	0,75	45	493
2	60	10	0,5	0,46	1,7	0,73	57	487
3	60	15	0,8	0,14	0,1	0,64	66	458
4	60	20	1,0	0,12	0,05	0,20	75	390
5	60	25	1.2	0,12	0,08	0,30	67	451
6	120	5	0,8	0,5	11,4	0,75	53	472
7	120	10	1,4	0,46	2,5	0,72	63	462
8	120	15	2,0	0,42	2,1	0,70	72	410

Согласно результатам триботехнических испытаний на графиках зависимостей коэффициента трения от пути трения испытания (Рис. 1) можно выделить две зоны влияния режимов лазерной обработки на коэффициент трения:

- зона приработки, характеризуемая коэффициентом трения до 50 см пути трения –f50, и скоростью роста коэффициента трения Vf (скоростью приработки), оцениваемого по значению тангенса угла наклона прямолинейного начального участка кривой трения;

- зона установившегося трения, характеризуемая значением коэффициента трения f после 50 см пути трения.

Анализ рассматриваемых характеристик зоны приработки показал: с увеличением длительности импульса лазерной обработки уменьшается и коэффициент трения при приработке f50 и скорость роста коэффициента трения Vf (скорость приработки). Интересно отметить при повышении длительности лазерного импульса появление низких значений коэффициента трения уже в зоне приработки.

Эта же тенденция влияния длительности импульса на триботехническое поведение поверхности сохраняется и в зоне установившегося трения: с увеличением τ значения коэффициента трения f сначала уменьшается, но только до определенных значений длительности импульса. Для тока накачки 60 А – это 20 мс. Увеличение длительности импульса более 20 мс приводит к обратно к росту коэффициента трения f. Объяснение такому влиянию времени обработки было получено при анализе морфологии поверхности образцов после различных режимов обработки и будет приведено ниже. Таким образом, влияние длительности импульса на триботехнические характеристики носит экстремальный характер. При токе накачки 60 А минимальный коэффициент трения 0,2 был получен при длительности импульса 20 мс.

Увеличение тока накачки до 120 А не привело к значительному улучшению триботехнических параметров. Хотя тенденция уменьшения f с

ростом τ сохраняется и для тока накачки 120 А, но эффект влияния значительно меньше по сравнению с током 60 А.

С этими данными согласуются и результаты исследований микротвердости поверхности и ее износостойкости (Таблица 2), оцененной по ширине дорожки трения Н. Согласно данным, представленным в [12] при не приводящих к оплавлению поверхности энергиях в импульсе повышение микротвердости поверхности в зоне нагрева может быть связано с увеличением плотности дефектов кристаллического строения.

Заключение. В результате проведенных исследований удалось с помощью лазерной обработки снизить коэффициент трения поверхности в 3,5 раза и получить износостойкую ярко выраженную кристаллитную структурой и отсутствие поверхностных дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ведерникова И.И., Полетаев В.А. Применение лазерного модифицирования для упрочнения рабочих поверхностей деталей машин // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2019, (15), 18—25

2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисю-ров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие / под ред. А.Г. Григорьянца. — Москва: МГТУ им. Баумана. — 2006

3. Астапчик С.А., Голубев В.С., Маклаков А.Г. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. — Минск: Беларус. навука. — 2008

4. Белый А.В., Калиниченко А.С., Кукареко В.А., Девойно О.Г. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий. —Минск: Белорусская наука. — 2017

5. Zhang H., Shi Y., Xu C.Y., and Kutsuna M. Sur-face Hardening of Gears by Laser Beam Processing // Surface Engineering. — 2003 (19), no. 2, April, 134—136

6. Mordike B.L. Improvement of Wear Properties by Laser Surface Treatment // Proc. 3rd European Conf. «Laser Treatment of Materials. ECLAT’90» 2 Vol. Eds. H.W. Bergmann, R. Kupfer. — 1990 (1), 371—376

7. Сафонов А.Н. Изучение структуры и твердости поверхности железоуглеродистых сплавов после их оплавления лазерным излучением // МиТОМ. — 1999, № 1, 7—10.

8. Петроченко С.В., Хао Ц., Юй С., Чжао К. Оценка влияния параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя деталей станков (обзор)//Омский научный вестник. – 2024 (1), 56–62

9. Афанасьева Л.Е.,Барабонова И.А., Ботянове В., Раткевич Г.В., Гречишкин Р.М. Структурные фазовые превращения в быстрорежущей стали при лазерной закалке с оплавлением поверхности многоканальным

CO^2 ЛАЗЕРОМ // Упрочняющие технологии и покрытия – 2013 – (104), №8, 10–13.

10. Мышковец В.Н., Максименко А.В., Шалупаев С.В., Юркевич С.Н. Лазерная установка с оптоволоконной приставкой и процессы сварки изделий из нержавеющей стали // Материалы. Технологии. Инструменты. — 2003 (8), № 4, 84—87

11. Григорьев А.Я., Гуцев Д.М., Зозуля А.П., Ковалева И.Н., Кудрицкий В.Г., Мышкин Н.К., Семенюк М.С. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 // Трение и износ. — 2014 (35), № 6, 664—669

12. Коваленко В.С., Головко Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. — Киев: Тэхника. — 1990

УДК 62-82-112.6 (083.13)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

М.А. Янковец, В.В. Пинчук
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация: Предлагаемый подход повышения эффективности проектирования гидроблоков управления приводов технологического оборудования через внедрение автономных модулей и декомпозиционных методов анализа задач включает три этапа: формулирование потребностей и целей нового объекта, декомпозиция задач на более простые компоненты, а также выбор оптимальных решений из множества альтернатив. Реализация разработанных методов на конкретных примерах гидроблоков управления позволит проверить их эффективность и обеспечить постоянное совершенствование проектных процессов. Создание специализированных алгоритмов и программного обеспечения для автоматической генерации проектных решений обеспечит более высокую производительность и качество в проектировании.

Ключевые слова: приводы технологического оборудования, гидроблоки управления, технологические машины, гидроаппараты, критерий оптимальности.

Введение

С учетом интенсивного развития информационных технологий, возникает необходимость в системном совмещении параметрического рабочего проектирования с поисково-структурным проектированием. Это позволит разрабатывать инновационные решения, обеспечивающие повышение качества функционирования гидроблоков управления приводов технологического оборудования.

Целью исследований является повышение эффективности проектирования гидроблоков управления приводов технологического оборудования (ГУ ТО) путем интеграции автономных модулей, которые будут формировать структуру создаваемых объектов и процессов на уровне инновационных результатов (изобретений) на ранних стадиях их проектирования.

Необходимо выявить особенности и возможности применения декомпозиционных методов анализа задач для получения новых знаний непосредственно при проектировании гидроблоков управления приводов технологического оборудования.

В свою очередь создание комплекса алгоритмов для решения задач формирования структуры гидроблоков управления приводов технологического оборудования позволит учитывать различные критерии при их проектировании.

Интеграция современных методов проектирования и оптимизации критериев при расчете ГУ ТО является ключом к созданию инновационных и эффективных решений в области проектирования. Это не только повысит качество и надежность гидроблоков управления, но и значительно улучшит общую эффективность технологических процессов, что в конечном итоге приведет к снижению затрат и повышению конкурентоспособности данных изделий.

Для достижения высокого качества в проектировании ГУ ТО необходимо интегрировать несколько ключевых методов. В первую очередь, это касается применения декомпозиционных методов анализа задач, которые позволяют разбивать сложные проектные задачи на более простые и управляемые компоненты. Такой подход не только упрощает процесс проектирования, но и способствует выявлению новых решений, которые могут быть упущены при традиционном подходе.

Оптимизация критериев проектирования является важным этапом, который требует учета множества факторов, таких как: качество, которое обеспечивает надежность и долговечность гидроблоков управления, способствует минимизации затрат на производство и эксплуатацию. Важным фактором является также экологичность, что ведет к снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Разработка методов оптимизации на основе декомпозиционного анализа с учетом многомерных целей позволит находить баланс между этими критериями. Например, использование многоцелевых алгоритмов может помочь в нахождении оптимальных решений, которые учитывают как технические, так и экономические аспекты проектирования.

Реализация предлагаемого подхода и алгоритма на конкретных примерах проектирования ГУ ТО позволит проверить их эффективность и целесообразность, провести эксперименты для оценки качества и надежности разработанных решений, получить сбор и анализ данных о производительности ГУ ТО в условиях реальной эксплуатации и при необходимости произвести корректировку алгоритма на основе полученных данных, что обеспечит постоянное совершенствование процесса проектирования.

Использование концепций формирования структурных решений для гидроблоков управления в процессе проектирования нового гидроблока управления представим в виде последовательного решения задачи (рис.1).

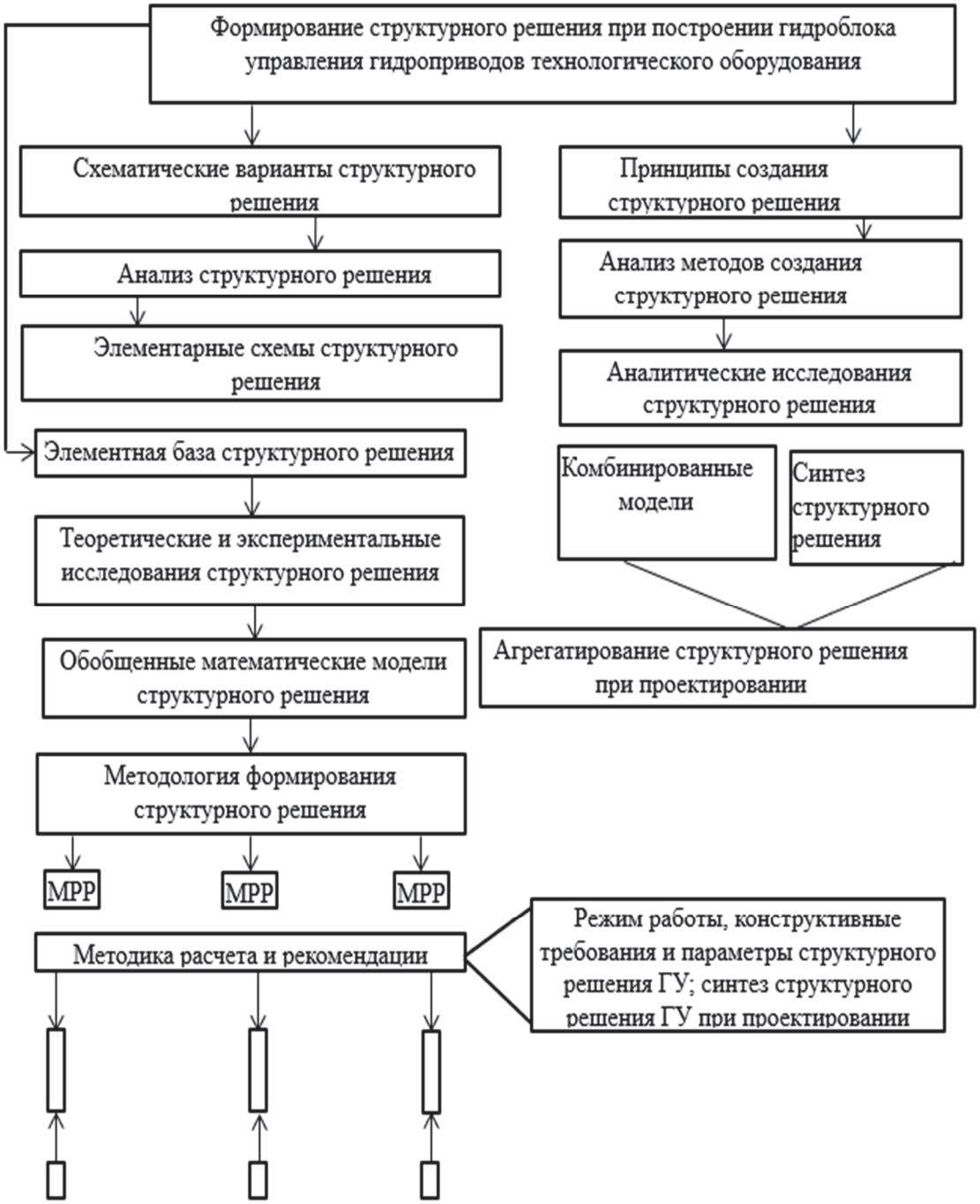


Рис. 1 — Структурная схема этапов формирования оптимального решения по созданию структуры гидроблока управления привода технологического оборудования.

На первом этапе необходимо сформулировать потребности в новом объекте, его функции и место в иерархии других объектов. Это позволяет установить цели и критерии для дальнейшей работы. На этом этапе задача разделяется на более мелкие, относительно независимые части, которые характеризуются определенными свойствами (признаками) создаваемого

объекта. Важно указать множества альтернатив реализации каждого признака, что формирует многомерное поисковое пространство. На втором этапе производим расчленение целого на части, что позволяет выявить истинную проблему. Этот анализ помогает понять, какие именно аспекты требуют внимания и доработки. Третий этап включает в себя «свертку поискового пространства», образованного в результате декомпозиции. На этом этапе осуществляется выбор для каждого свойства варианта реализации из множества альтернатив.

Создание специализированных алгоритмов и программного обеспечения для повышения эффективности процесса проектирования гидроблока управления технологического оборудования станет важным шагом к повышению производительности. Инструменты, которые автоматически генерируют проектные решения на основе заданных параметров, позволят оценивать и сравнивать различные варианты проектирования по установленным критериям.

При равнозначности критериев задача решается оптимизацией по Парето, а также используются метод идеальной точки и метод контрольных показателей.

Целью оптимизации по Парето является поиск оптимальных (доминирующих) точек. Оптимальными точками являются не улучшаемые значения – точки, лучше которых нельзя подобрать по всем критериям. Это означает, что без уточнения приоритетности критериев, при дальнейшем выборе будут рассматриваться варианты из множества оптимальных точек.

Если в угле, ограниченном лучами, берущими начало в точке и направленными вдоль осей по направлению улучшения полезности, не найдется ни одной точки, то данная точка является оптимальной.

Многокритериальная оптимизация — это раздел математического программирования, а также метод решения задач, которые состоят в поиске наилучшего (оптимального) решения, удовлетворяющего нескольким несводимым друг к другу критериям.

Существует 3 основных типа задач многокритериальной оптимизации:

1) в задаче критерий f_1 приоритетнее, чем критерий f_2, или критерий f_2 приоритетнее чем f_1;

2) задача сводится к минимизации функции. Данный метод носит название линейной свертки;

3) критерии равнозначны в условиях рассматриваемой задачи.

Алгоритм структурного синтеза может быть представлен последовательностью шагов, включающих просмотр базы декомпозиционных схем, ввод характеристик, присвоение рангов альтернативам и автоматический выбор лучших решений. В соответствии с рассмотренными методами и алгоритмом формирования оптимальных по Парето структурных решений при

проектировании технических объектов значение каждого из показателя, характеризующего систему, не может быть улучшено без ухудшения других.

Заключение

Применение категорий «Часть и целое» в процессе формирования структурных решений для гидроблоков управления позволяет систематизировать подход к проектированию и оптимизации. Это способствует более глубокому пониманию задачи и созданию эффективных, инновационных решений, отвечающих современным требованиям технологического оборудования.

Использование метода математического моделирования позволяет определить конструкционные параметры гидроблока управления технологического оборудования, разработать гидравлический привод технологического оборудования с наименьшими затратами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптимизация критериев при расчете и пректировании монтажных корпусов гидроблоков управления / О.К.Гурбан, В.В.Пинчук, А.А.Гинзбург // Актуальные вопросы машиноведения: сб.науч.тр. / Объедин. Ин-т машиностроения НАН Беларуси».- Минск, 2024, с.131.

2. Пинчук, В.В. Расчет присоединительных размеров компонентов агрегатно-модульных гидроблоков управления гидроаппаратов технологических машин / В.В.Пинчук, А.В.Мархуленко, Д.Г.Ворочкин // Вестние. ГГТУ им. П.О.Сухого, 2013.- №1.- с.20-25.

3. Пинчук, В. В. / Расчет и конструирование агрегатно-модульных гидроблоков управления гидропроводов технологического оборудования : автореферат дис. доктора технических наук по специальности 05.02.02 Машиноведение, системы приводов и детали машин.

УДК 631.354.23

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МУФТА В СИСТЕМЕ ВЫГРУЗКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

А.В. Хихлуха, А.В. Белый
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В работе представлено решение по модернизации системы выгрузки зерноуборочного комбайна путем внедрения электромагнитной муфты на донный шнек. Предложенная конструкция обеспечит управляемое и последовательное включение элементов системы выгрузки, что позволит снизить динамические нагрузки на привод, предотвратить заторы зерновой массы, уменьшить потери зерна и повысить общую надежность системы.

Введение

Система выгрузки зерна в современных зерноуборочных комбайнах является критически важным узлом, напрямую влияющим на производительность и качество уборки. Традиционные механические приводы шнеков, как правило, работают в постоянном режиме, что приводит к избыточным нагрузкам, повышенному износу и риску заторов, особенно при изменении режимов загрузки или остановке процесса выгрузки.

Одной из актуальных задач является снижение динамических нагрузок при пуске и обеспечение управляемой подачи зерна.

Решением данной проблемы стало внедрение электромагнитной муфты в привод горизонтального шнека, позволяющей реализовать последовательный пуск рабочих органов и порционную выгрузку.

Предмет исследования

Система выгрузки зерноуборочного комбайна GS12A1.

Цель исследования

Разработать и внедрить систему управления приводом горизонтального шнека с использованием электромагнитной муфты, обеспечивающую снижение нагрузок на привод, повышение надежности и снижение потерь при выгрузке зерна.

Методология исследования

Теоретический, расчетно-конструктивный.

Результаты исследования

В настоящее время система выгрузки зерна зерноуборочного комбайна GS12A1 приводится в действие от ДВС 1 (рис. 1), который передает крутящий момент через ременную передачу на главный

контрпривод 3. Включение главного контрпривода осуществляется посредством натяжения ремня с помощью гидроцилиндра, управляющего положением натяжного ролика 2. Это позволяет плавно и надёжно подключать привод без механического износа при запуске.

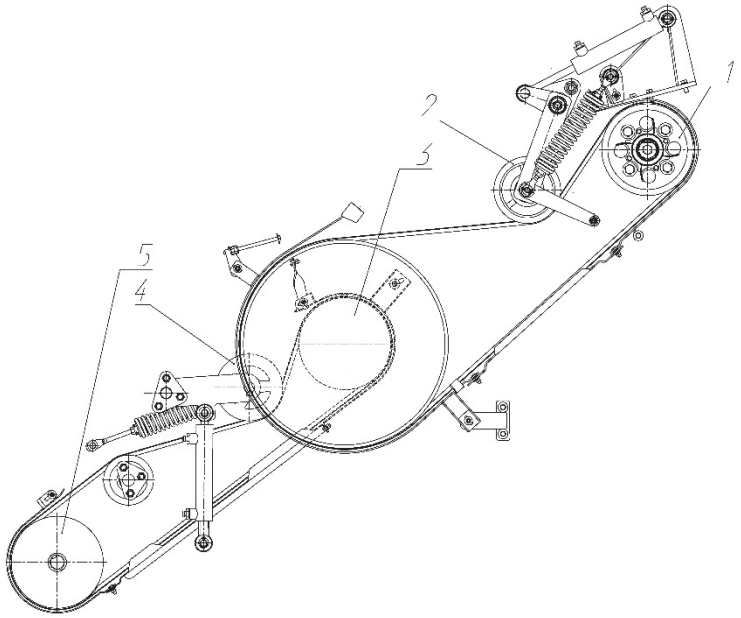


Рис. 1 – Схема привода системы выгрузки
1 – ДВС; 2,4 – натяжной ролик; 3 – главный контрпривод; 5 - редуктор

От главного контрпривода крутящий момент передается через вторую ременную передачу на редуктор 5, обеспечивающий понижение частоты вращения и увеличение крутящего момента. Включение этой передачи также осуществляется за счёт натяжения ремня с помощью гидроцилиндра, управляющего натяжным роликом 4, что обеспечивает управляемое включение/выключение привода системы выгрузки.

Вал редуктора 1 (рис. 2) соединён с приводом наклонного 3 и горизонтального 4 шнеков, которые обеспечивают перемещение зерна из бункера к точке разгрузки. Одновременно с этим, от того же редуктора через цепную передачу передаётся вращение на донный шнек 2 бункера. Донный шнек обеспечивается равномерное перемещение зерна в приемную камеру наклонного шнека.

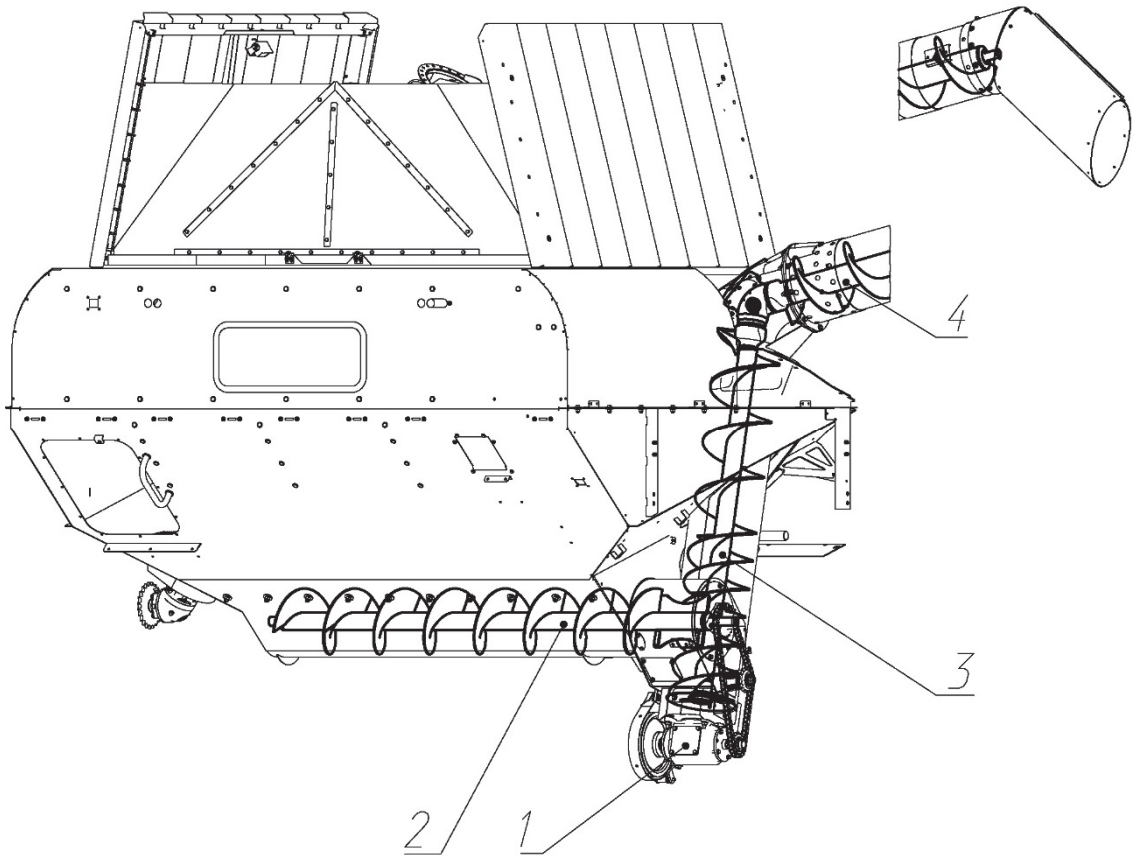


Рис. 2 – Схема расположение шнеков в бункере
1 – редуктор; 2 – донный шнек;
3 – наклонный шнек; 4 – горизонтальный шнек

Таким образом, при включений гидравлической системы и последовательном натяжений ременных передач обеспечивается поэтапный запуск всех рабочих органов. В совокупности это позволяет организовать непрерывную и равномерную выгрузку зерна из бункера.

Недостатки данного привода системы выгрузки.

1. При запуске системы выгрузки происходит одновременное включение наклонного, горизонтального и донного шнеков посредством гидравлического натяжения ременных передач.

В момент пуска все шнеки находятся под нагрузкой:

— в горизонтальном шнеке остается остаточная зерновая масса от предыдущей выгрузки;
— в наклонной камере шнека сохраняется часть зерна;
— на донном шнеке бункера находится значительный объем зерна, находящегося под давлением собственной массы.

В результате возникает значительный пусковой момент сопротивления, превышающий номинальный крутящий момент на валу двигателя и элементах передач, что вызывает проскальзывание ременных передач, износ гидроцилиндров натяжения, перегрузку редуктора и двигателя, возможный отказ пуска или срыв ремней. Также увеличивается износ узлов привода (ремни, подшипники, цепь, редуктор), сокращается ресурс оборудования.

2. В момент поворота шнека в транспортное положение зерно, оставшееся внутри шнека, высыпается наружу, что приводит к прямой потери продукта.

Предлагаем внедрить в существующую конструкцию GS12A1 электромагнитную муфту для реализации раздельной схемы включения шнеков.

Произведя анализ конструкции и исходя из параметром по передаваемой мощности и частоте вращения донного шнека была выбрана необходимая электромагнитная муфта.

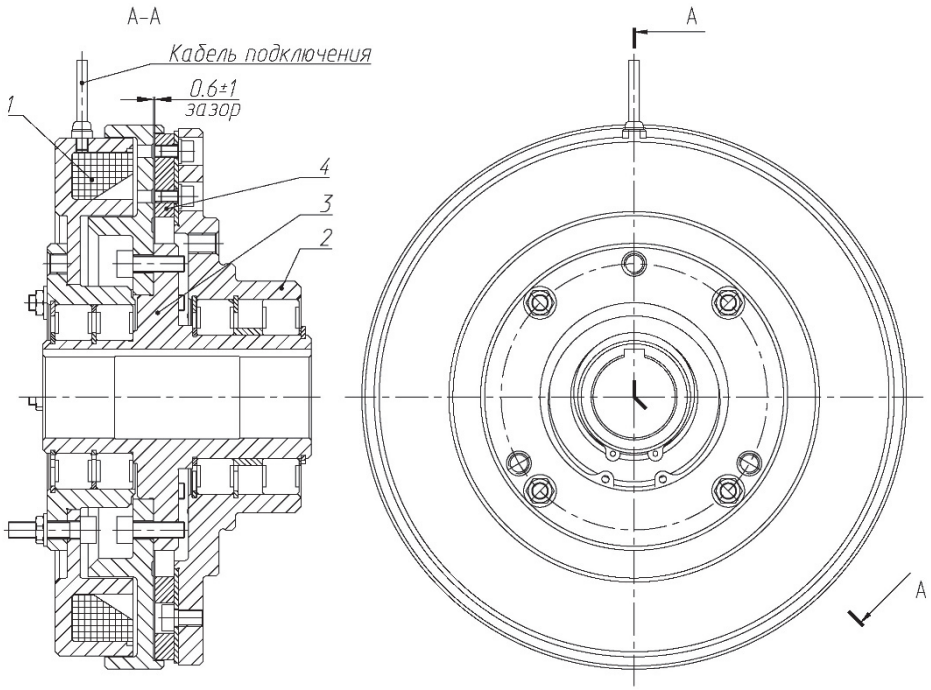


Рис. 3 – Эскиз выбранной электромагнитной муфты
1 – катушка; 2 – ведомая часть;
3 – ведущая часть; 4 – фрикционная накладка

Принцип работы примененной электромагнитной муфты на машине.

На катушку 1 (рис. 3), закрепленной к основанию бункера неподвижно, подается постоянный ток 24В, катушка создаёт магнитное

поле, поток которого проходит через ведомую часть 3 и притягивает фрикционную накладку 4 с ведущей частью 2. Фрикционная накладка прижимается к ведомой части и за счёт силы трения крутящий момент передаётся на донный шнек бункера, зерно поступает в приемную камеру наклонного шнека.

При выключении подачи тока магнитное поле исчезает и ведущая часть отводится от ведомой части восстанавливая зазор между ними. Передача крутящего момента прекращается на донный шнек и зерно перестает поступать.

Применение муфты позволит включать/выключать вращение донного шнека независимо от наклонного и горизонтального, которые продолжают вращаться при включенной передаче от двигателя.

В связи с установкой электромагнитной муфты была изменена конструкция донного шнека 2 (рис. 7) и произведен прочностной расчет вала и его подшипниковых опор (рис. 4).

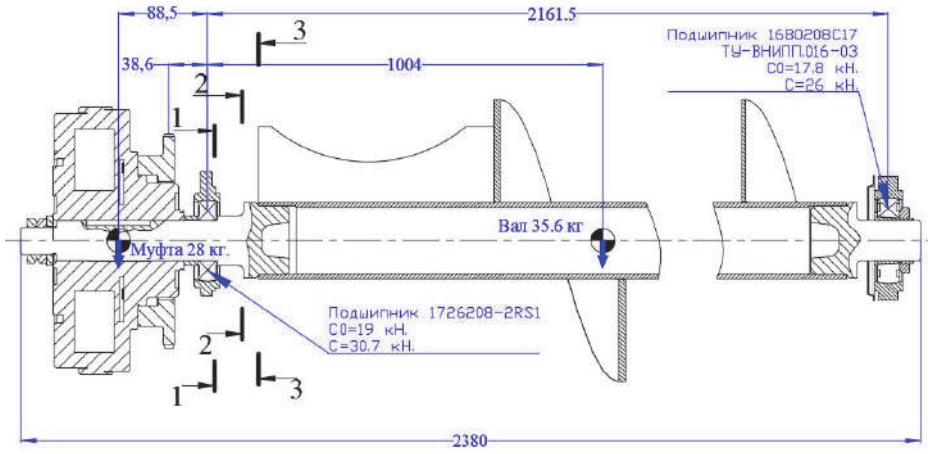


Рис. 4 – Расчетная схема вала

Для крепления неподвижной части корпуса муфты к основанию бункера была разработана новая конструкция крепления 9,10 (рис. 7) и проведен прочностной расчет (рис. 5).

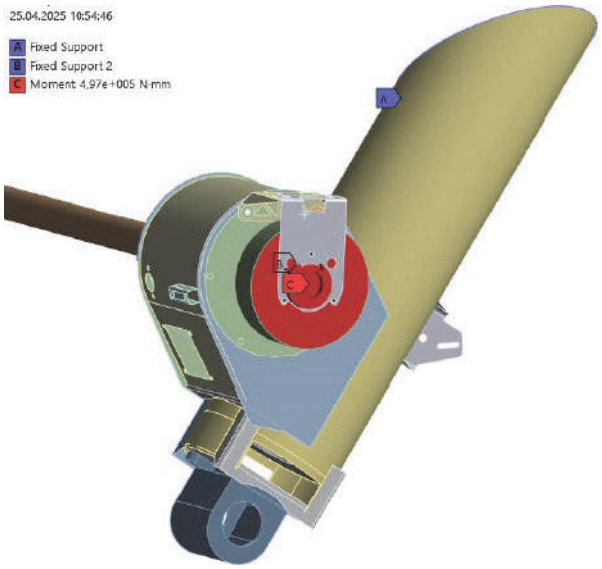


Рис. 5 – Расчетная схема конструкции крепления корпуса муфты электромагнитной

После установки электромагнитной муфты на вал донного шнека был произведен расчет цепной передачи привода этого шнека с подбором количества зубьев ведущей 4 (рис. 7), ведомой 8 звездочки и определена оптимальная длина цепи в звеньях с учётом межосевого расстояния и компенсации провисания.

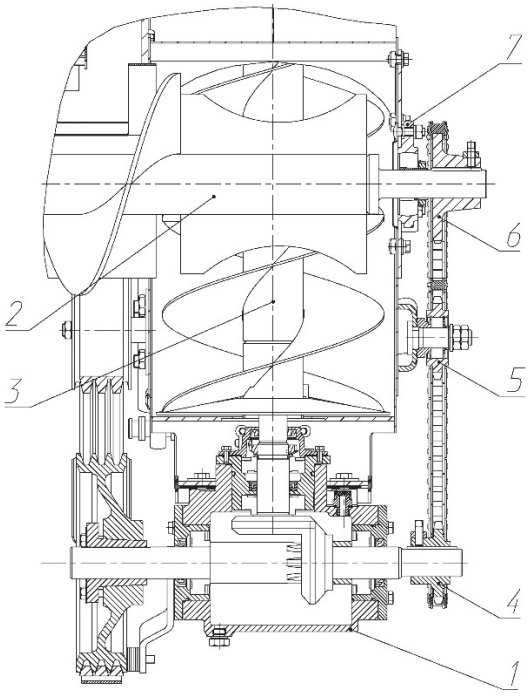


Рис. 6 – Схема привода системы выгрузки GS12A1
1 – редуктор; 2 – донный шнек; 3 – наклонный шнек; 4,6 – звездочка; 5 – натяжная звездочка; 7 – опора подшипника.

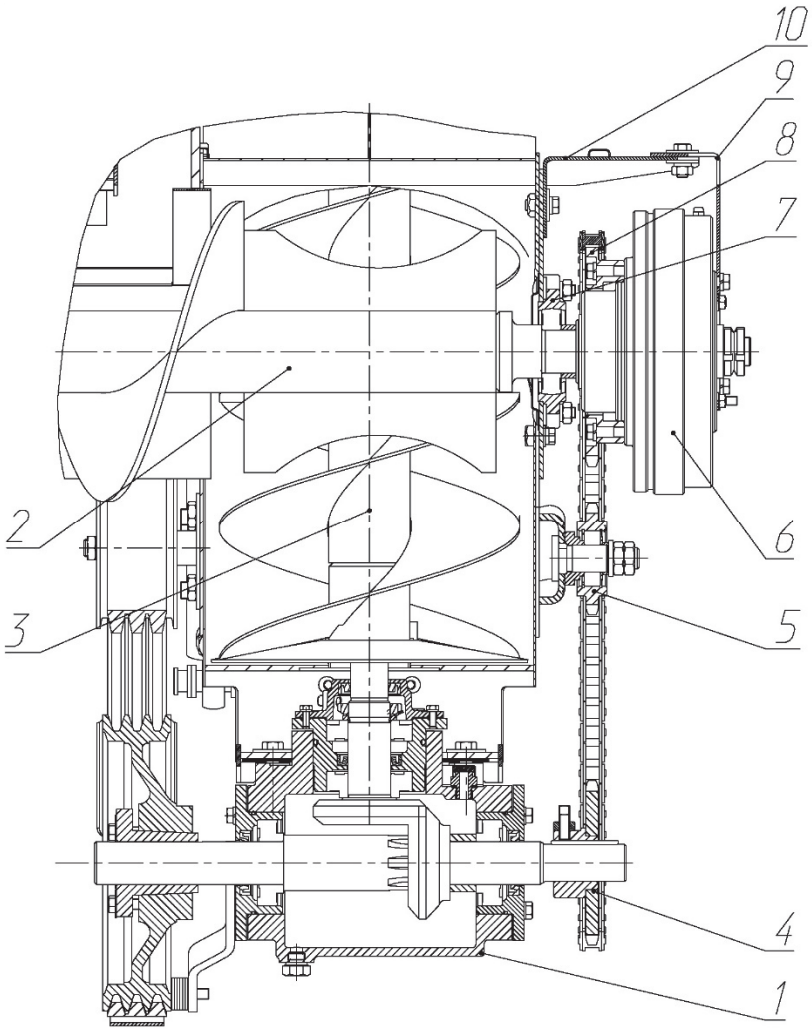


Рис. 7 – Модернизированная схема системы выгрузки GS12A1
1 – редуктор; 2 – донный шнек; 3 – наклонный шнек; 4 – звездочка;
5 – натяжная звездочка; 6 – электромагнитная муфта; 7 – опора подшипника;
8 – звездочка; 9,10 – конструкция крепления муфты

Вывод

Предлагаемая конструкция привода системы выгрузки с применением в её конструкции электромагнитной муфты для включения/выключения донного шнека позволит исключить критические нагрузки при включении системы выгрузки бункера (особенно при высокой влажности убираемой культуры), которые могут привести к повреждению шнеков и дорогостоящим простоям. Последовательное включение/остановка шнеков позволит избежать одновременного пуска всех рабочих органов (что существенно снижает пусковой момент и перегрузку двигателя) и обеспечить отсутствие зерна в наклонном и горизонтальном шнеке, что существенно снижает пусковой момент и перегрузку, а также позволяет не допустить прямых потерь при окончании выгрузки.

За счет обеспечения плавного включения горизонтального шнека и снижения пиковых нагрузок увеличивается срок службы редукторов, цепных передач и валов.

Также применение электромагнитной муфты позволяет реализовать автоматизированное управление выгрузкой, включая режимы дозированной подачи (порционная выгрузка) и остановку/включение таймером.

Конструкция разработана с учётом полной совместимости с бункером комбайна GS12A1, что позволяет применить ее на серийных машинах GS12A1 и GH810. При этом модернизация серийных машин возможна без глубокой переделки узлов – установка требует минимального вмешательства в текущую компоновку, что делает решение экономически эффективным даже для модернизации уже выпущенных машин. Таким образом, предложенная система сочетает инновационность инженерных решений с практической реализуемостью, обеспечивая повышение надёжности и гибкости уборочного процесса.

Предлагаемая конструкция будет внедрена на опытную машину зерноуборочного комбайна GS600, а её эффективность будет оценена по результатам эксплуатационных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казанский В.В, Справочное пособие по зерноуборочным комбайнам, – Гомель: РПУП «Полеспечать», 2000. – 254с.

2. Карпенко, А.Н. Сельскохозяйственные машины: учебное пособие / В.М. Халанский. – Минск: БГАТУ, 2021. – 412 с.

УДК 631.354.3.06

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ РАСКЛАДНОГО ВЫГРУЗНОГО ШНЕКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

А.И. Павловец, В.Л. Зимина
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация: В данной работе ведется разработка конструкции раскладного выгрузного шнека для зерноуборочного комбайна, обеспечивающего увеличение радиуса выгрузки до 7-8 м, выгрузку на ходу с сокращением простоев. Предложено техническое решение, повышающее производительности на 15-20% за счет модернизации существующих моделей комбайнов.

Введение

Повышение производительности зерноуборочных комбайнов является одной из ключевых задач в современном сельском хозяйстве. Одним из факторов, снижающих эффективности уборки, является технологические простои при выгрузке зерна. Существующие фиксированные и поворотные шнеки ограничены по радиусу действия и требуют остановки комбайна. Внедрение раскладного выгрузного шнека позволяет решить эту проблему, увеличив радиус выгрузки и обеспечив выгрузку без остановки.

Работа направлена на разработку и обоснование конструкции, адаптированной к условиям эксплуатации комбайнов.

Объект исследования

Раскладной шнек выгрузки для комбайнов.

Цель исследования

Целью исследования является повышение производительности зерноуборочных комбайнов за счет разработки и внедрения раскладного выгрузного шнека, обеспечивающего увеличение радиуса выгрузки, сокращение простоев и повышения эксплуатационной эффективности при уборке зерновых культур.

Методы исследования – Применены методы конструкторского анализа, инженерные расчеты прочности и кинематики, сравнительный анализ с зарубежными аналогами, оценка производительности и экономической эффективности.

Результаты исследования

В настоящее время на комбайнах GS2124 используется шнек поворотный выгрузной (рис. 1) фиксированной длины. Конструктивно он представляет собой жесткую трубу с винтовым шнеком закрепленную при помощи отвода к бункеру комбайна. Длина шнека в рабочем положении составляет 6 м 250 мм, что ограничивает радиус выгрузки и требует точного позиционирования транспортного средства относительно комбайна и его конструкция не является раскладной или телескопической.

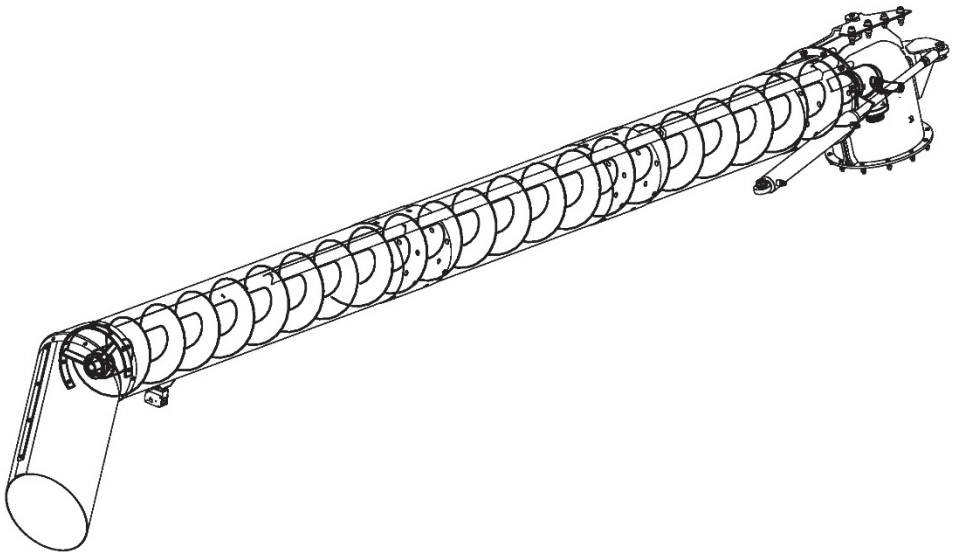


Рис. 1 – Шнек поворотный выгрузной

Хотя раскладные шнеки обладают рядом инновационных преимуществ, обычный шнек поворотный выгрузной (рис. 1) сохраняет актуальность благодаря следующим ключевым достоинствам:

1. Простота и надежность конструкции.

- Минимум подвижных элементов: отсутствие электроприводов и подвижных элементов выдвижения.
- Сниженный риск поломок: нет зависимости от электрики, или механических передач.
- Долговечность: меньше точек износа.

2. Низкая стоимость и доступность.

- Цена ниже на 20-30% по сравнению с раскладными аналогами.
- Дешевое обслуживание: ремонт возможен в любой сельской мастерской
- Доступность запчастей: стандартные компоненты которые есть в ассортименте любого дилера сельхоз техники.

3. Меньшая масса и упрошенная балансировка.

- Вес меньше: отсутствие электроприводов и дополнительных секций.
- Снижение нагрузки на раму: не требует усилений конструкции для компенсации динамических нагрузок при выдвижении.

4 Экономическая целесообразность для малых хозяйств.

- Окупаемость за сезон: низкая стоимость оправдана при малых объемах уборки.
- Снижение эксплуатационных затрат: нет расходов га диагностику или профилактику сложных узлов.
- Актуален для старых моделей комбайнов: Идеально совместим с техникой, не оснащенной новыми цифровыми системами.

На сегодня я хочу представить вам не просто техническое улучшение, а системное решение, способное изменить подход к организации уборочного процесса в сельском хозяйстве. Речь пойдет о раскладном выгрузном шнеке (рис. 2) с электромеханизмом выдвижения (поворота).

В условиях роста сельскохозяйсвенного производства и ужесточения требований к эффективности, простои при выгрузки зерна становиться критическим фактором.

На выгрузку зерна уходит до 15% рабочего времени комбайна, что при уборке 1000 га это означает потерю 150 часов рабочего времени. В условиях короткого уборочного сезона это может привести к снижению урожайности на 5-7%.

Существующий поворотный шнек с длиной, чуть больше 6м, не позволяет осуществлять выгрузку «на ходу», требует остановки комбайна и точного позиционирования прицепа.

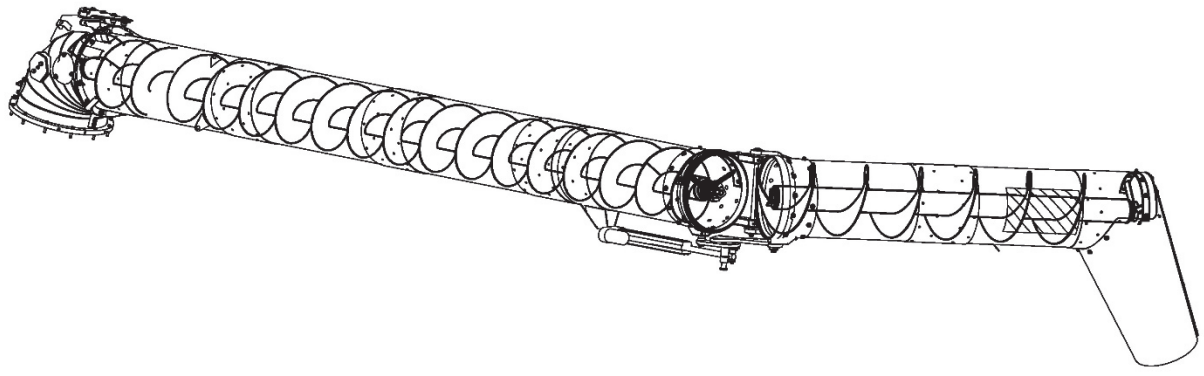


Рис. 2 – Раскладной выгрузной шнек

Наша разработка за пределами простого увеличения длины, а представляет собой двухзвенную поворотную конструкцию с принципиально новым подходом к управлению:

- В рабочем положении длина шнека составляет 8 метров 160 мм это на 1.91 метра больше, чем у стандартного шнека.
- В транспортном положении шнек компактно складывается до длины 5м 700мм, полностью соответствуя требованиям по габаритам.
- Особенность нашей разработки это, конечно же, механизм поворотной части приводящееся в движение благодаря электромеханизму (рис. 3).
- Электромеханизм постоянного тока.
- Кнопочное управление из кабины оператора с индикатором положений.
- Поворотный механизм для плавного и точного перемещения.

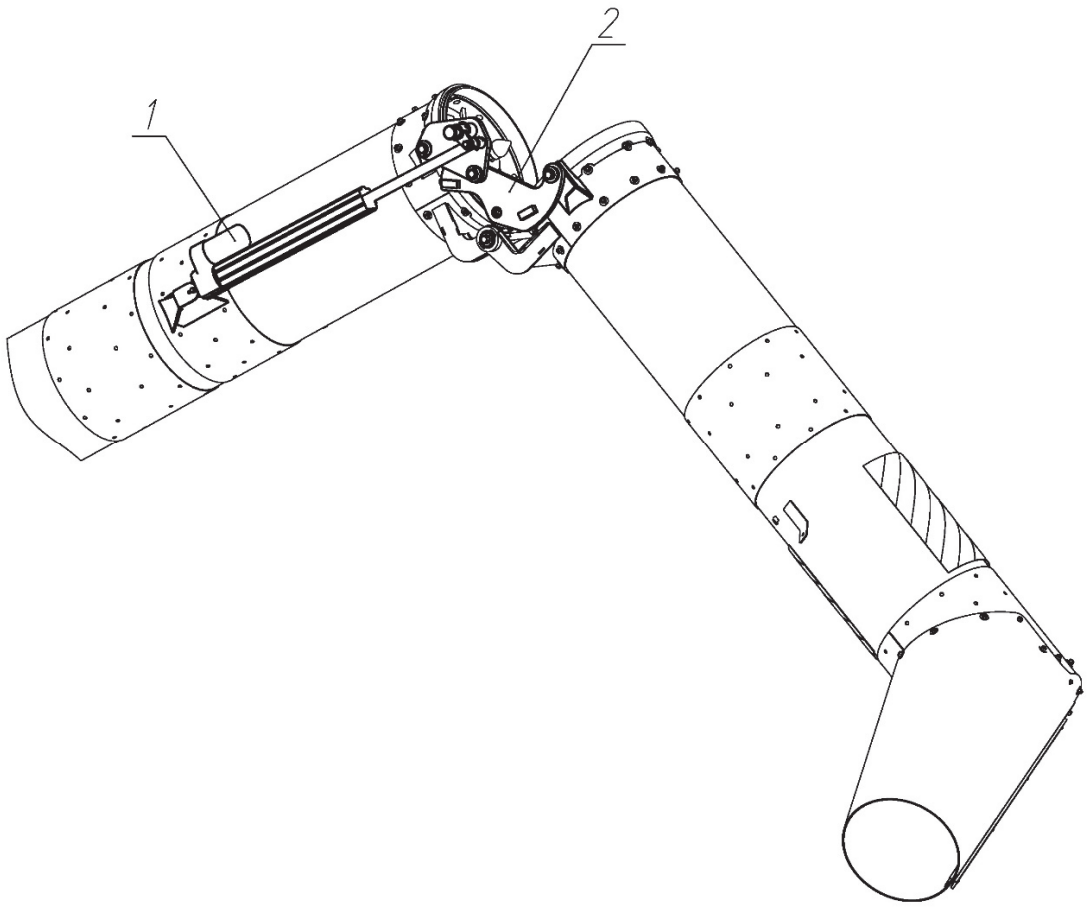


Рис. 3 – Электромеханизм (1) и Механизм поворотной части (2).

Ключевые преимущества:

- Выгрузка на ходу – возможность заполнения прицепа без остановки комбайна, что сокращает время выгрузки на 30-40%.

- Повышенная надежность – электромеханизм не зависит от гидравлической системы, исключает утечки масла и работает стабильно в условиях высокой запыленности.
- Снижение эксплуатационных затрат – отсутствие необходимости в гидрожидкости, упрощенное обслуживание, экономия топлива за счет сокращения простоев.
- Полная совместимость – данная конструкция может заменять поворотный выгрузной шнек (Рис. 1) устанавливаемый сейчас в серийном производстве на комбайне GS2124, так как конструкция крепления раскладного выгрузного шнека (Рис. 2) к машине полностью идентичная.

Практическая эффективность

- Сократит время выгрузки зерновой массы.
- Увеличит сменную выработку (примерно на 1.1 га)
- Повысит общую производительность комбайна на 15-20%.
- Обеспечит окупаемость модернизации за 2-3 уборочных сезона.

Инновационность разработки

- Использует собственное изготовление и компоненты доступные в условиях импорт замещения.
- Обеспечивает простоту обслуживания.
- Сохраняет доступную стоимость при сохранении ключевых преимуществ раскладных систем.

Почему же не все должны внедрять и переходить на раскладные шнеки, мы понимаем, инновации должны внедряться обосновано, поэтому провели сравнительный анализ с учетом разных условий. Когда же раскладной шнек это идеальное решение:

- Крупные хозяйства (от 500 га).
- Работа на открытых полях без ограничений по пространству.
- Высокая интенсивность уборки (более 50 га/смену).
- Наличие квалифицированного персонала.

Раскладной шнек – не универсальное решение, а инструмент для повышения эффективности в определенных условиях. Это показывает нашу объективность и профессиональный подход.

Заключение

Наш раскладной выгрузной шнек с электромеханизмом поворота – это не просто техническое улучшение, а системное решение, направленное на повышение эффективности всего уборочного процесса. Разработка проекта и конструкторской документации уже на стадии проработки и

технических улучшений. После разработки экспериментального образца и испытаний, будет готова к промышленному внедрению в серийное производство на базе комбайна GS2124.

ЛИТЕРАТУРА

1 Курмаз Л.В. «Детали машин. Проектирование» 2019 // Глава 12 «Расчет винтовых механизмов».

2 Кленин А.Н., Киселев С.Н. «Сельскохозяйственные и мелиоративные машины» 2020 // Раздел 7.3 «Устройства для выгрузки зерна».

3 Вестник АлтГАУ, №3, 2021 «Повышение производительности зерноуборочных комбайнов за счет модернизации выгрузного шнека» // Содержит практические расчеты экономического эффекта от модернизации выгрузных устройств.

УДК 62-8:531.3

МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ВИБРОАКТИВНОСТИ ПРИВОДА КОЛЕБЛЮЩИХСЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Д.А. Дубовик[1], Н.П. Першукевич[1], А.С. Климук[1], А.Н. Вырский[2]
[1]Государственное научное учреждение «Объединённый институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь
[2] Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь

В современных самоходных зерноуборочных комбайнах для выделения зерна из зернового вороха применяются ветрорешетные очистки с колеблющимися рабочими органами: транспортной (стрясной) доской и решетными станами. Они имеют компактную конструкцию и обеспечивают предъявляемые к таким устройствам параметры по чистоте бункерного зерна и его потерям. Недостатком использования колеблющихся рабочих органов являются переменные силы инерции масс, которые приводят к вибрации несущей конструкции машины и динамической нагруженности привода колебаний, ухудшая условия труда операторов и снижая надежность комбайна. В связи с этим поиск новых технических решений, обеспечивающих снижение виброактивности привода колеблющихся рабочих органов очистки не теряет своей актуальности.

Основными источниками вибрации несущей конструкции комбайна со стороны колеблющихся рабочих органов очистки являются неуравновешенность сил инерции колеблющихся масс и динамическая нагруженность их привода. Динамическая нагруженность привода (переменный крутящий момент в приводе) является фактором, определяющим его виброактивность. На опорах валов ременных, цепных, зубчатых передач, а также на опорах двигателя переменный крутящий момент преобразуется в переменные силовые воздействия, вызывающие деформацию элементов несущей конструкции и привода и, соответственно, вибрацию. Величина вибрации может значительно увеличиваться вследствие резонансных явлений. Это характерно, особенно, для машин со сложной структурой привода рабочих органов и несущей конструкции, которыми являются самоходные зерноуборочные комбайны.

Проблеме снижения вибрации машин с колеблющимися массами в научно-технической литературе уделено большое внимание. Одним из путей снижения вибрации рамы машины является уравновешивание сил инерции колеблющихся масс, воздействующих на нее. Согласно [1] критерием уравновешенности при этом служит равенство нулю главного вектора сил инерции и постоянство величины главного вектора момента сил

инерции колеблющихся масс. Выполнение эти условий для механизма очистки практически трудно выполнимо в связи с необходимостью обеспечить одновременно конструктивные и технологические требования. Кроме того, даже при полном уравновешивании сил инерции и их моментов, действующих на раму комбайна, в приводе рабочих органов будет действовать переменный крутящий момент от сил инерции и других сил, вызывающий его виброактивность.

Рассмотрим некоторые источники, посвященные снижению динамической нагруженности привода. В монографии [2] в качестве эффективного метода снижения динамической нагруженности приводов колеблющихся рабочих органов, вызванной силами инерции колеблющихся масс, предложен силовой метод. Он основан на рекуперации кинетической энергии колеблющихся масс в колебательной системе, содержащей упругий элемент в качестве рекуператора (аккумулятора). При совпадении номинальной частоты колебаний рабочих органов с собственной частотой колебательной системы, содержащей массы колеблющихся рабочих органов и дополнительно введенный упругий элемент, достигается минимизация динамической нагруженности привода. В монографии приведены результаты экспериментальных исследований приводов колеблющихся рабочих органов различных сельхозмашин, в том числе и очистки, подтверждающих эффективность метода.

В работе [3] приведен анализ конструкций и методов снижения нагруженности приводов воздушно-решетных систем очисток зернового вороха комбайнов, использующих колеблющиеся рабочие органы. Рассмотрен ряд схем и конструкций одностанных и двустанных очисток зерноуборочных комбайнов. Проведен анализ их уравновешенности и динамической нагруженности их приводов. Отмечено, что наилучшие предпосылки для уравновешивания переменных сил инерции колеблющихся масс, действующих на несущую конструкцию комбайна, имеются в схеме двустанной очистки, примененной в зерноуборочном комплексе КЗР-I0 «Полесье-Ротор», благодаря возможности уравновесить не только силы инерции, но и их моменты. Данная схема используется и в современных комбайнах производства «Гомсельмаш». Для снижения динамической нагруженности привода в работе предложено применить рекуператор. В [4] описана практическая реализация технического решения и экспериментально подтверждена его эффективность.

В описании к патенту на полезную модель [5] предложена схема рекуперативного привода колеблющихся рабочих органов очистки зерноуборочного комбайна, а в диссертации [6] подробно описано обоснование параметров конструкции на ее основе, приведены результаты экспериментальных исследований, подтвердившие преимущества предлагаемого рекуперативного привода. Особенностью технического решения рекуперативного привода является то, что для минимизации

динамических нагрузок, действующих на привод, пружины рекуператора в среднем положении механизма имеют различное усилие предварительного натяжения.

Следует отметить, что в рассмотренных выше рекуперативных приводах не упоминается использование сайлентблоков в качестве упругого элемента для рекуператора. В то же время, в современных комбайнах производства «Гомсельмаш» и многих других производителей подвеска колеблющихся рабочих органов очистки осуществляется с использованием резиновых сайлентблоков, установленных в механизм в качестве шарниров согласно техническому решению, приведенному в [7]. Исследования показали, что, кроме конструктивных преимуществ, применение сайлентблоков обеспечивает частичное снижение динамической нагруженности привода колеблющихся рабочих органов очистки на номинальной частоте за счет рекуперации кинетической энергии колеблющихся масс их упругостью. В [8] это показано расчетным путем, а в [9] – экспериментально. В [9] также определена частота колебаний рабочих органов, при которой достигается минимум динамической нагруженности привода для комбайна КЗС-1218, равная 3,5 Гц (собственная частота колебательной системы с сайлентблоками). Номинальная частота составляет 4,5 Гц.

В [10] показано, что постоянная сила, действующая на привод колебаний со стороны рабочих органов, приводит к его динамической нагруженности. Здесь же показано, что в рекуперативном приводе колебаний ее можно компенсировать за счет статического смещения пружины рекуператора. Анализируя результаты работы [7], можно утверждать, что различное усилие предварительного натяжения пружин в среднем положении механизма является статическим смещением пружины рекуператора, служащее для компенсации постоянной составляющей от сил веса рабочих органов и сил, обеспечивающих перемещение зернового вороха.

В результате анализа рассмотренных выше предпосылок разработан метод минимизации динамической нагруженности и виброактивности привода колеблющихся рабочих органов очистки зерноуборочного комбайна на основе использования рекуперации кинетической энергии колеблющихся масс. Согласно методу в привод вводится дополнительная упругость с необходимыми параметрами. Особенность технического решения заключается в том, что дополнительная упругость обеспечивает одновременно совпадение собственной частоты созданной колебательной системы с номинальной частотой привода (минимизацию сил инерции колеблющихся масс, действующих на привод) и уравновешивание постоянной составляющей силы, действующей на привод со стороны рабочих органов.

Исследование свойств резин показало, что за счет сайлентблоков невозможно компенсировать постоянную составляющую сил, действующих на привод, в связи с релаксационными свойствами резин. Также нецелесообразно использовать сайлентблоки в качестве основной упругости рекуператора из-за ощутимых механических потерь при деформации. Для этого предпочтительно использовать металлическую пружину, имеющую стабильную упругую характеристику и низкие потери при возврате накопленной энергии.

В качестве примера реализации разработанного метода для приводов колеблющихся рабочих органов очисток зерноуборочных комбайнов на рисунке 10 изображена плоская схема пространственного механизма очистки, аналогичная используемой в комбайнах «Гомсельмаш». Использование плоской схемы правомерно, так как механизм симметричен относительно средней плоскости. Все элементы механизма (в том числе и пружина 11), кроме 2, 3, 4 имеют пару. Резино-металлические шарниры (сайлентблоки) показаны кружочками с черной заливкой. Подшипниковые шарниры – кружочки без заливки.

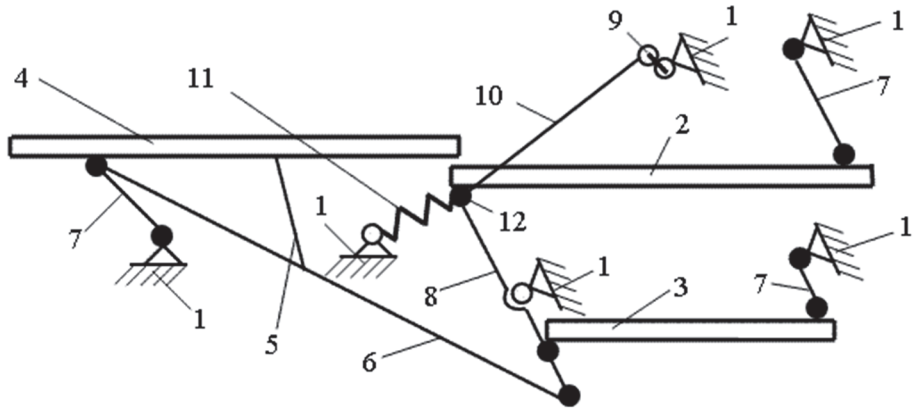


Рисунок – Схема рекуперативного привода колеблющихся рабочих органов механизма очистки зерноуборочного комбайна: 1 – рама механизма; 2 – верхний решетный стан; 3 – нижний решетный стан; 4 – стрясная доска; 5 – поддержка стрясной доски; 6 - тяга стрясной доски; 7 – подвески; 8 – двуплечий рычаг; 9 - кривошип; 10 – шатун; 11 – металлическая пружина; 12 - шарнир, посредством которого нагрузка передается на привод.

Жесткость дополнительной металлической пружины 11 сдоп выбирают из условия:

$$сдоп = сном – ссайл, \quad (1)$$

где сном – приведенная к точке крепления дополнительной пружины на двуплечем рычаге линейная жесткость упругого элемента, обеспечивающая совпадение собственной частоты колебательной системы, включающей приведенные инерционные характеристики колеблющихся рабочих органов очистки, с номинальной частотой работы механизма;

ссайл - приведенная к точке крепления дополнительной пружины на двуплечем рычаге суммарная линейная жесткость сайлентблоков.

Величину статического смещения Δ дополнительной пружины от среднего положения механизма определяют из соотношения:

$$\Delta = F\text{пост} / c\text{доп}, \qquad (2)$$

где Fпост – постоянная составляющая силы, действующей на привод со стороны колеблющихся рабочих органов.

Дополнительная металлическая пружина при заданных выше условиях выполняет следующие функции:

- минимизирует динамическую нагрузку на привод, вызываемую постоянной составляющей силы со стороны рабочих органов;
- совместно с сайлентблоками минимизирует динамические нагрузки, вызванные силами инерции масс колеблющихся рабочих органов;
- снижает механические потери в рекуперативном приводе с механизмом, использующим сайлентблоки.

Значения исходных данных для вычислений по формулам (1) и (2) могут быть определены расчетным путем. Однако более достоверные данные предпочтительно получать экспериментально, например, на основе проведения исследований, описанных в [9].

Конструктивно техническое решение может быть оформлено в виде пары пружин, расположенных симметрично вдоль боковин очистки вне зоны технологического процесса. Одни концы их соединены с двуплечими рычагами в зоне шарнира 12 (см. рисунок), другие – с кронштейнами, установленными на боковинах. Возможны другие варианты конструктивных решений.

Таким образом, предложенное техническое решение обеспечивает минимизацию динамической нагруженности и виброактивности привода колеблющихся рабочих органов очистки зерноуборочного комбайна, вызванных силами инерции колеблющихся масс и постоянной составляющей силы, действующей на привод со стороны колеблющихся рабочих органов. Кроме того, оно упрощает рекуперативный привод, по крайней мере, за счет меньшей потребной энергоемкости металлических пружин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский – Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука» – Москва, 1988. – 640 с.

2. Бойко, Л.И. Механика приводов колеблющихся рабочих органов машин / Л.И. Бойко. – Минск: Мэджик Бук, 2003. – 240 с.

3. Бойко Л.И., Климович О.В. Анализ конструкций и методов снижения нагруженности приводов воздушно-решетных систем очисток зернового вороха комбайнов.- Механика машин, механизмов и материалов. № 3, 2011. С 74-78

4. Климович О.В. Экспериментальные исследования рекуперативного привода системы очистки зернового вороха комбайна/ - интернет ресурс:

https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/15407/1/2011_6.3.ehksperimentalnye.pdf?ysclid=m0wbs9jqtc448712984 - дата доступа: 10.09.2024

5. Система очистки зерноуборочного комбайна: пат. 128061 РФ, МПК A01A12/44 / Н.Н. Устинов, Д.С. Мартыненко, Н.И. Смолин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тюменская государственная сельскохозяйственная академия» ; заявл. 26.10.12 ; опубл. 20.05.13.

6. Мартыненко, Д.С. Повышение эффективности системы очистки зерноуборочного комбайна путем применения рекуперативного привода решет и транспортной доски : дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Д.С. Мартыненко. – Тюмень, 2015. – 170 с.

7. Очистка зерноуборочного комбайна. Патент на полезную модель BY 2975. МПК 7 A 01D 69/00. Дюжев Андрей Анисимович (BY); Иоффе Марк Павлович (BY); Жмайлик Валерий Алексеевич (BY); Соловей Николай Федорович ; заявл. 24.02.06 ; опубл. 30.08.06.

8. Дубовик Д.А. Влияние сайлентблоков на динамическую нагруженность привода механизма очистки / Д. А. Дубовик, В.И. Прибыльский, Н.П. Першукевич, А.С. Шантыко, А.Н. Вырский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы международ. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – с. 82-83.

9. Шантыко А.С. Экспериментальная оценка влияния сайлентблоков на нагруженность привода очистки / А. С. Шантыко, А. Н. Вырский, Д. А. Дубовик, Н.П. Першукевич, О.А. Баран // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе - сегодня и завтра : сборник тез. докл. IV международ. науч.-практ. конф. – Гомель : НТЦК ОАО «Гомсельмаш», 2020. – с. 45-46.

10. Дубовик Д.А. Оценка влияния силовых факторов на динамическую нагруженность и виброактивность рекуперативного привода колеблющихся рабочих органов сельхозмашины / Д.А. Дубовик, Першукевич Н.П., Прибыльский В.И., Вырский А.Н. // Актуальные вопросы машиноведения. – 2022 (Выпуск 11). – С. 146-149.

УДК 631.354

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК В СОСТАВЕ ЗЕРНОУБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А.И. Козлов
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Беларусь

Аннотация. В работе представлены результаты исследования целесообразности применения прототипирования и создания литейной формы для топологически оптимизированной литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10. Автором проиллюстрирован подход к созданию расчетной модели и прототипа будущей литейной формы для исследования процесса струйной печати кварцевым песком со связующим веществом «Binder Jetting». По результатам созданной модели предложено техническое решение, позволяющее снизить металлоемкость литой опоры узла МСУ и рассмотреть альтернативный метод ее изготовления.

Введение. Литейное производство продолжает играть важную роль в современном машиностроении. Способом литья изготавливается от 50% до 90% деталей машин и оборудования таких, как валы, конструкции, шестерни, диски и прочее. Это наиболее простой, надежный и эффективный способ получения в необходимом количестве заготовок или отливок требуемого размера и формы.

На современном этапе в литейное производство активно внедряются инновации, призванные сделать изготовление отливок более эффективным по затратам сырья, времени, ресурсов, снизить уровень связанных с литейным производством запыленности, задымленности, шума, вибраций, теплового излучения, а также повысить качество готовой продукции.

Ниже автором проиллюстрирован подход к созданию расчетной модели и прототипа будущей литейной формы для исследования процесса струйной печати кварцевым песком со связующим веществом «Binder Jetting».

Объект исследования: технологические процессы производства литейных конструкций и заготовок в сельскохозяйственном машиностроении.

Предмет исследования: совершенствование изготовления литейной формы для топологически оптимизированной литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10 с помощью

технологии струйной печати кварцевым песком со связующим веществом «Binder Jetting».

Цель исследования: рассмотреть целесообразность применения прототипирования и создания литейных форм с целью получения как готовых конструкций, так и опытных образцов изделий при помощи новейшего оборудования для аддитивных технологий в области сельскохозяйственного машиностроения.

Методология исследования: Для исследования возникшей научно-технической проблемы был использован анализ и интерпретация научной литературы по проблеме исследования; сравнительно-сопоставительный метод для анализа технологических процессов производства литейных конструкций и заготовок; математические и графические методы для проведения CAE-анализа. Для топологической оптимизация и расчета модели литой опоры узла МСУ, а также создания прототипа ее литейной формы были задействованы такие инструменты как:

– программный пакет CAD-моделирования и CAE-анализа ANSYS WORKBENCH R2 2024;

– специализированное ПО – слайсер 3D-моделей с открытым исходным кодом для 3D-принтеров;

– ProCAST – программное обеспечение для компьютерного моделирования литейных процессов изготовления литых деталей из металлических сплавов.

Результаты исследования.

После проведения всестороннего анализа традиционных технологий литья и аддитивных технологий приходим к заключению, что технологический процесс создания литейных песчаных форм для изделий со сложной геометрией может быть оптимизирован одной из технологий 3D-печати. Однако технология прямой печати изделия не отвечает нашим требованиям, поскольку с ее помощью мы получаем изделия с мелкодисперсной (гранулированной) структурой, которая, в свою очередь, не способна обеспечить нужный запас прочности исследуемой детали, а также требует дополнительных производственных издержек ввиду необходимости последующей обработки поверхности полученной детали. Помимо этого, данная технология печати является достаточно времязатратной, а также связана с использованием дорогостоящего лазерного оборудования и сырья. Если рассматривать возможность применения 3D-печати технологической оснастки для выбранного нами изделия, то мы опять же сталкиваемся с проблемой повышенных временных затрат, равно как и с проблемой точности и качества изготовления, которое требует коррекции за счет финишной обработки будущей продукции.

Таким образом, с учетом параметров времени, качества, точности и экономичности изготовления струйная печать связующим веществом

(CJP) как нельзя лучше подходит для поставленных в нашей работе целей оптимизации литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10. С нашей точки зрения, оптимальным вариантом может выступить разновидность струйной печати связующим веществом – Binder Jetting.

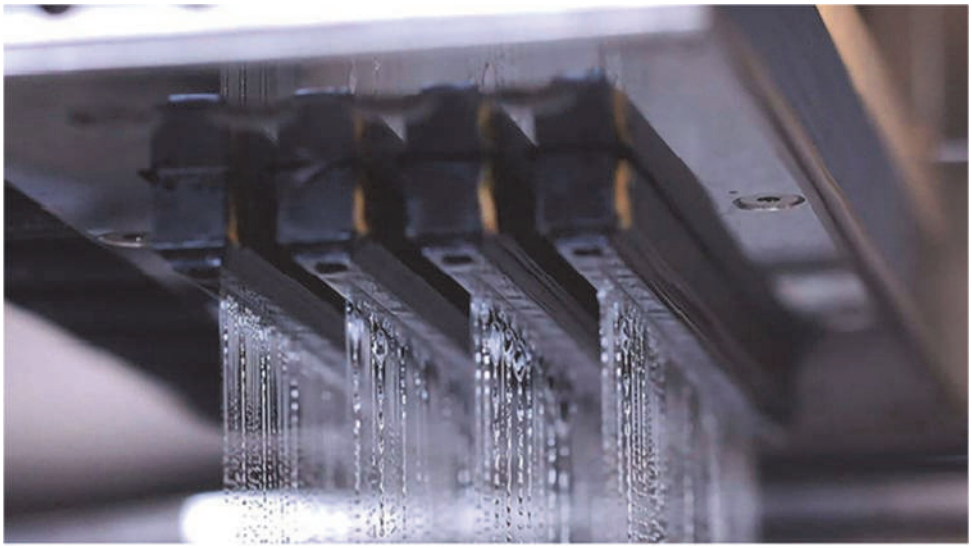


Рис. 1 – Струйная печать связующим веществом Binder Jetting

Напомним, что одной из задач, стоящих сегодня перед конструкторами машиностроительной отрасли, является снижение массы и увеличение удельной прочности конструкций сельскохозяйственной техники. Выполнение поставленной задачи напрямую связано с поиском оптимальных геометрических параметров проектируемого изделия. В настоящее время для подобного рода технологических решений используются методы топологической оптимизации (ТО).

Топологическая оптимизация – это оптимизация распределения материала в проектной области при воздействии на нее заданных нагрузок и использовании ограничений различного рода. Следовательно, ее целью является определение оптимального распределения материала в области проектирования при заданных нагрузках с удовлетворением критериев оптимизации, иначе говоря, определение лучшего использования материала для исследуемого объекта или конструкции, так, чтобы целевая функция параметра имела максимальное или минимальное значение при наличии существующих ограничений. В отличие от традиционной топологическая оптимизация не требует указания параметров оптимизации (т.е. независимых переменных, подвергаемых оптимизации) в явном виде. В топологической оптимизации параметром оптимизации является функция распределения материала по объему конструкции. Таким образом, основной особенностью задач оптимизации размеров является то,

что область проектирования известна заранее, и она фиксирована в процессе оптимизации, а переменной проектирования является сама форма.

В рамках настоящего исследования топологической оптимизации подлежит масса литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301, изготовленной по технологии струйной печати Binder Jetting, в составе зерноуборочного комбайна GS10. Для проведения топологической оптимизации исследуемого изделия используется программный пакет «ANSYS WORKBENCH 2024 R2». Выбор в пользу вышеуказанного пакета объясняется тем, что среда ANSYS WORKBENCH является основным инструментом, на котором базируется концепция «Проектирование изделий на основании результатов инженерных расчетов». Тесная интеграция между компонентами приложений дает беспрецедентную легкость использования при подготовке и проведении расчетов, а также при решении сложных междисциплинарных задач. Данное ПО позволяет провести точную оценку и анализ топологии структуры изделия в соответствии с задачами, поставленными в нашем исследовании.

На рисунке 2 представлена литая опора узла МСУ КЗК-10-0102301, изготовленная из стали 30Л ГОСТ 977-88.

Рис. 2 – Литая опора узла МСУ КЗК-10-0102301

Механизм молотильного аппарата зерноуборочного комбайна GS10 является узлом, в котором возникают различные формы частот собственных колебаний и большие центробежные силы, старающиеся склонить комбайн в процессе эксплуатации на одну из рабочих сторон.

Для решения вышеописанной проблемы конструкторами были предложены литые опоры КЗК-10-0102301 с распорными балками, способные воспринимать нагрузки до 4 тонн массы на каждую из сторон узла МСУ машины.

Данное решение позволило привнести в зерноуборочную технику баланс при работе в поле, во избежание завала комбайнов на одну из рабочих сторон.

Проведен CAE-анализ исходного варианта литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10 при помощи программного пакета «ANSYS WORKBENCH 2024 R2».

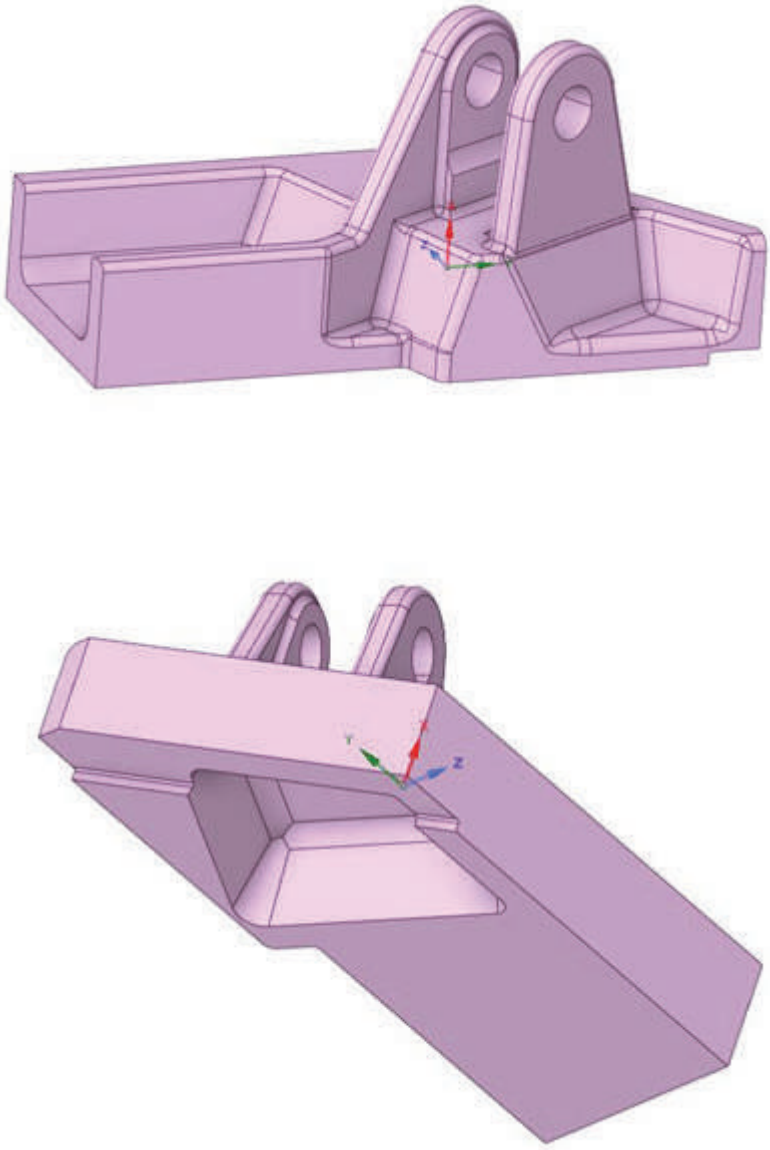


Рис. 3 – CAD-модель литой опоры КЗК-10-0102301

На рисунке 3 представлена модель исходной литой опоры. Данная иллюстрация получена с помощью программного модуля «Ansys SpaceClaim».

Масса исходного варианта литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 составляет почти 5 кг.

На рисунке 4 представлены массовые характеристики данной детали, полученные из программного модуля «Ansys Mechanical».

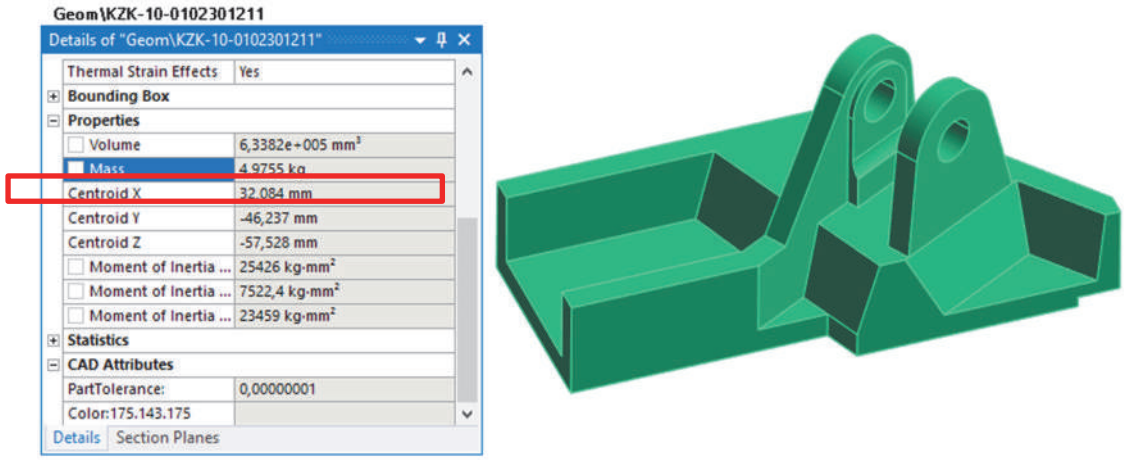


Рис. 4 – Массовые характеристики опоры КЗК-10-0102301

Режим нагружения исследуемой детали для осуществления CAE-анализа следующий: конструкция нагружена собственным весом и весом основных узлов с учетом поперечной инерции 0,35g направленной влево/вправо по ходу движения машины, без учета динамики вертикальной плоскости ($К_д$ = 1).

На рисунке 5 представлена расчетная схема для указанного выше режима нагружения.

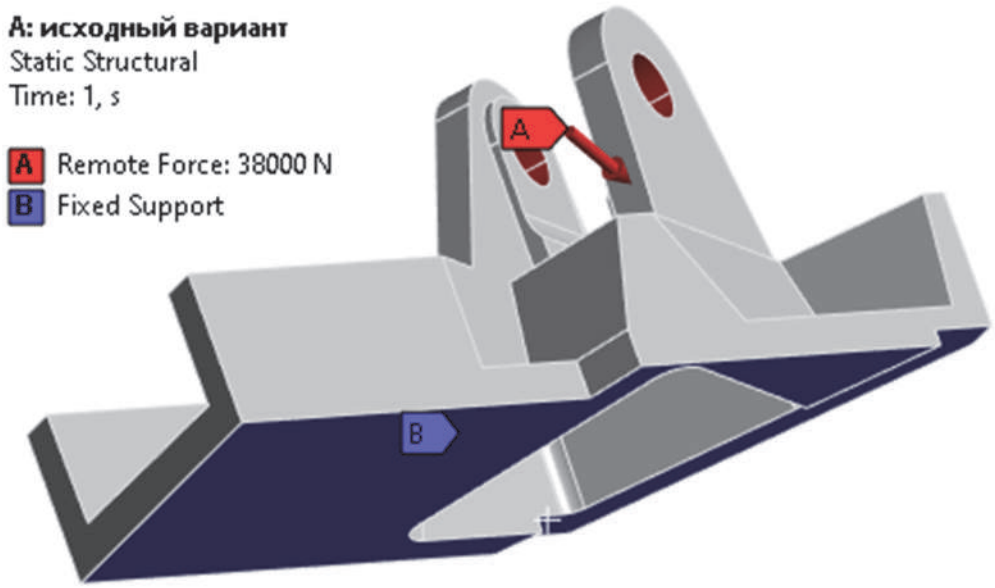


Рис. 5 – Расчетная схема для рассмотренного режима нагружения

Литая опора узла МСУ КЗК-10-0102301 жестко закреплена в нижней платформе, сила F = 38000 Н, соответствующая 3,8 тоннам массы основных узлов зерноуборочного комбайна GS10, направлена под углом 20° по оси X по ходу движения машины без учета динамики вертикальной плоскости.

На рисунке 6 изображены поля эквивалентных напряжений в исходной литой опоре для рассматриваемого в работе режима нагружения.

Как следует из рисунка 6, максимальные эквивалентные напряжения в конструкции для режима нагружения таковы:

– в зоне А (рис. 6) составляет σ_{max}= 104 МПа, запас прочности для стали 30Л (предел текучести σ_t = 350 МПа) без учета снижения механических характеристик от сварных швов составит n = 3,37.

– в зоне В (рис. 6) составляет σ_{max} = 145,2 МПа, запас прочности для стали 30Л (предел текучести σ_t = 350 МПа) без учета снижения механических характеристик от сварных швов составит n = 2,41.

– в зоне С (рис. 6) составляет σ_{max} = 150 МПа, запас прочности для стали 30Л (предел текучести σ_t = 350 МПа) без учета снижения механических характеристик от сварных швов составит n = 2,33.

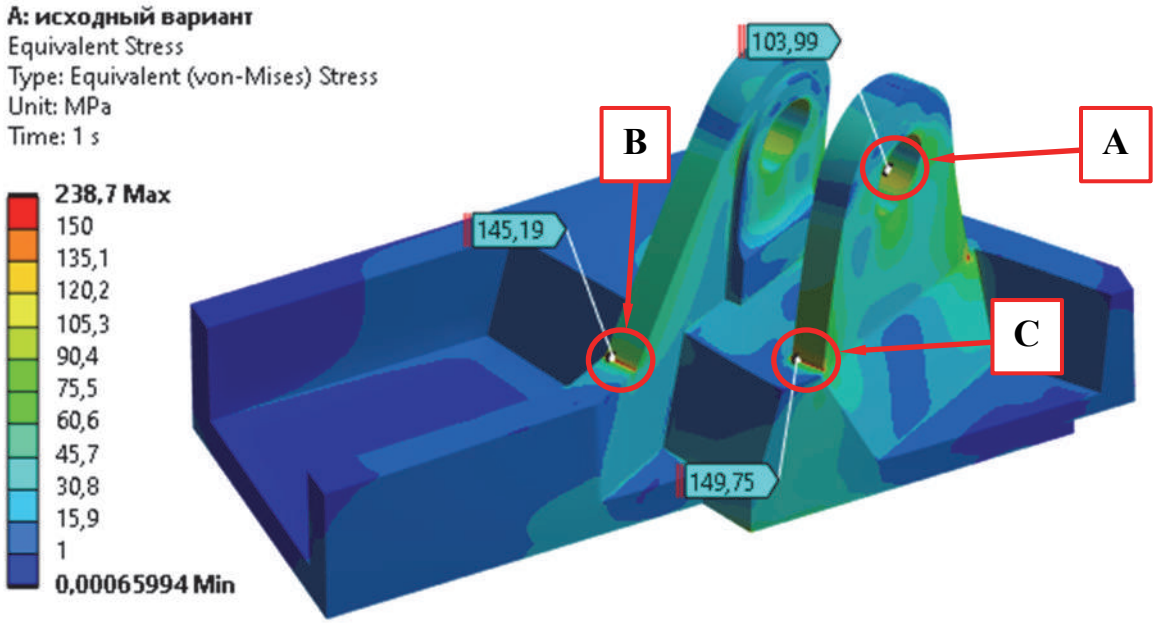


Рис. 6 – Поля эквивалентных напряжений в исходной литой опоре

Исходя из результатов напряженного состояния, представленных на рисунке 6, видим, что запасы прочности исходной литой опоры при заданных нагрузках превышают значение в *n* = 2, что является достаточным условием для обеспечения прочности изделия, изготовленного из стали 30Л ГОСТ 977-88.

На рисунке 7 представлены поля перемещений (общие деформации) детали по оси Z.

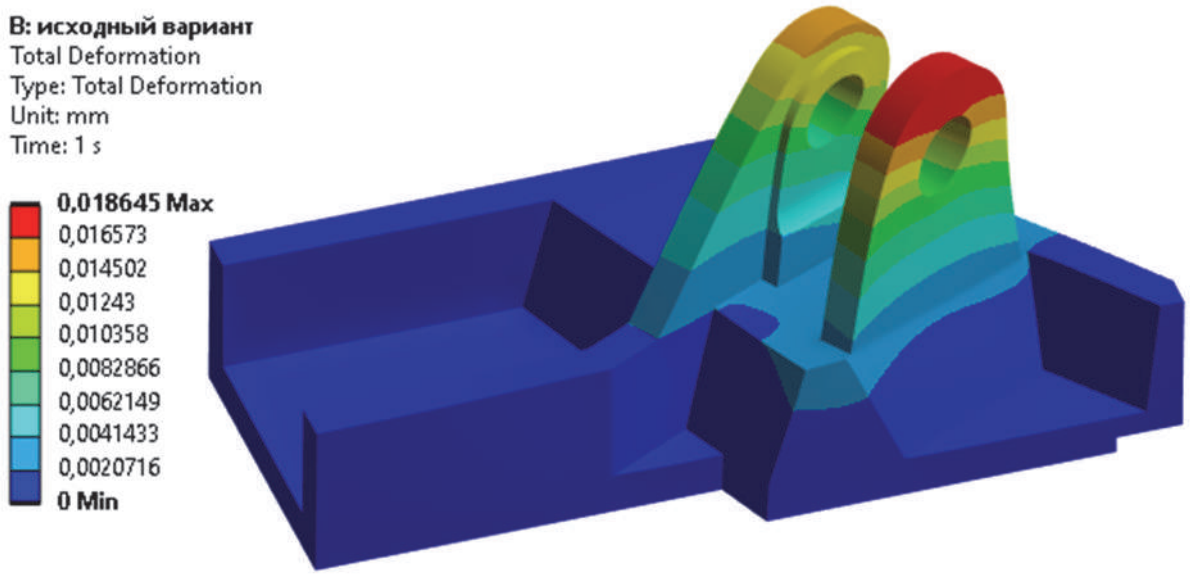


Рис. 7 – Поля перемещений по оси Z

Расчеты указывают на то, что деформации литой опоры КЗК-10-0102301 являются незначительными.

В результате проведенного CAE-анализа исходной литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10 можем утверждать, что данное изделие нуждается в топологической оптимизации. Поскольку прочностные запасы существенно превышают норму, и общие деформации литой опоры незначительны, − это дает нам возможность оптимизации массы изделия, способной привести к уменьшению массы всего узла машины, и, как следствие, к экономии металлической массы на производстве с сохранением прочностных запасов деталей.

Для проведения топологической оптимизации воспользуемся программным модулем «Ansys Structural Optimization», в который входит инструмент «Topology Optimization».

Алгоритм данного программного модуля находит наилучшее распределение материала в пределах заданной цели и системы ограничений. Он берет цельный объем материала произвольной формы и постепенно удаляет его часть, при этом максимизирует или минимизирует такие целевые параметры, как масса, перемещение или податливость, и обеспечивает одновременное соответствие заданным требованиям и ограничениям на максимальные допускаемые напряжения или перемещения.

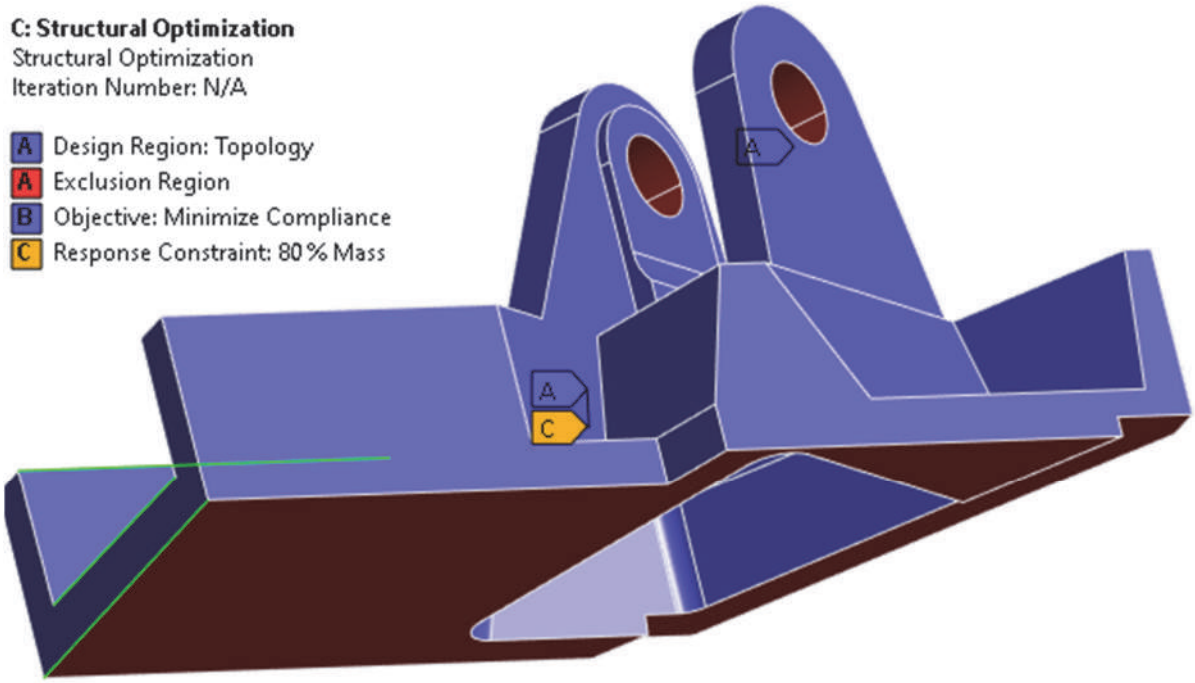


Рис. 8 – Подготовка детали и задание граничных условий топологической оптимизации

Программный результат топологической оптимизации литой опоры представлен на рисунке 9.

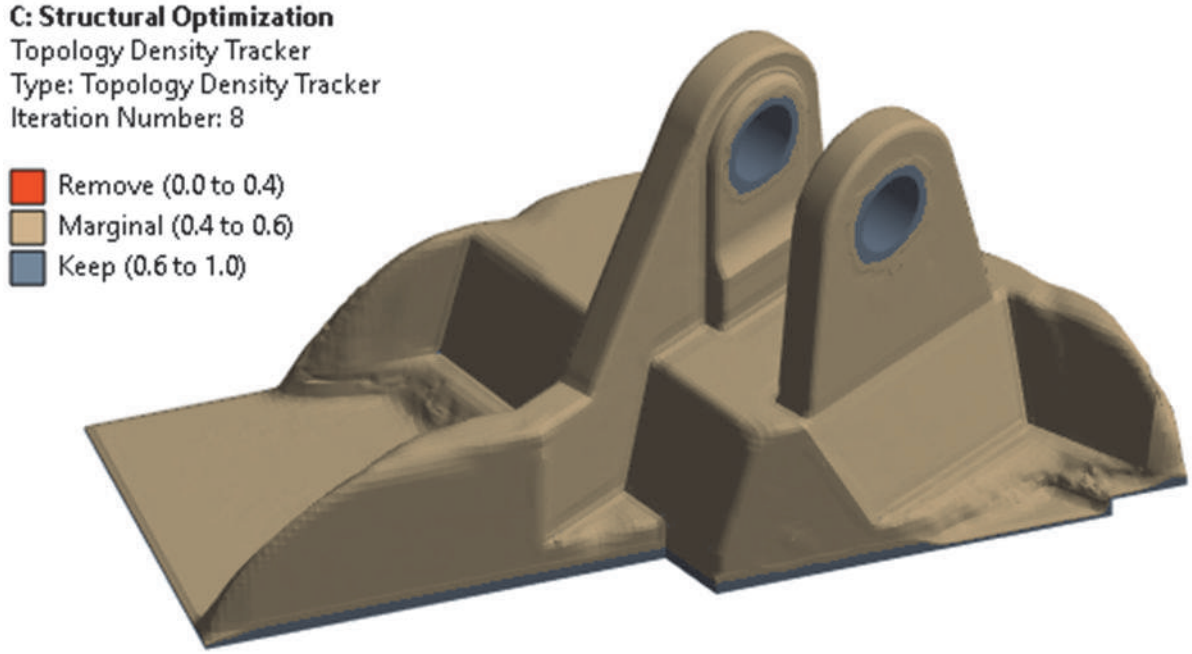


Рис. 9 – Результат топологической оптимизации изделия

Исходная литая опора подверглась существенным изменениям после симуляции процесса топологической оптимизации в программном модуле

«Ansys Structural Optimization». Из рисунка 10 видно, что основной акцент на удаление массы пришелся на стенки опоры, а именно:

− уменьшилась толщина и высота стенок;

− уменьшились толщины и высоты ребер жесткости.

Как следует из лога результатов симуляции процесса, опора сохранила 80% от своей прежней массы, что является неплохим показателем и результатом успешного проведения топологической оптимизации.

Также по результатам топологической оптимизации мы получили сложную, необычную и футуристическую структуру нашего будущего прототипа литой детали. На ее основе возможно формирование модели изделия для запуска в производство.

На рисунке 10 представлена доработанная объемная геометрия литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10 после проведения симуляции процесса топологической оптимизации с целью изменения массы исходного изделия.

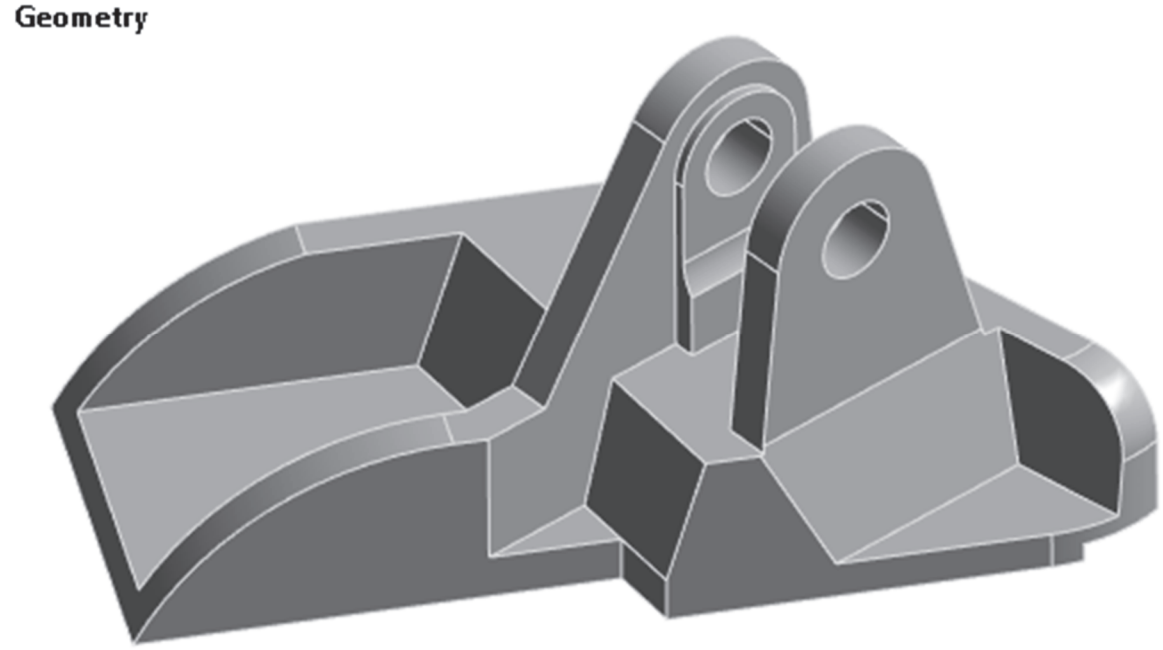


Рис. 10 – Предлагаемый вариант литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10

Масса предлагаемого варианта литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 составляет 4,2 кг, как следствие, разница в сравнении с исходным вариантом составила 0,7 кг.

На рисунке 11 продемонстрированы массовые предлагаемой детали, полученные из программного модуля «Ansys Mechanical».

Проводим повторный расчет доработанного изделия, чтобы удостовериться в сохранении его прочностных запасов для заданного ранее режима нагружения.

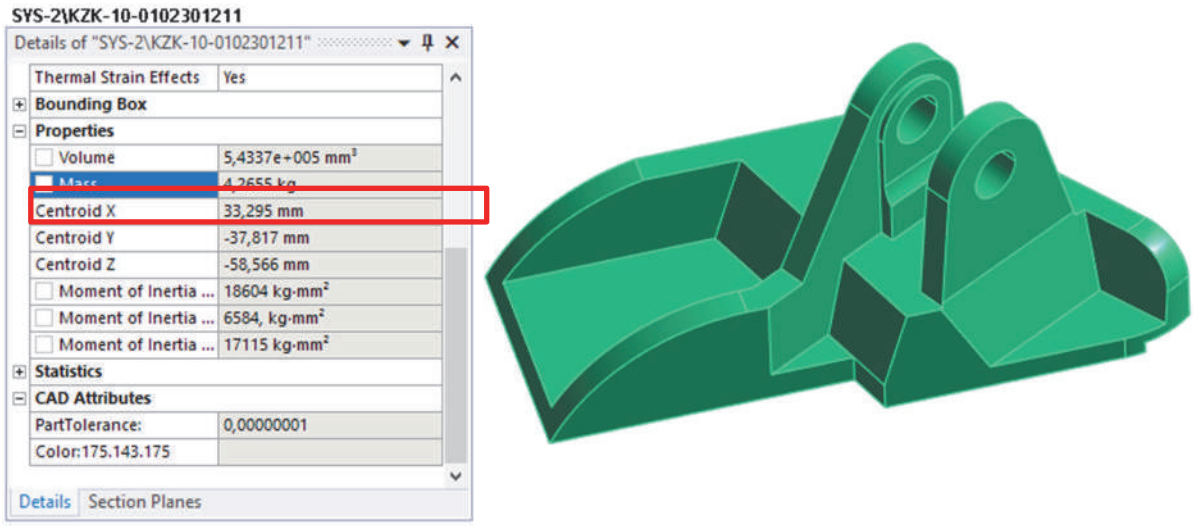


Рис. 11 – Массовые характеристики предлагаемой опоры КЗК-10-0102301

На рисунке 12 изображены поля эквивалентных напряжений в предлагаемой литой опоре для заданного режима нагружения.

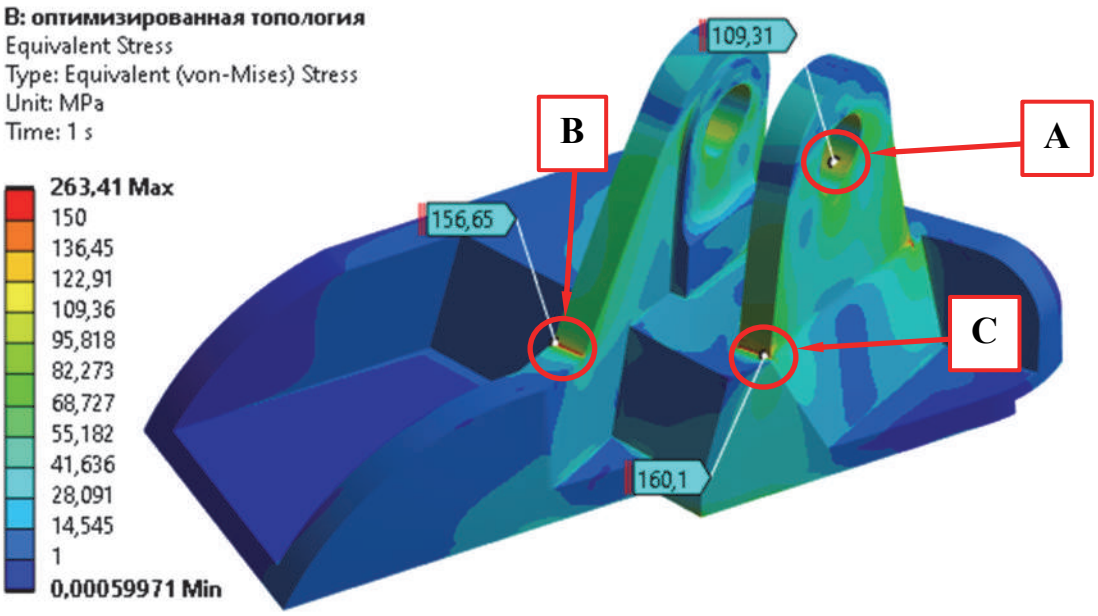


Рис. 12 – Поля эквивалентных напряжений в предлагаемой литой опоре

Как следует из рисунка 12, максимальные эквивалентные напряжения в конструкции для данного режима нагружения:

– в зоне А (рис. 12) составляет σ_{max} = 109 МПа, запас прочности для стали 30Л (предел текучести σ_t = 350 МПа) без учета снижения механических характеристик от сварных швов составит n = 3,21.

– в зоне В (рис. 12) составляет σ_{max} = 157 МПа, запас прочности для стали 30Л (предел текучести σ_t = 350 МПа) без учета снижения механических характеристик от сварных швов составит n = 2,23.

– в зоне С (рис. 12) составляет σ_{max} = 160 МПа, запас прочности для стали 30Л (предел текучести σ_t = 350 МПа) без учета снижения механических характеристик от сварных швов составит n = 2,19.

Исходя из результатов напряженного состояния, представленных на рисунке 12, видно, что запасы прочности предлагаемой литой опоры при заданных нагрузках превышают значение в *n* = 2, что является достаточным условием для обеспечения прочности изделия, изготовленного из стали 30Л ГОСТ 977-88.

Рисунок 13 иллюстрирует поля перемещений (общие деформации) детали по оси Z.

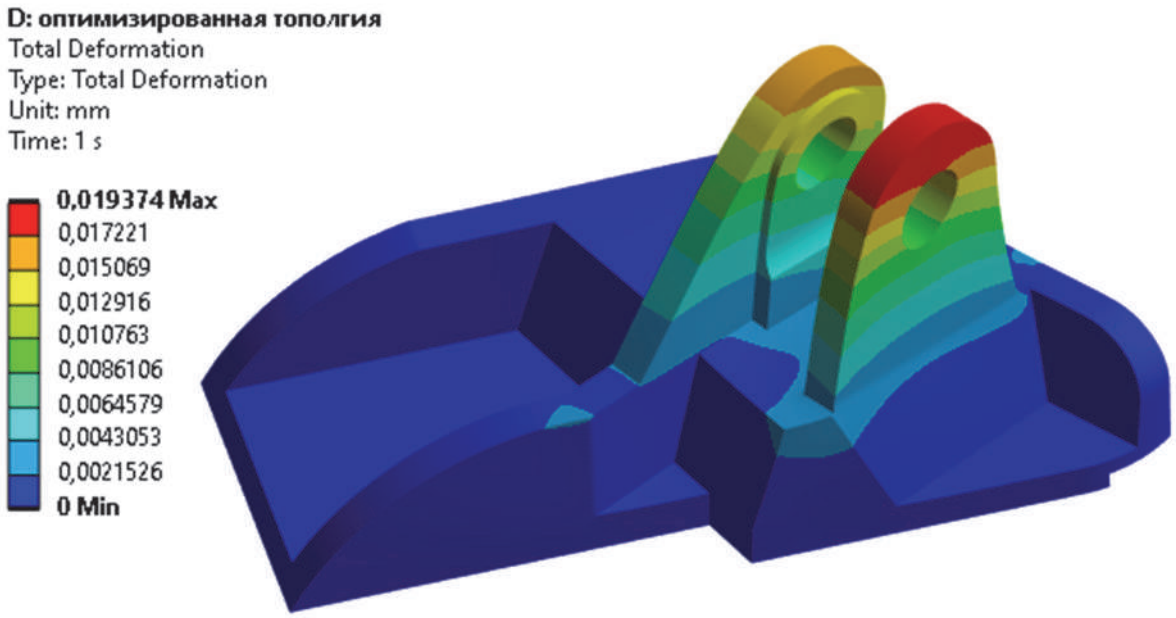


Рис. 13 – Поля перемещений по оси Z

Результаты расчета показывают, что перемещения предлагаемой литой опоры КЗК-10-0102301 по сравнению с исходным вариантом изделия практически не изменились.

Проведенный CAE-анализ предлагаемой литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10 позволяет утверждать, что полученное изделие ничем не уступает по техническим и механическим характеристикам своему предшественнику:

− запасы прочности как исходной, так и оптимизированной литой опоры при заданных нагрузках превышают значение n > 2, что является достаточным;

– поля перемещений в обоих вариантах изделия практически идентичны и являются незначительными.

Приводя к снижению массы исследуемой детали, топологическая оптимизация одновременно уменьшает металлоемкость узла МСУ, обеспечивая, таким образом, экономию металлической массы на производстве в размере 0,7 кг на единицу изделия.

Далее будут представлены элементы модельной оснастки будущего опытного образца литейной формы для изготовления литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10.

На рисунке 14 и 15 продемонстрированы CAD-модели исходной отливки и предложенного оптимизированного варианта литой опоры соответственно.

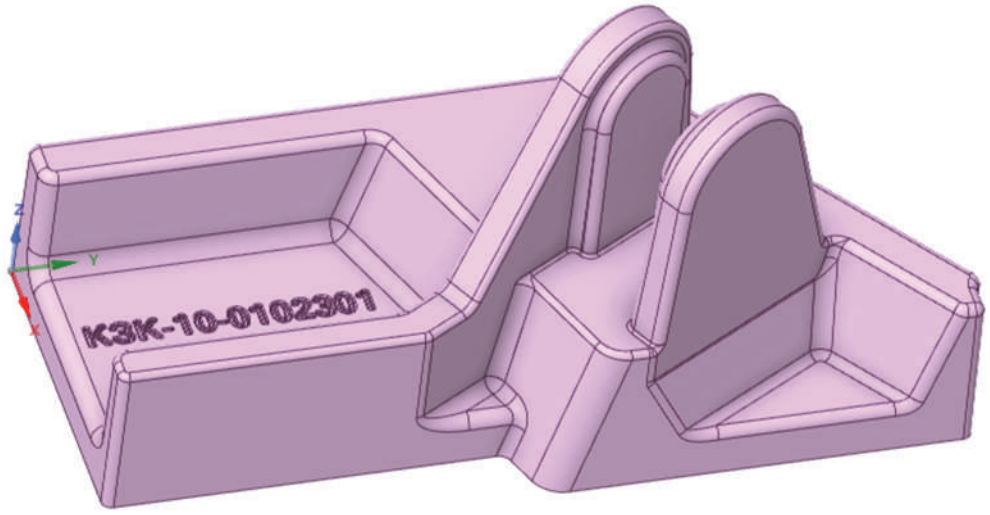


Рис. 14 – CAD-модель отливки исходного варианта литой опоры КЗК-10-0102301

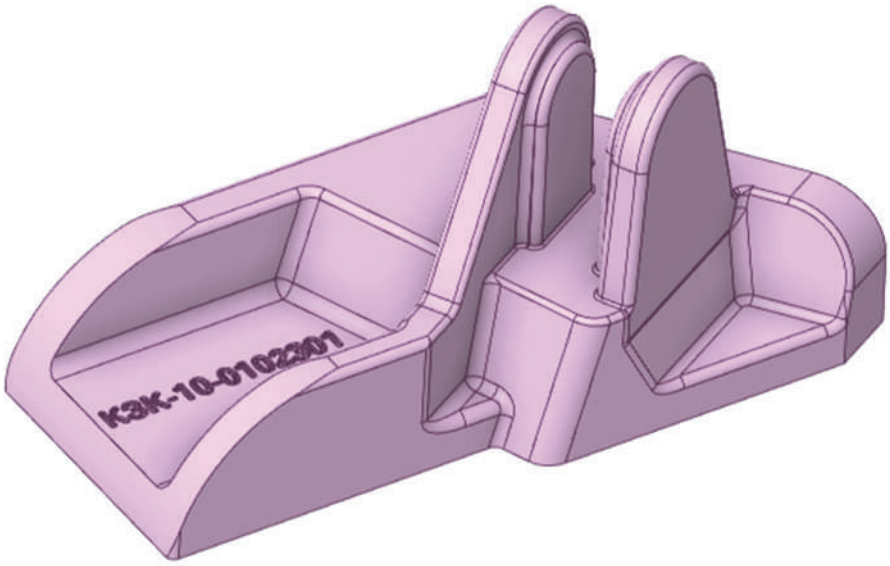


Рис. 15 – CAD-модель отливки предложенного варианта литой опоры КЗК-10- 0102301

На рисунках 16 и 17 изображены CAD-модели литниковой системы отдельно и в сборе с отливками соответственно.

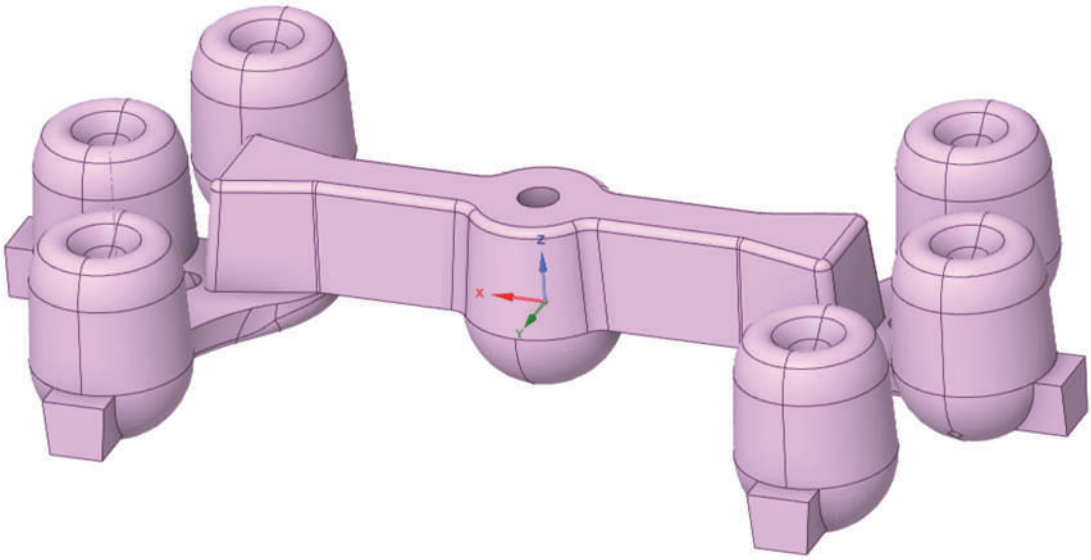


Рис. 16 – CAD-модель литниковой системы

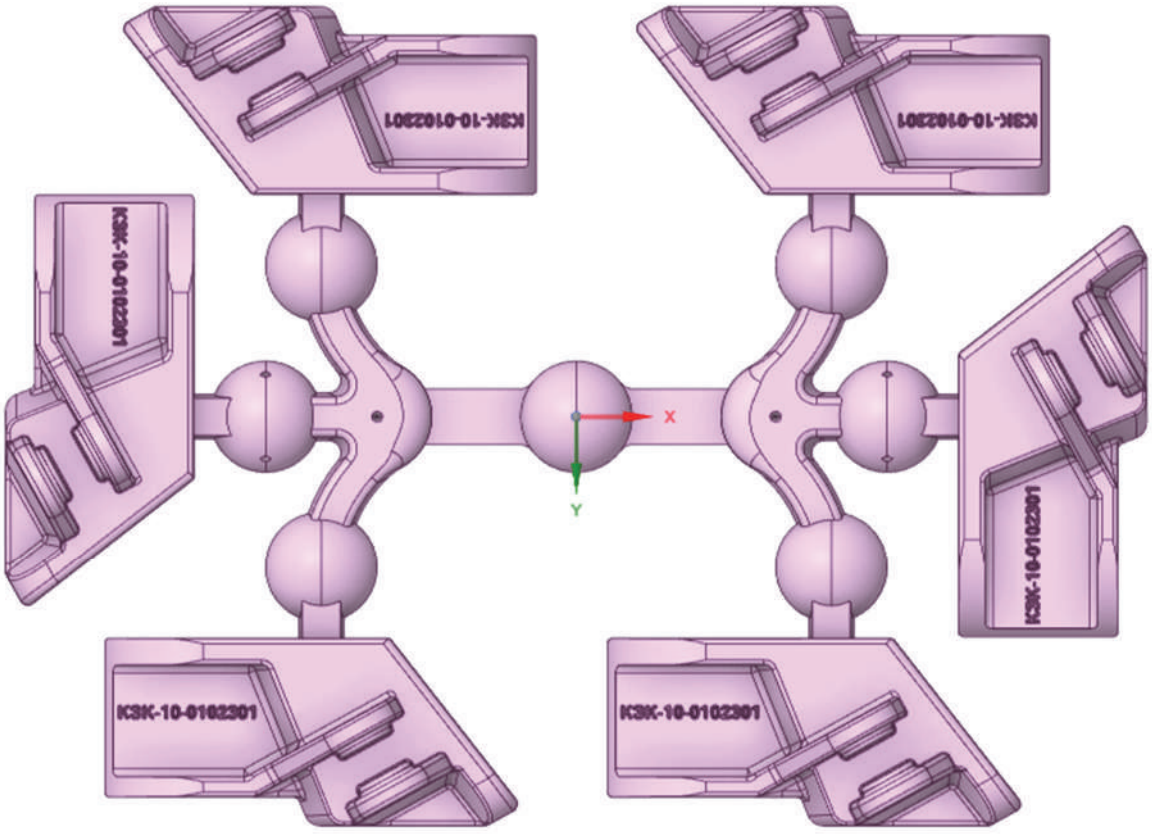


Рис. 17 – CAD-модель литниковой системы вместе с моделями отливок

Представленные выше элементы модельной оснастки литейной формы на производстве изготавливаются из чугуна, стали или алюминия, так как данные материалы являются самыми прочными. Модельная оснастка, выполненная из данных материалов, является самым надежным и долговечным вариантом, однако и одновременно самым дорогостоящим.

Такие изделия на производстве называют шаблонами. Стоимость их изготовления зависит как от материала, так и от сложности самих изделий. Шаблоны также можно изготавливать из пластиков, а в крайних случаях из дерева и фанеры, что является относительно экономичным вариантом, однако модельная оснастка изготовленная таким путем также требует специальной обработки.

Вариант печати литейной формы на специализированном принтере со встроенной технологией струйной печати «Binder Jetting», продемонстрированной ранее в настоящем исследовании, позволяет отказаться от дорогостоящей модельной оснастки, так как полости элементов модели литейной формы пропечатываются с очень высокой точностью, без сопутствующих деформаций. Также, по окончании печати модель формы не нуждается в запекании (нагреве) для увеличения ее прочностных характеристик, так как модель уже изготовлена из кварцевого песка со связующим веществом.

Представленные ниже иллюстрации демонстрируют итоговый вариант опытного образца литейной формы оптимизированной литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10 с сечениями в различных плоскостях будущего изделия.

На рисунке 18 показан опытный образец литейной формы.

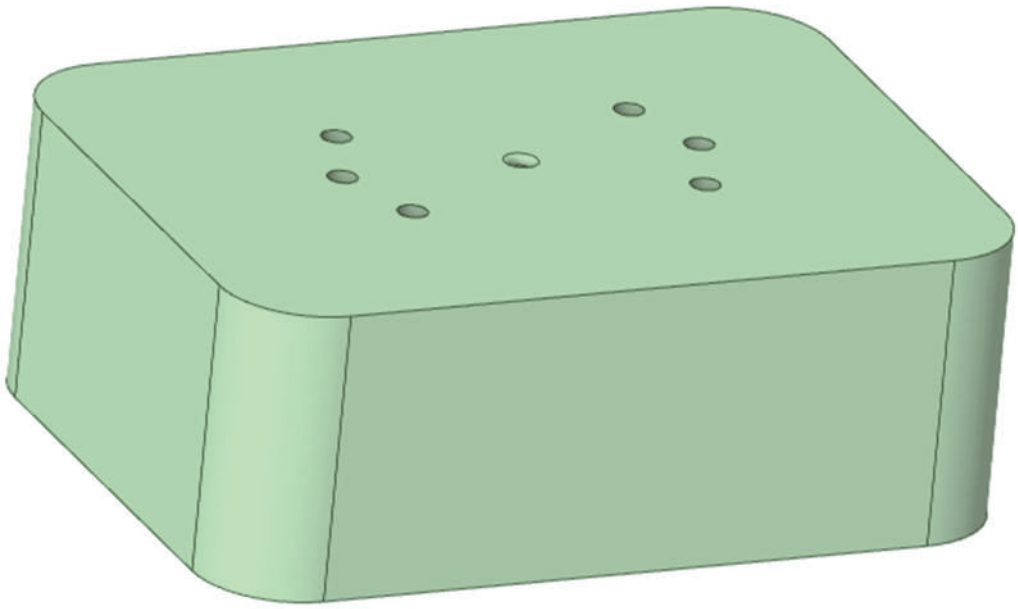


Рис. 18 – CAD-модель опытного образца литейной формы

На данном изображении видны отверстия литника, находящегося по центру модели и 6 отверстий под выпоры для каждой из моделей отливок.

Литник − рабочий элемент литьевой формы, предназначенный для литья под давлением. Литник оказывает существенное влияние на качество готового изделия, так как от его месторасположения зависит равномерное распределение сердцевинных компонентов при литье [8].

Для данной литейной формы расположение литника по центру является оптимальным вариантом.

Выпор − элемент литниковой системы, служащий для удаления газов из полости формы во время заливки и контроля заполнения литейной формы жидким металлом, а иногда для питания отливки жидким металлом во время ее остывания [8].

На рисунке 19 продемонстрирован разрез модели литейной формы в разных плоскостях.

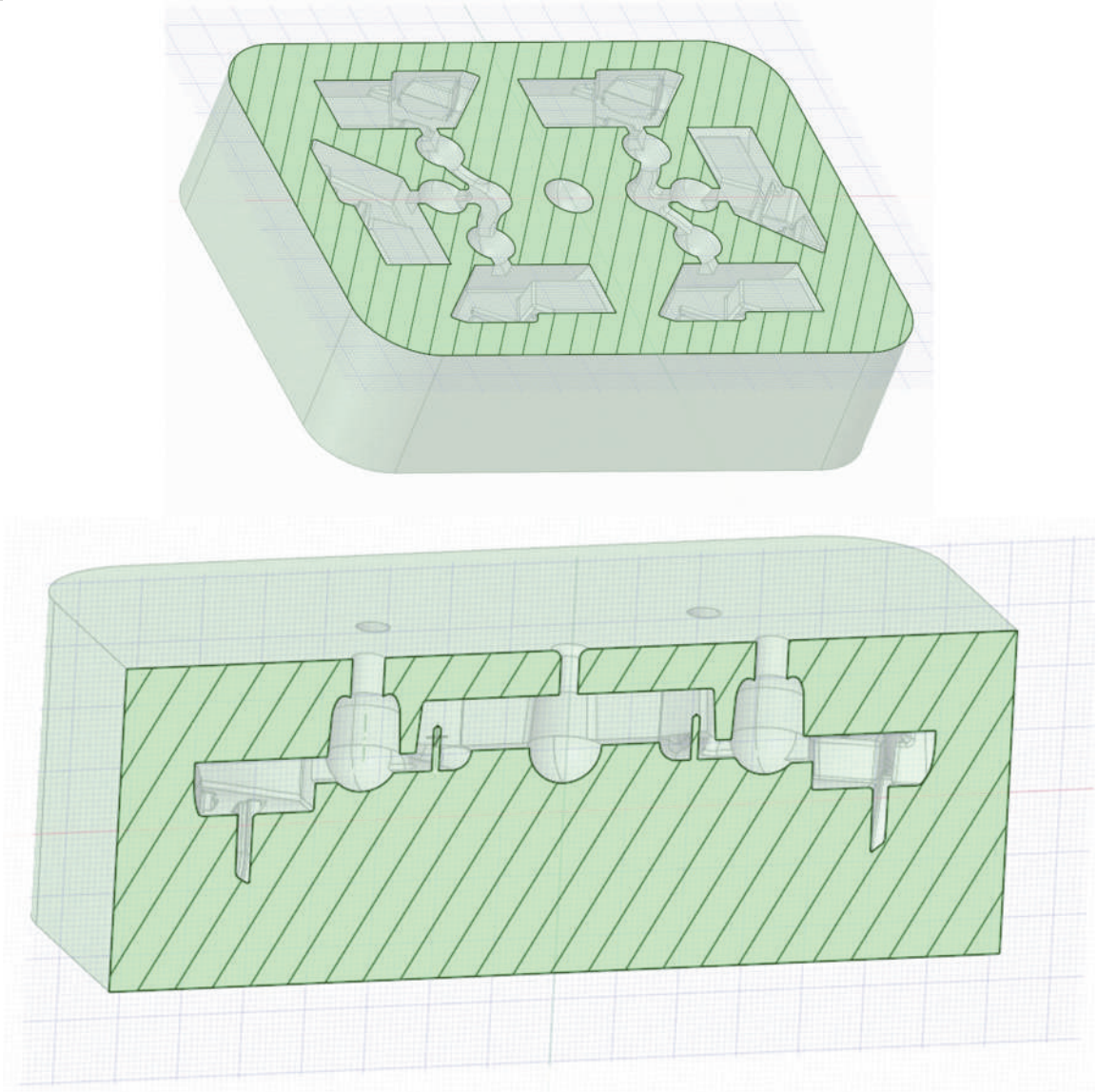


Рис. 19 – CAD-модель опытного образца литейной формы в разрезе

После завершения процесса CAD-моделирования опытного образца литейной формы для оптимизированных литых опор КЗК-10-0102301 преобразовываем файл с готовой геометрией изделия в формат STL, предназначенный для чтения 3D-принтерами.

После загрузки файла изделия в слайсер принтера можем наблюдать виртуальную рабочую область с моделью литейной формы внутри, как показано на рисунке 20.

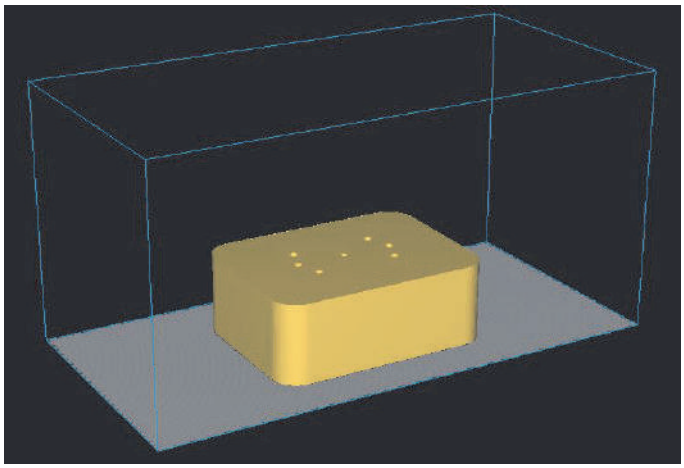


Рис. 20 – Виртуальная рабочая область принтера

Далее запускается процесс разбивки нашего будущего изделия на слои с заданием параметров печати. Результаты слайсинга модели представлены на рисунках 21 и 22.

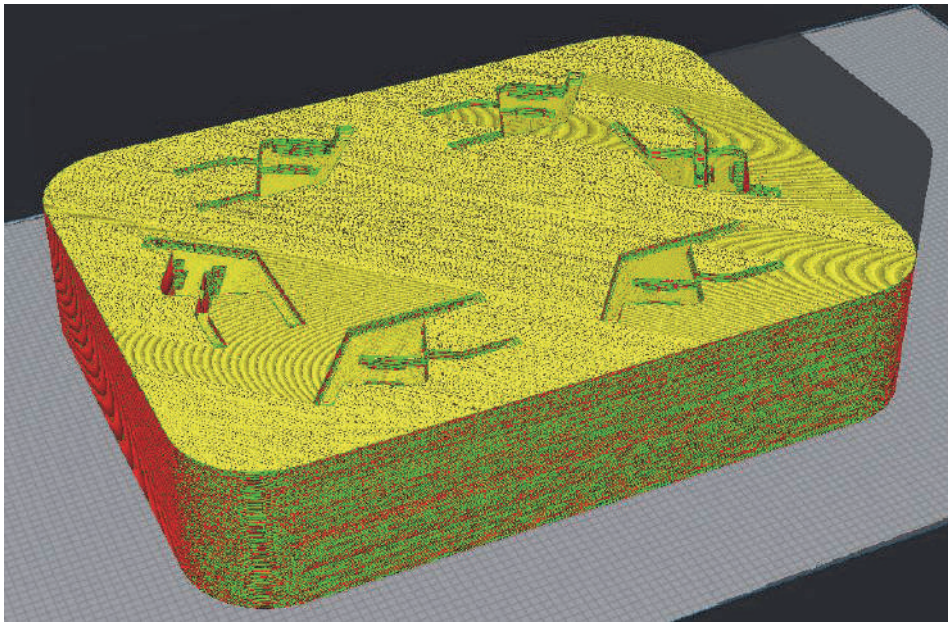


Рис. 21 – Визуализация слоя печати №180

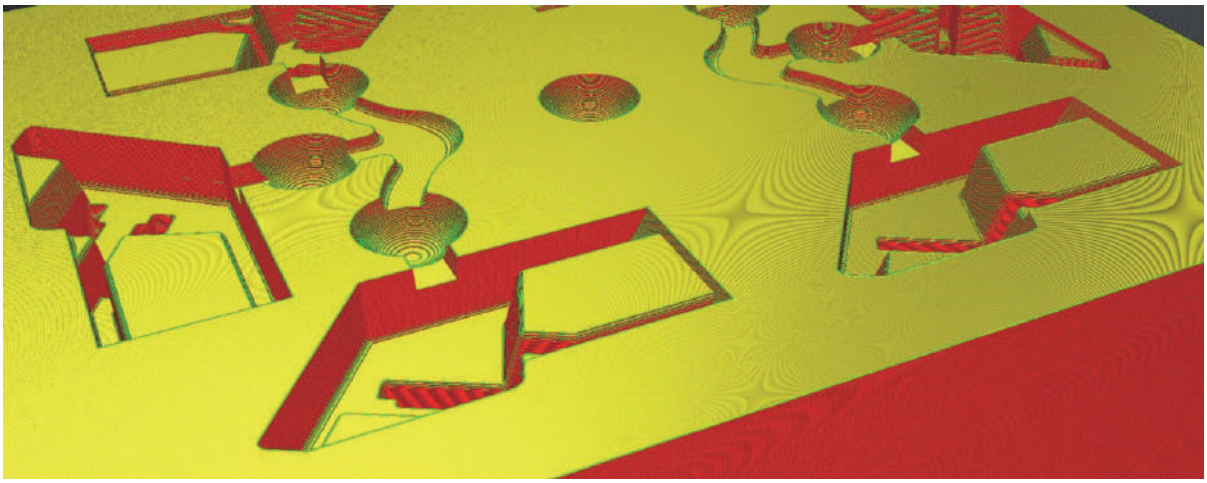


Рис. 22 – Визуализация слоя печати №210

Итог печати (см. рисунок 23) опытного образца представлен с помощью рентгена, на котором можно наблюдать полости от литниково-питающей системы с моделями отливок изделий.

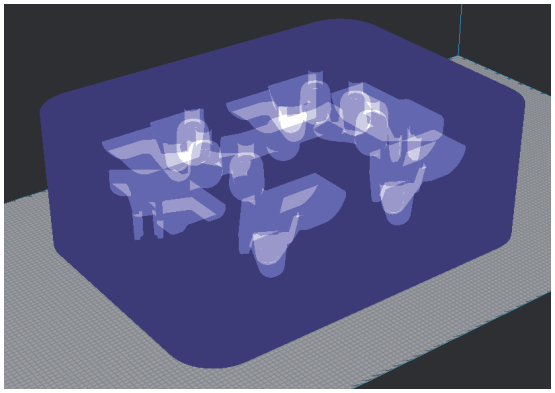


Рис. 23 – Визуализация результата печати опытного образца литейной формы оптимизированной литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 для зерноуборочного комбайна GS10

Выводы. Автором проведен CAE-анализ исходной литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10, который подтвердил целесообразность и необходимость топологической оптимизации. Последняя была выполнена посредством программного модуля «Ansys Structural Optimization», а точнее при помощи входящего в состав указанного ПО инструмента «Topology Optimization».

В результате выполненной оптимизации получена доработанная объемная геометрия литой опоры узла МСУ КЗК-10-0102301 зерноуборочного комбайна GS10, которая в сравнении с серийным вариантом изделия обладает очевидными преимуществами, а именно сниженной массой с сохраненными прочностными запасами и отсутствием значительных внутренних деформаций. Все это позволяет говорить об

уменьшении металлоемкости узла МСУ и, в целом, об экономии металлической массы на производстве в размере 0,7 кг на единицу изделия.

Выполненный в рамках исследования сравнительный анализ технологических процессов производства литейных конструкций и заготовок свидетельствует в пользу современной технологии струйной печати (в нашем случае – «Binder Jetting»), так как изготовление песчаных литьевых форм по данной технологии позволяет получать сложные формы с высокой точностью размеров, в сжатые сроки и по низкой стоимости. Также значимым плюсом рассматриваемой технологии является отсутствие деформации при печати форм.

Сегодня с уверенностью можно сказать, что технологии 3D-печати оказывают революционное влияние на многие отрасли индустрии, включая литейное производство в области сельскохозяйственного машиностроения. В частности применение технологии «Binder Jetting» для изготовления литейных форм из кварцевого песка открывает новые перспективы для производства, снижая его трудоемкость и исключая необходимость использования дорогостоящей модельной оснастки.

Метод рассмотренный в исследовании является перспективным и может успешно внедрен в производственный процесс холдинга ОАО «ГОМСЕЛЬМАШ» для изготовления опытных деталей с помощью литья, а в также в ближайшем будущем в серийном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонтьев Н.В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». Нижний Новгород, 2006, 101 с.

2. Басов, К.А. ANSYS справочник пользователя/ К.А Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

3. Reddy, J.N. An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis/ J.N. Reddy. – Oxford University Press, 2004. – 488 с.

4. Клочков, А.В. Зерноуборочные комбайны / А.В. Клочков, А.В. Адась, В.А. Попов. – Мн: Дизайн ПРО, 2004. – 240с.

5. Козлов, А. И. К вопросу об оптимизации процесса производства сельскохозяйственной техники / А. И. Козлов, С. Н. Бобрышева (науч. рук.) // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе − сегодня и завтра: сб. науч. ст. 8-ой междунар. науч.-практ. конф.: В 2 ч. − Гомель: НТЦК ОАО «Гомсельмаш», 2024. – С. 202–205.

6. Козлов, А. И. Пожаробезопасность термопластических материалов / А. И. Козлов, С. Н. Бобрышева (науч. рук.) // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XX междунар. науч.–техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2020 г. / М–во образования Респ. Беларусь, Гомел.

гос. техн. ун–т им. П. О. Сухого ; под. общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 89–91.

7. Козлов, А.И. Повышение виброустойчивости конструкции рамки крепления вентилятора /А.И. Козлов, А.Н. Кондрашова, Н.Л. Прокопенко // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе − сегодня и завтра: сб. науч. ст. 8-ой междунар. науч.-практ. конф.: В 2 ч. − Гомель: НТЦК ОАО «Гомсельмаш», 2024. – С. 21–34.

8. Ложечко, Ю.П. Литье под давлением термопластов / Ю.П. Ложечко. – 2-е изд. – СПб. : ЦОП «Профессия», 2019. – 240 с.

УДК 620.178

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЮРАМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЛЬЦЕВ РЕЖУЩЕГО АППАРАТА ЖАТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Н.Н. Белая, Е.В. Пигенко
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В работе приведены результаты исследования твердости, микротвердости пальцев режущего аппарата жатки зерноуборочного комбайна в зависимости от технологического режима изготовления.

Ключевые слова: твердость, микротвердость, палец режущего аппарата жатки

Введение

Работа зерноуборочного комбайна определяется высокой интенсивностью сбора зерна в короткий временной промежуток, связанный с погодными климатическими условиями.

Исследования надежности современных зерноуборочных комбайнов разных марок показывают, что примерно 12…20% возможных отказов зерноуборочных комбайнов относятся к режущим аппаратам жаток [1,2]. 90% отказов режущего аппарата происходит из-за износа и поломок в местах крепления пальца к брусу. На износ деталей режущей пары оказывает влияние вертикальная сила, возникающая в результате процесса резания, под действием которой лезвие сегмента прижимается к режущей поверхности пальца [3-5], и воздействия агрессивных сред и материалов, что вызывает необходимость увеличения надежности и долговечности этих деталей.

В процессе эксплуатации зерноуборочных комбайнов в сезоне 2024-2025 гг. установлено, что надежность, качество и ресурс пальцев, в большей степени зависит от уровня упругой и остаточной деформации детали в местах крепления серийных отечественных пальцев к брусу. В значительно меньшей степени это относится к пальцу производства «MDW», Германия.

Доступным и достаточно простым методом контроля остаточных деформаций, а также возможности зарождения и развития трещин в исследуемых областях пальцев является определение твердости на поверхности и сердцевине детали, распределение микротвердости в поперечном сечении. Основными факторами, влияющими на величину твердости, являются химический состав материала и его термическая обработка.

Методика, оборудование и объекты исследования

Объектами исследований являлись сдвоенные пальцы режущего аппарата жаток зерноуборочного комбайна:1- ПЗЛ 1507030, 2 - ПЗЛ 1507030А, 3 - ПЗЛ 1507110 производства ОАО «Гомсельмаш», Беларусь, 4 - 12 MDW 003781532-М.1.0340-410 100001 производства «MDW», Германия (рис. 1).

а б в

Рис. 1 – Сдвоенные пальцы режущего аппарата жаток зерноуборочного комбайна: а - ПЗЛ 1507030А; б - ПЗЛ 1507110; в - 12 MDW 003781532-М.1.0340-410 100001

Исследования твердости и микротвердости материала в зависимости от термообработки велись на стационарном оборудовании: твердомер по Роквеллу ТР 5006 (ГОСТ 9013-59), микротвердомер ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76).

Определение твердости по Роквеллу, основано на вдавливании алмазной пирамиды с углом 120° в поверхность материала. Глубина вдавливания при нагрузке служит мерой твердости, (в нашем исследовании нагрузка составляла 150 кгс). При определении твердости по Роквеллу расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее 4 мм, расстояние центра отпечатка от края образца - не менее 3 мм. Толщина испытуемого образца должна быть не менее чем в 8 раз больше глубины вдавливания.

Для исследования тонких упрочненных слоев образцов пальцев использовались измерения по методу Викерса (СТБ 2307-2013). Определение микротвердости проводили при нагрузке 1,962 Н (200 гс)

путем вдавливания алмазной пирамиды, которая имеет угол при вершине в 136°.

Марка материала пальцев определялась с помощью экспресс-анализатора на углерод АН-7529М и спектрометра ЭМАС 200CCD. Измерения проводились согласно стандартным методикам с учетом их корректировки под поставленную задачу.

Образцы для исследования вырезались из мест крепления и в режущей части пальцев (рис. 2).

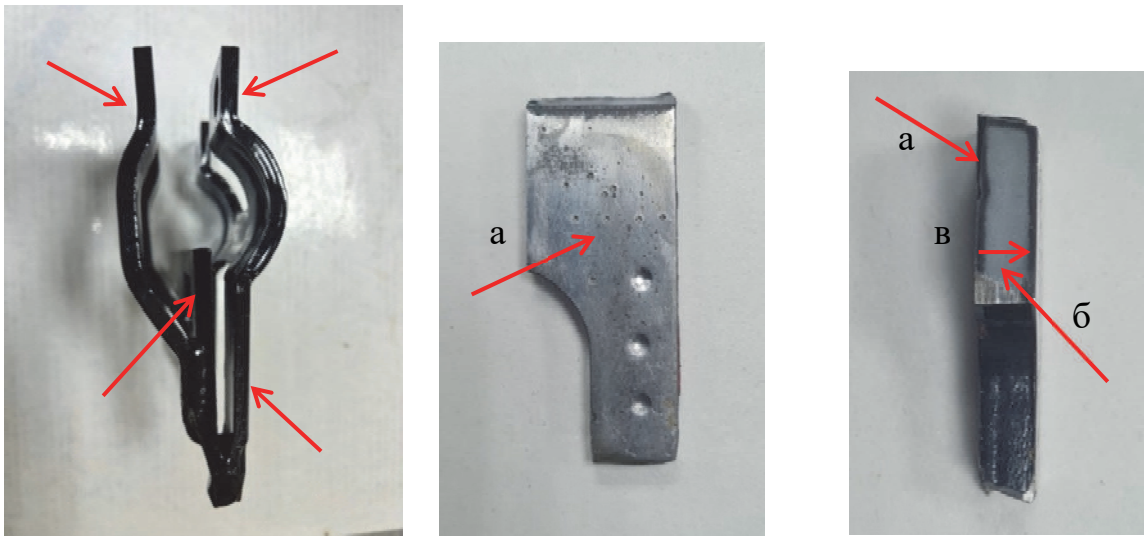


Рис. 2 – Места вырезки и измерения твердости и микротвердости образцов пальцев (а – твердость поверхности, б – твердость сердцевины, в – направление измерений микротвердости)

Стендовые испытания на жесткость и прочность, а также определение разрушающей нагрузки, проводились КСИиДМ НТЦК на установке СТ-364-0101000 в соответствии с программой-методикой (рис. 3). При испытаниях пальцы поочерёдно закреплялись на установке аналогично их креплению на жатке.

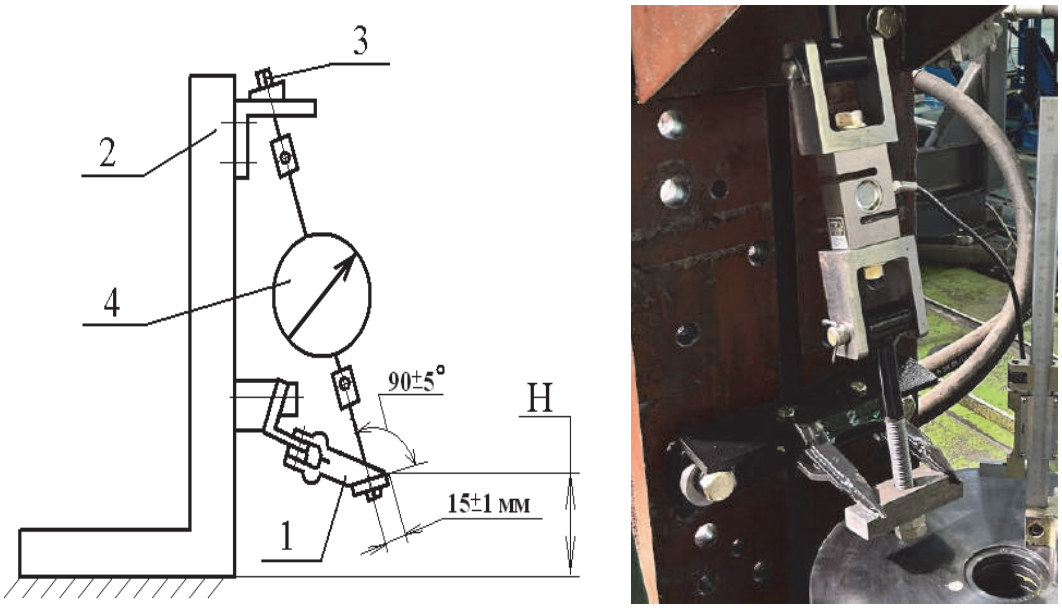


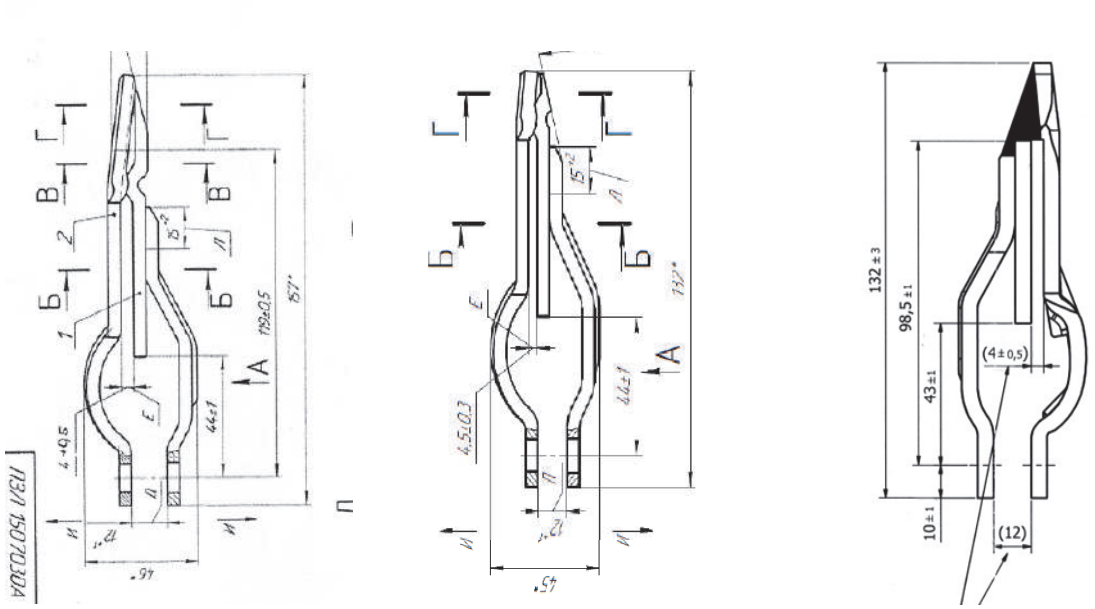
Рис. 3 – Упрощённая схема установки для испытания пальцев
1 – палец режущего аппарата жатки (объект испытаний);
2 – стойка; 3 – винт нагружающего устройства;
4 – весы крановые CASTON II 3THD

Исследуемые пальцы производства ОАО «ГЗЛиН» (по технологии изготовления – штампосварные): ПЗЛ 1507030А, ПЗЛ 1507110 состоят из приваренных друг к другу верхней и нижней противорежущих пластин и средней укороченной части, которые отличаются технологией термической обработки.

Представленные образцы имели либо все упрочненные элементы, либо неупрочненную нижнюю и упрочненную верхнюю пластины.

Образец пальца производства «MDW» состоит из трех штампованых упрочненных элементов: верхней и нижней с отверстиями для крепления, и средней укороченной части.

Размеры пальцев ПЗЛ 1507030А, ПЗЛ 1507110 имеют одинаковую толщину всех частей и составляют 5 мм. Палец ПЗЛ 1507030А общая длина – 157 мм, ПЗЛ 1507110 – 132 мм. Палец 12 MDW 003781532-М.1.0340-410 100001 имеет длину пальца – 132 мм. Габаритные размеры пальцев представлены на рис.4:



а б в

Рис.4 – Габаритные размеры сдвоенных пальцы режущего аппарата жаток зерноуборочного комбайна: а - ПЗЛ 1507030А; б - ПЗЛ 1507110; в - 12 MDW 003781532-М.1.0340-410 100001

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования проводились в местах разрушения элементов пальцев. Установлена локализация мест зарождения и развития трещин с последующим разрушением в местах крепления. Фото пальцев после испытаний представлены на рис. 5.

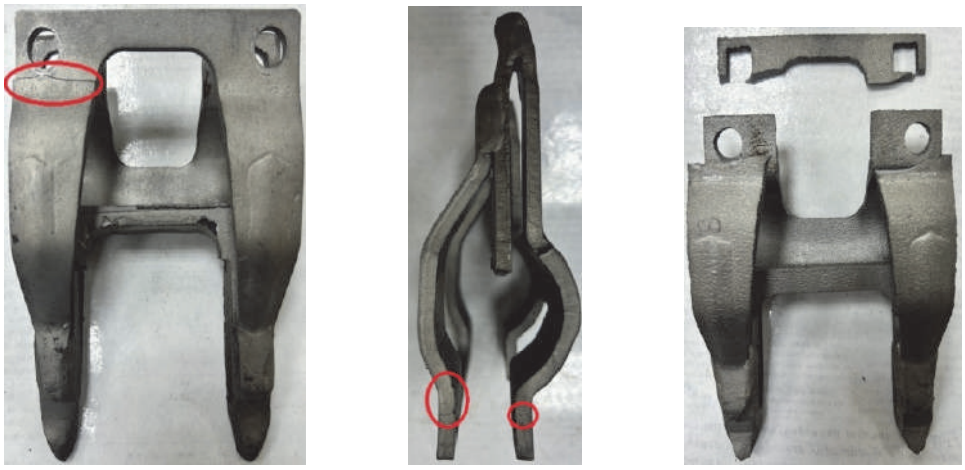


Рис. 5 – Пальцы после испытаний (места образования трещин выделены)

При приложении нагрузки 11000 Н деформация пальца MDW составила 19,3 мм. После снятия нагружения остаточная деформация составила 8,0мм.

Критерием работоспособности пальцев принято считать величину прилагаемой нагрузки 4000 Н, при которой разрушение пальца не происходит, а остаточная деформация минимальна. Данный критерий был установлен более 15 лет назад на основе опытных работ и подконтрольной эксплуатации жаток. Однако, необходимо отметить, что в связи с ростом урожайности и повышением производительности уборки зерновых культур указанный критерий является минимальным. Многие производители зерноуборочных комбайнов ведут работы по оптимальному подбору материалов для изготовления пальцев и усовершенствованию технологических процессов их изготовления.

Считаем, что в основе оценки надежности и долговечности пальцев должны быть минимальными показатели остаточной деформации при прилагаемой нагрузке существенно выше 4000 Н.

Методами химического анализа определение содержания углерода в металле и физического исследования спектральных линий химических элементов установлено, что палец 12 MDW 003781532-М.1.0340-410 100001 изготовлен из стали, наиболее близкий аналог которой ст.20, что не исключает наличия легирующих элементов, существенно влияющих на микроструктуру и, соответственно, на механические свойства. Однако, их наличие и концентрацию невозможно определить в рамках производственных условий ОАО «Гомсельмаш». Пальцы ПЗЛ 1507110 изготовлены из ст. 20, ПЗЛ 1507030А из стали 25 ХГСА и прошли ХТО – цементацию, 12 MDW 003781532-М.1.0340-410 100001 прошли ХТО – нитроцементацию.

Измерения твердости и микротвердости представлены в табл.1. Необходимо отметить, что в табл.1 отражены лучшие результаты испытаний пальцев ПЗЛ 1507030А и ПЗЛ 1507110. Результаты по одинаковым образцам этих пальцев отличаются нестабильностью, чего нельзя сказать о 12 MDW 003781532-М.1.0340-410 100001.

Табл. 1

Характеристики пальцев

Наименование образца	ПЗЛ 1507030А			ПЗЛ 1507110			12 MDW 003781532-М.1.0340-410 100001		
Наименование элемента	нижняя часть	средняя часть	верхняя часть	нижняя часть	средняя часть	верхняя часть	нижняя часть	средняя часть	верхняя часть
Марка материала	сталь 25ХГСА	сталь 25ХГСА	сталь 25ХГСА	сталь 20	сталь 20	сталь 20	сталь 20	сталь 20	сталь 20
Твердость поверхности, HRC	47..49	45..46	46..48	58..58,5	53…54	61,5..62,5	53..55	53..55	50..53
Твердость на глубине 0.1 мм от поверхности, HRC	47,5..49	42..47,5	45,5..47,5	56..59	54..55	62..>62	53..55	53..55	50..53
Глубина упрочненного слоя, мм	0,6	0,6	0,62	0,76 -1,0	0,75	0,8-1,0	0,40 - 0,45	0,20 - 0,35	0,40 - 0,45
Твердость сердцевины, HRC	40..41/ 386..402	40..41/ 394..402	42..44/ 411..448	32..34/ 304..318	27..29/ 260..280	49..50/ 526..551	211..236HB/ 210..236	202..211HB/ 200..210	211..226HB/ 210..226

Усилие нагрузки, Н	деформация		деформация		деформация	
	полная	остаточная	полная	остаточная	полная	остаточная
4000	7,54	2,10	5,30	1,20	5,10	0,60
8000	21,08	8,06	11,00	2,60	11,1	2,40
9500	-	-	13,35	3,35	13,9	3,40
11000	-	-	-	-	19,6	7,20
Примечание	разрушение образцов		разрушение образцов		срыв оснастки	

Заключение

Проведенные исследования показали, что показатели твердости поверхности и сердцевины образцов пальцев наряду с распределением микротвердости по глубине упрочненного слоя, определением глубины упрочнения представляют объективную информацию, позволяющую вносить коррективы в технологический процесс изготовления, а также оптимизировать вид и продолжительность ХТО.

Для исключения появления остаточной деформации в проблемных местах отечественных пальцев необходимо разработать технологический процесс с оптимальным вариантом термической обработки, обеспечивающий как качество микроструктуры, так и продолжительность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жосан А.А., Головин С.И., Михайлов М.Р. Анализ эксплуатации зарубежной техники в России // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2009. №4. С. 52-53.

2. Жосан А.А., Михайлов М.Р., Головин С.И. Эффективность эксплуатации зарубежной сельскохозяйственной техники в России // Сб. матер. междунар. науч.-тракт. конфер. молод. учен. Обеспечение устойчивого развития АПК в условиях глобального кризиса. 2009. Орел. 2009. С. 109-112.

3. Рубин А.Г., Оранский Н.Н. О надежности режущего аппарата зерноуборочного комбайна // Труды ГОСНИТИ. 1981. Т. 63. С.105-111.

4. Коломейченко А.В., Кузнецов И.С. Результаты эксплуатационных испытаний деталей режущего аппарата зерноуборочных машин, упрочненных электроискровой обработкой электродом из аморфного сплава 84 КХСР // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 111, Ч. 1. С. 91-94.

5. Коломейченко А.В., Кузнецов И.С. Упрочнение электроискровой обработкой режущих кромок зерноуборочных машин // Вестник ОрелГАУ: теоретич. и науч.-практ. журн. 2013. №1. С. 187-190.

УДК 631.354.2

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РАБОТЫ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА GS600 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Д.Н. Серенок, А.В. Белый
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В статье рассматривается усовершенствование конструкции наклонной камеры, молотильно-сепарирующего устройства, стрясной доски и домолачивающего устройства зерноуборочного комбайна GS600. Предлагаемые изменения позволят повысить производительность работы комбайна и улучшить условия уборки.

Введение

Зерноуборочные комбайны – это специализированные сельскохозяйственные машины, предназначенные для уборки зерновых культур. Они объединяют в себе несколько функций, включая сбор и обмолот зерновой массы.

За последние двадцать лет урожайность озимой пшеницы выросла в три раза. Современная селекция и технологии выращивания позволяют получать действительно выдающиеся результаты. В настоящее время, в связи с переходом на новые сельскохозяйственные технологии с соответствующим техническим обеспечением и значительным ростом урожайности, возникает потребность в более надёжных, и более высокопроизводительных зерноуборочных комбайнах, чем выпускаемые модели. [1]

Конкурентоспособность комбайна зависит от технического уровня, надёжности его узлов и систем, а также стабильности выполнения технологического процесса с заданным уровнем потерь и экономичным расходом энергии. Любые недочёты конструкции комбайна и ошибки в настройке на этапе уборки могут привести к существенным потерям в качестве и количестве собранного зерна.

В условиях энергетического кризиса и роста цен на нефтепродукты идти по пути увеличения габаритов и энергонагруженности комбайнов нерационально. Поэтому в последние годы для повышения производительности современных комбайнов ведётся поиск более эффективных технических решений. Среди основных тенденций в развитии зерноуборочных комбайнов остаётся рост производительности за счёт увеличения пропускной способности уже существующих моделей при снижении всех перечисленных затрат. Это достигается путём повышения

пропускной способности и эффективности работы отдельных узлов комбайна: ширины молотильно-сепарирующего устройства, диаметров барабанов, угла обхвата подбарабанья, площади соломотряса, очистки и т.д. [2]

Для увеличения производительности зерноуборочного комбайна и минимизации потерь зерна, перед разработчиками и научными учреждениями стоит задача внедрения инновационных конструкторских и технических решений.

Создание новой модели комбайна с увеличенной пропускной способностью (12 – 15 кг/с) требует значительных усилий и средств: на разработку конструкторской документации, изготовление опытного образца, испытание и постановку его на производство, подготовка производства и т.д. В связи с этим одним из перспективных направлений повышения пропускной способности и эффективности работы зерноуборочных комбайнов является подбор рациональных параметров наклонной камеры, молотильно-сепарирующего устройства и очистки с минимальными переделками конструкции. Поэтому направление совершенствования наклонной камеры, молотильно-сепарирующего устройства, стрясной доски и домолачивающего устройства зерноуборочного комбайна GS600 позволит достичь значительного прогресса в улучшении их технических показателей.

Комбайн зерноуборочный самоходный GS600 – высокопроизводительный комбайн с двухбарабанным молотильно-сепарирующим устройством шириной 1500 мм, в котором применено ускорение потока хлебной массы перед обмолотом. [3] При этом отличительной особенностью молотильно-сепарирующего устройства комбайна являются большие диаметры ускоряющего и молотильного барабанов (600 мм и 800 мм), что больше чем в любом другом молотильно-сепарирующем устройстве аналогичного типа. В сочетании с увеличенной площадью двойного подбарабанья это позволило сделать путь обмолота более протяжённым, а сам обмолот более бережным. Результат – высокий уровень вымолота и сепарации, в том числе на высокостебельных культурах. [4]

Комбайн GS600 показал устойчивую работу на уборке зерновых культур и кукурузы на зерно, обеспечивая высокую производительность при допустимых потерях. Комбайн ориентирован на передовые хозяйства, выращивающие среднеурожайные хлеба. В связи с этим комбайн очень востребован у сельхозорганизаций как нашей страны, так и за рубежом, и стал самым продаваемым комбайном отечественного производства. Поэтому модернизация данного комбайна является наиболее актуальной и перспективной задачей, требующей своего решения.

Реализация задачи оптимизации конструктивных и технологических параметров наклонной камеры, молотильно-сепарирующего устройства,

стрясной доски и домолачивающего устройства зерноуборочного комбайна требует проведения объёмных экспериментальных исследований в процессе уборки всевозможных культур с различной урожайностью, влажностью. Также необходим анализ этих результатов, принятие решений о внесении конструктивных изменений, проверка данных изменений в полевых условиях и т.д.

Испытания и экспериментальная доводка перечисленных узлов и агрегатов на реальном комбайне является весьма трудоёмким процессом. Поэтому научный подход, основанный на моделировании, представляется перспективным, особенно для массового производства, к которому относится и зерноуборочный комбайн. Это позволяет существенно сократить расходы и расширить возможности, повышая точность оценки рабочих свойств изделия, узла и детали. [5]

Оптимизация технологического процесса работы наклонной камеры, молотильно-сепарирующего, стрясной доски и домолачивающего устройства зерноуборочного комбайна GS600 направлена на повышения пропускной способности и эффективности работы зерноуборочного комбайна посредством разработки рациональных параметров этих рабочих органов и устройств, используя 3D-моделирование.

Объект исследования: зерноуборочный комбайн GS600.

Предмет исследования: наклонная камера, молотильно-сепарирующее устройство, стрясная доска и домолачивающее устройство самоходного зерноуборочного комбайна GS600.

Цель исследования: обосновать комплекс мероприятий по оптимизации технологического процесса работы наклонной камеры, молотильно-сепарирующего устройства, стрясной доски и домолачивающего устройства самоходного зерноуборочного комбайна GS600 для увеличения производительности и эффективности их работы с внесением изменений в конструкции наклонной камеры, молотильно-сепарирующего устройства, подбарабаний, механизма подъёма подбарабаний, стрясной доски и домолачивающего устройства.

Постановка задачи

Производительность зерноуборочного комбайна GS600 в первую очередь определяет совершенство наклонной камеры, молотильно-сепарирующего устройства и системы очистки зерна. Эти узлы являются «узким» местом комбайна, ограничивающим его пропускную способность.

При работе в тяжёлых условиях уборки (переувлажнённость и засорённость) происходит забивание наклонной камеры и молотильно-сепарирующего устройства (особенно в переходной зоне между ними), что приводит к длительным простоям и снижению темпов уборки. Для предотвращения забивания требуется снижение скорости комбайна, что также снижает скорость уборки и увеличивает расходы. При уборке

остистых культур происходит наматывание и сгруживание массы. Технологический процесс уборки таких культур значительно затрудняется.

Что касается очистки комбайна (решётные станы, соломотряс), то она имеет большой запас по производительности и соответственно возможность дозагрузки без изменения параметров её рабочих узлов. Рабочими узлами ограничивающим пропускную способность очистки являются стрясная доска и домолачивающее устройство. На сегодняшний день они не обеспечивают необходимую пропускную способность, особенно при работе на влажном и засорённом фоне, когда на домолот идёт значительно больший объём невымолоченной массы, а стрясная доска не обеспечивает качественный обмолот поступающей массы из-за недостаточной её длинны и соответственно площади. В таких условиях происходит забивание домолачивающего устройства, это приводит к простоям и снижению темпов уборки, что в современных условиях является неприемлемым.

Для решения задачи по оптимизации конструктивных и технологических параметров наклонной камеры, молотильно-сепарирующего устройства, стрясной доски и домолачивающего устройства зерноуборочного комбайна была разработана 3D-модель в Creo Parametric 6.0, а также проведён анализ полученных результатов, принято решение о внесении конструктивных изменений и разработан комплекс мероприятий.

Анализ конструкции

В очистку комбайна входят: молотильно-сепарирующее устройство, шасси, колосовой элеватор, домолачивающее устройство, стрясная доска, верхний решётный стан, соломотряс и привода. [3]

Принцип работы очистки заключается в следующем: зерновой ворох, попавший после обмолота на стрясную доску, совершающую колебательные движения, предварительно перераспределяется – зерно и тяжёлые соломистые частицы опускаются вниз и движутся в нижней зоне слоя, а лёгкие и крупные соломенные частицы перемещаются в его верхней зоне. На пальцевой решётке стрясной доски идёт дальнейшая предварительная сепарация вороха: зерно, движущееся в нижней зоне слоя, поступает на дополнительное и верхнее решето верхнего решётного стана, а крупные соломенные частицы проходят по пальцевой решётке над решётами. Полова и лёгкие примеси под действием воздушной струи вентилятора выдуваются из очистки и оседают на поле. Крупные соломенные частицы, идущие сходом с верхнего решета и его удлинителя, также попадают на поле. На удлинителе выделяются недомолоченные колоски, которые поступают в колосовой шнек. Зерно, очищенное на верхнем решете, поступает на нижнее решето нижнего решётного стана, где очищается окончательно. Очищенное зерно по зерновому поддону подаётся в зерновой шнек и далее зерновым элеватором и загрузным шнеком в бункер

зерна, а сходы с нижнего решета поступают по колосовому поддону в колосовой шнек, после чего транспортируются колосовым элеватором на повторный обмолот в домолачивающее устройство, затем распределительным шнеком распределяются повторно по ширине стрясной доски.

Наклонная камера предназначена для транспортировки растительной массы из выгрузного окна адаптера к молотильно-сепарирующему устройству, обеспечения рабочих органов адаптера крутящим моментом и обеспечения копирования рельефа поля адаптером. Наклонная камера состоит из рамы, рамки переходной с механизмом поперечного копирования, транспортёра, механизма продольного копирования, привода с гидрореверсом, гидравлической системы наклонной камеры и приводов.

Молотильно-сепарирующее устройство состоит из рамы, ускоряющего барабана диаметром 600 мм, молотильного барабана диаметром 800 мм, отбойного битера диаметром 400 мм, переднего и заднего подбарабаний, механизма подъёма подбарабаний, камнеуловителя и механизма привода рабочих органов. В молотильно-сепарирующем устройстве вымолот зерна происходит в результате ударов бичей по колосьям и протаскивания их между рабочими поверхностями (в молотильном зазоре). Одновременно с вымолотом через отверстия подбарабанья просеивается часть вымолоченного зерна и мелкие примеси.

В серийной конструкции наклонной камеры и молотильно-сепарирующего устройства (рис. 1 а) были выявлены следующие недостатки:

1. При большой урожайности и тяжёлых условиях уборки наклонная камера не справляется с потоком зерносоломистого вороха, что приводит к его сгруживанию и забиванию в переходной зоне между молотильно-сепарирующим устройством и наклонной камерой. Как следствие происходит поломка транспортёров наклонной камеры и длительный ремонт.

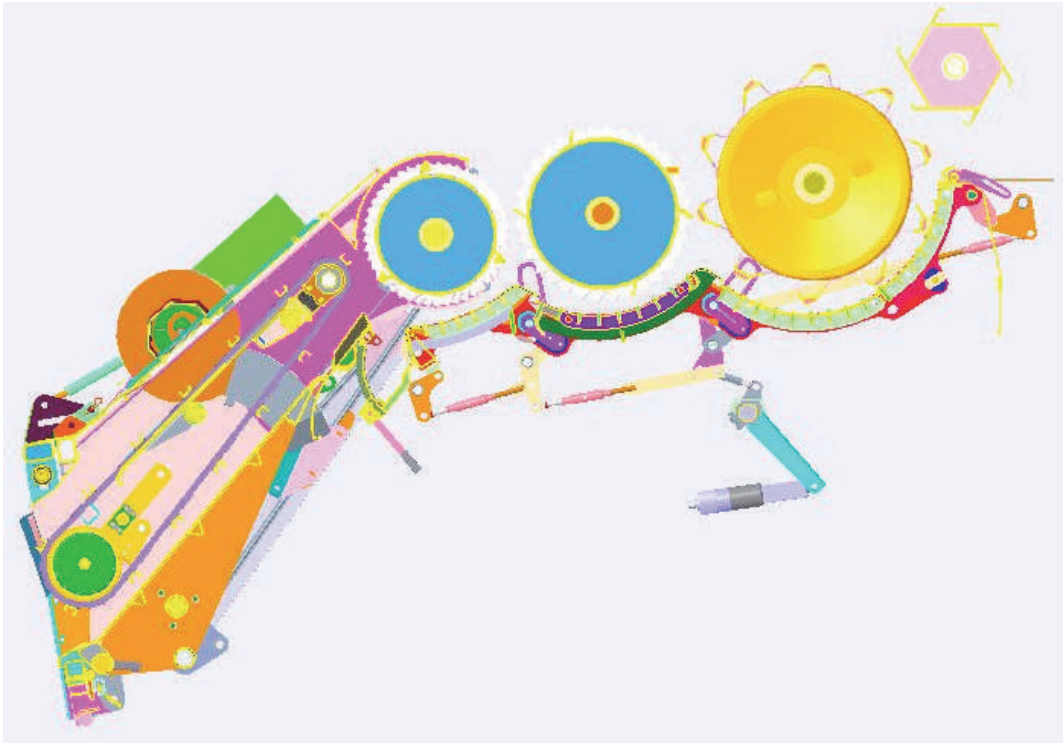
2. При уборке сухой массы происходит запыление жатки, наклонной камеры и кабины комбайна. В условиях плохой видимости водитель комбайна теряет возможность контроля за процессом уборки, что может привести к снижению качества уборки и аварийной ситуации.

3. Применённый щиток для отвода пыли установленный стационарно в передней части молотильно-сепарирующего устройства обеспечивает статическое удаление пыли. Такой способ удаления пыли является малоэффективным, и не обеспечивает необходимой защиты.

4. Небольшая площадь подбарабаний не обеспечивает необходимое качество и эффективность обмолота при высокой урожайности. При повышенной урожайности приходится снижать скорость комбайна, что

приводит к увеличению сроков уборки. В условиях уборочного сезона временной фактор является очень значительным.

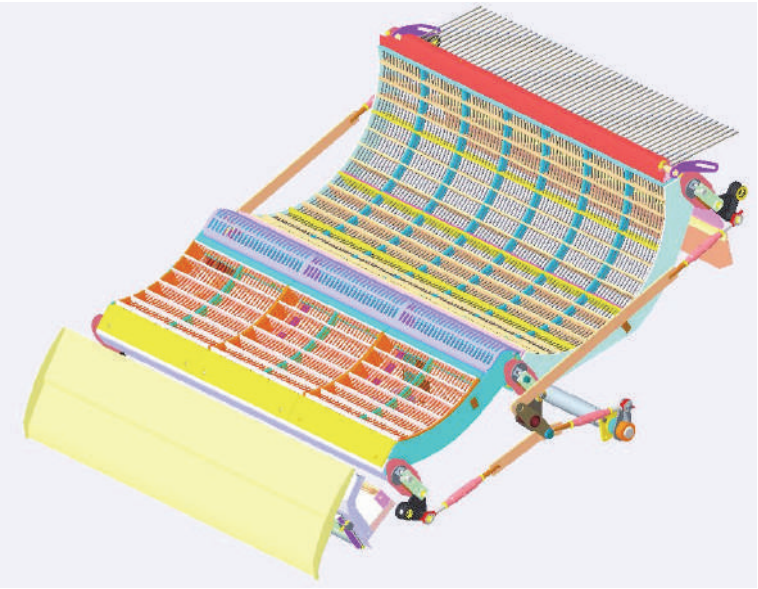
а



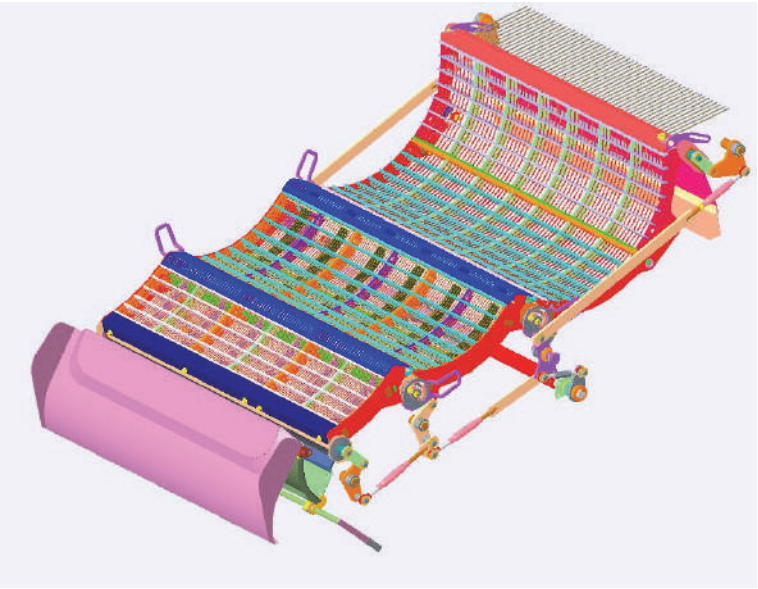
б

Рис. 1 – Наклонная камера и молотильно-сепарирующее устройство:
а) серийная конструкция; б) оптимизированная конструкция

5. В серийной конструкции механизма подъёма подбарабаний существующей регулировки бывает недостаточно для возможности настройки необходимых зазоров между барабанами и подбарабаньями из-за невысокой точности изготовления сварных рамных конструкций больших размеров (рис. 2 а). Неравномерность зазора негативно сказывается на качестве протекания технологического процесса обмолота и ухудшает свойства конечного продукта.



а

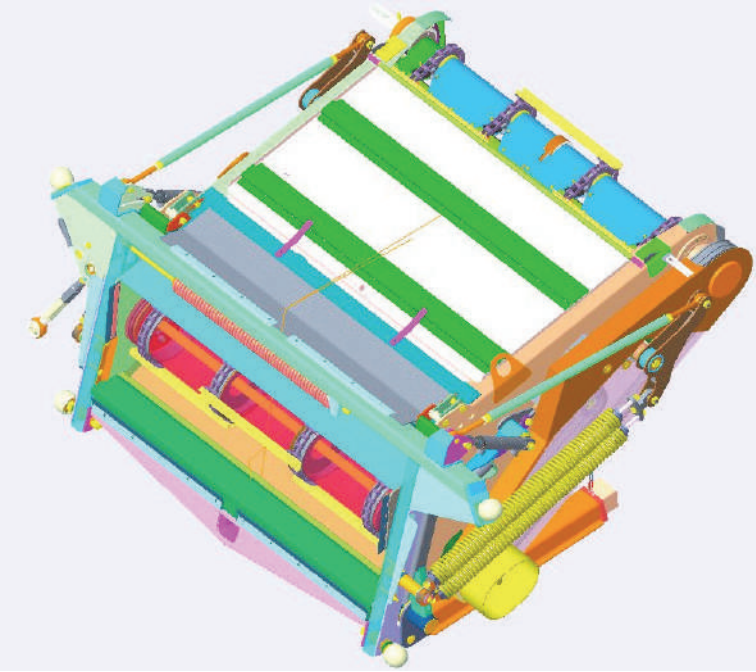


б

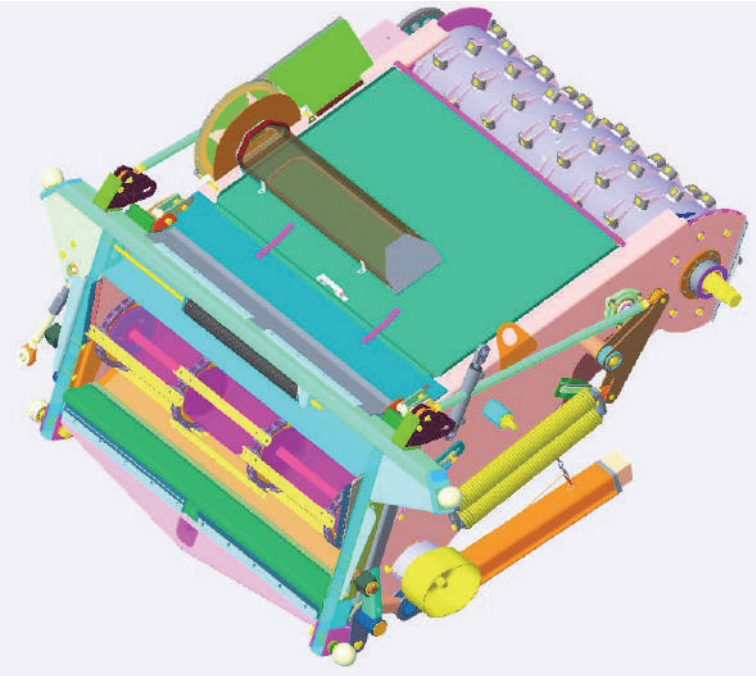
Рис. 2 – Подбарабанья, механизм подъёма подбарабаний и камнеуловитель: а – серийная конструкция; б – оптимизированная конструкция

6. Для очистки полости камнеуловителя необходимо откручивать барашки с двух сторон. При откидывании крышки полость освобождается не полностью. Необходимо чистить вручную.

7. В наклонной камере серийной конструкции (рис. 3 а) планчатые транспортёры имеют незначительную надёжность. Поэтому довольно часто выходят из строя.



а

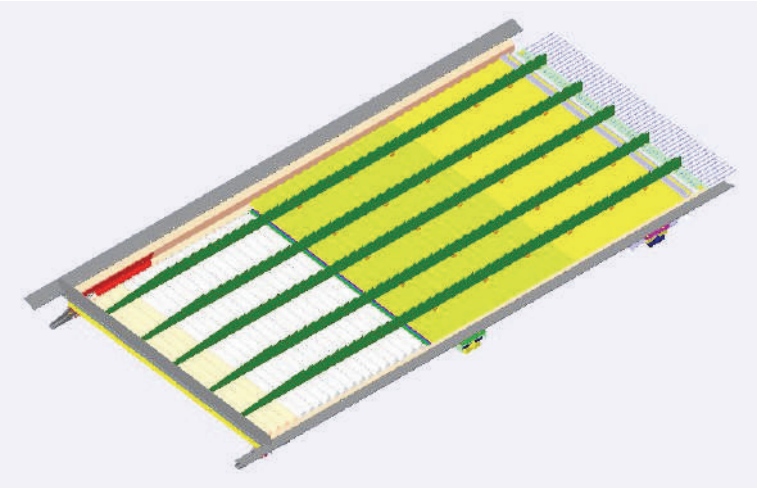


б

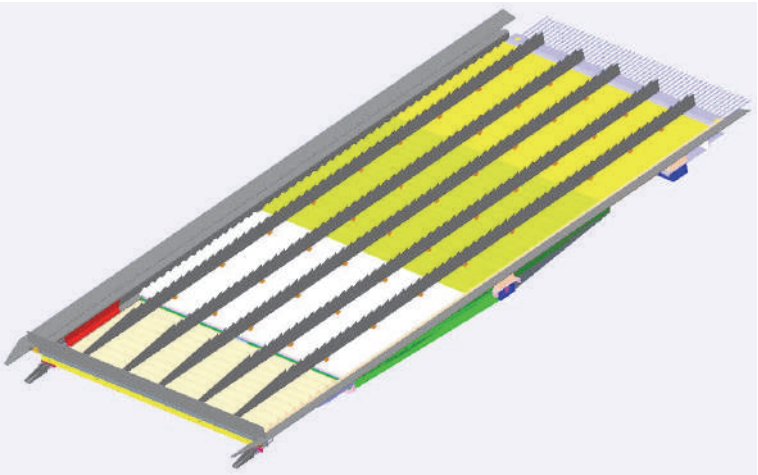
Рис. 3 – Наклонная камера:
а – серийная конструкция; б – оптимизированная конструкция

Стрясная доска предназначена для равномерной подачи обмолоченной зерновой массы на решёта очистки. Она состоит из нескольких длинных и широких листов металла, согнутых по ширине в форме мелких рёбер, и размещённых на раме. Также вдоль листов размещены зубчатые пластины, которые помогают равномерному распределению зерновой массы.

В серийной конструкции стрясной доски (рис. 4 а) были выявлены следующие недостатки:



а



б

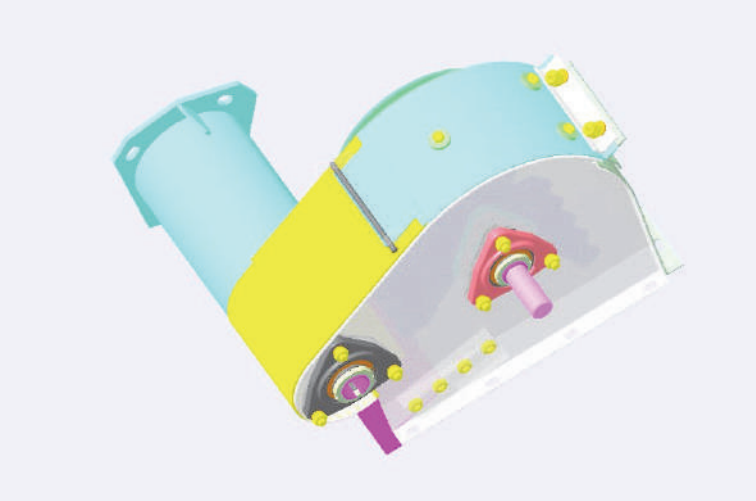
Рис. 4 – Стрясная доска:
а – серийная конструкция; б – оптимизированная конструкция

1. Стрясная доска имеет недостаточную площадь и не обеспечивает достаточное качественное разделение на фракции зерносоломистого вороха. В следствии повышается нагрузка на решётные станы очистки и в последствии на домолачивающее устройство. Это способствует некачественному обмолоту и наличию примесей в обмолоченном зерне.

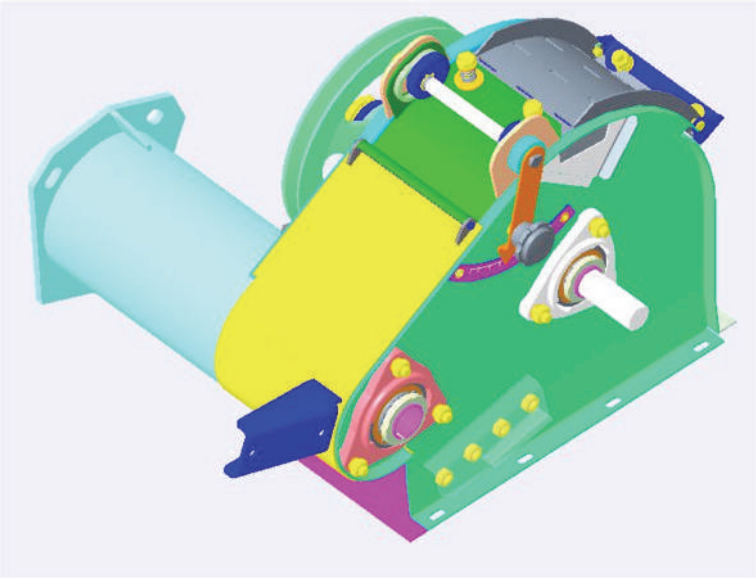
2. При уборке в тяжёлых условиях (таких как уборка влажной сильно засорённой массы) происходит налипание зелёной массы на гребни стрясной доски. Это приводит к повышенным нагрузкам на саму доску и элементы её привода и как следствии её поломке. Чтобы избежать поломок требуется дополнительная чистка доски.

Домолачивающее устройство состоит из корпуса, трёхбичевого барабана, тёрки с механизмом регулировки зазора, распределительного шнека. Предназначено для вымолота колосьев, выделенных удлинителем верхнего решета и сошедших с нижнего решета.

В серийной конструкции домолачивающего устройства (рис. 5 а) были выявлены следующие недостатки:



а



б

Рис. 5 – Домолачивающее устройство:
а – серийная конструкция; б – оптимизированная конструкция

1. На комбайне применено домолачивающее устройство с комбайна меньшего класса по пропускной способности. В результате чего оно не обеспечивает необходимую пропускную способность, особенно при работе на влажном и засорённом фоне, когда на домолот идёт значительно больший объём массы. В таких условиях происходит забивание устройства, это приводит к длительным простоям и снижению темпов уборки, что в современных условиях является неприемлемым.

2. На домолачивающем устройстве отсутствуют регулировки для обеспечения настройки под разные условия работы. В нём установлено устаревшее устройство молоткового типа, которое приводит к большому проценту повреждения семян.

3. Отсутствует лючок для контроля над состоянием внутренней полости домолачивающего устройства для предотвращения его забивания и быстрой своевременной очистки при необходимости. Для чистки в случае забивания требуется откручивать крепёж, что является трудоёмким процессом, замедляющим скорость уборки.

Комплекс мероприятий

Для устранения перечисленных недостатков предлагается комплекс мероприятий по изменению существующей конструкции наклонной камеры, молотильно-сепарирующего устройства, домолачивающего устройства и стрясной доски:

1. Применить в конструкции серийной наклонной камеры вентилятор отсоса пыли. Вентилятор осуществляет динамическое удаление пыли из рабочей зоны комбайна и отводит её за приделы этой зоны, обеспечивая при этом обзорность и необходимый контроль за рабочим процессом (рис. 3 б).

2. Укоротить цепочно-планчатые транспортёры и установить на выходе наклонной камеры дополнительный ускоряющий барабан (рис. 1 б). При уменьшении длины транспортёров на них уменьшается удельная нагрузка. В следствии повышается их надёжность и снижается отказность. Ускоряющий барабан, установленный в наклонной камере, увеличивает скорость движения хлебной массы, поступающей с транспортёра наклонной камеры, приближая её к скорости вращения ускоряющего барабана, повышает при этом производительность и значительно уменьшает вероятность забивания в переходной зоне между наклонной камерой и молотильно-сепарирующим устройством.

Кроме того, зубья ускоряющего барабана равномерно распределяют массу. Таким образом, снижается нагрузка на молотильный барабан и подбарабанья (среднее и заднее) увеличивая производительность следующего узла – молотильно-сепарирующего устройства. Это позволит вымолачивать больше зерна уже на первом этапе обмолота-сепарации, минимизирует его повреждения, а также собирать более влажные зерновые,

избегая увеличения потерь. При этом значительно возрастёт производительность в единицу времени, что позволяет увеличить пропускную способность комбайна. Ускорение потока хлебной массы уменьшает риск забивания молотильного барабана при высокой урожайности или неблагоприятных условиях уборки.

Дополнительный ускоряющий барабан оснащён своей секцией подбарабанья (рис. 2 б), благодаря чему обмолот и сепарация начинаются уже на стадии ускорения потока в наклонной камере. В результате применения дополнительного барабана значительно увеличивается площадь подбарабаний. Данное изменение улучшит качество выполнения технологического процесса. Степень сепарации зерна при обмолоте повышается за счёт двух дополнительных факторов. Во-первых, возрастают центробежные силы, которые выбрасывают свободные зерна сквозь ячейки подбарабанья. Во-вторых, рост ускорения обмолачиваемого материала приводит к растягиванию растительной массы и облегчает прохождение зерна в нижние части слоя. Все это повышает производительность обмолота и обеспечивает более полное выделение зерна, обеспечивая более эффективный процесс обмолота в зависимости от убираемой культуры.

3. Применить дополнительный механизм регулировки подбарабаний под новую секцию (рис. 2 б) и усовершенствованную конструкцию механизма с дополнительными возможностями для регулировки и настройки. Оптимизированная конструкция механизма регулировки подбарабаний имеет дополнительную регулировку эксцентриковым механизмом. Это позволяет добиться равномерного зазора между подбарабаньями, ускоряющими и молотильным барабанами. При этом положение всех трёх подбарабаний изменяется параллельно и синхронно. Это гарантирует равномерное и щадящее прохождение потока хлебной массы.

4. Применён камнеуловитель новой конструкции (рис. 2 б). Он имеет возможность быстрого откидывания при помощи одной ручки. Не нужно откручивать барашки с двух сторон комбайна и лезть под наклонную камеру для очистки полости камнеуловителя от камней. Данное изменение экономит время и улучшает безопасность работы комбайнёра. Также новый камнеуловитель имеет улучшенное уплотнение с наклонной камерой и подбарабаньем, что снижает потери зерна.

5. Применена новая конструкция подбарабанья под молотильным барабаном: применено шарнирно-регулируемое соединение в центре подбарабанья (рис. 2 б). Это позволило обеспечить более равномерный зазор между молотильным барабаном и подбарабаньем по сравнению с серийной конструкцией. Что значительно повышает качество обмолота.

6. Применена удлинённая стрясная доска новой конструкции (рис. 4 б). Увеличенная площадь стрясной доски обеспечивает улучшенное разделение на фракции зерносоломистого вороха. В следствии снижается

нагрузка на решётные станы очистки: на них поступает более чистый зерновой ворох. Также модернизированная доска имеет новую изменённую (усиленную) систему подвески и усиленную раму с поперечными усилителями для исключения поломок даже в экстремальных условиях эксплуатации. Для исключения процессов налипания растительной массы и необходимости чистки предлагается нанесение на рабочую поверхность стрясной доски полимерного покрытия методом напыления.

7. В домолачивающем устройстве новой конструкции (рис. 5 б) пропускная способность увеличена в полтора раза за счёт увеличения его габаритных размеров. В результате чего оно обеспечивает необходимую пропускную способность, особенно при работе на влажном и засорённом фоне, когда на домолот идёт значительно больший объём массы. При этом обеспечивается значительный запас по производительности очистки и исключается возможность забивания даже в самых тяжёлых условиях уборки. Исключены процессы забивания и необходимости чистки, что в конечном счёте положительно скажется на темпе уборки.

В модернизированном устройстве применены молотки нового бичевого типа, а также съёмный регулируемый щиток с планками. Данное устройство по конструктивному типу аналогично молотильному барабану с подбарабаньем. Оно бережно обмолачивает массу с минимальными повреждениями. Также предусмотрена эксцентриковая регулировка со шкалой для быстрой установки зазора между бичами и планками в зависимости от конкретных условий уборки (влажность, засорённость, урожайность и т.д.), что также значительно снижает вероятность забивания и повышает качество уборки. Предусмотрен подпружиненный, быстросъёмный лючок для контроля за состоянием внутренней полости, предотвращения его забивания и быстрой очистки при необходимости, что также повышает скорость уборки.

Результаты

В предложенной оптимизированной трёхбарабанной системе обмолота 500-миллиметровый ускоряющий барабан запускает процесс обмолота, равномерно ускоряет поток хлебной массы, создавая большие центробежные силы, обеспечивающие максимальную эффективность сепарации, и подаёт массу в 600-миллиметровый ускоряющий барабан. Дополнительный ускоряющий барабан, установленный в наклонной камере, оснащён своей секцией подбарабанья, благодаря чему сепарация и обмолот начинается уже на стадии ускорения потока. Далее масса подаётся в 800-милимитровый молотильный барабан. Происходит равномерное ускорение потока массы на всех подбарабаньях.

В подбарабаньях новой конструкции площадь сепарации зернового вороха увеличена на 23 %. Увеличена площадь стрясной доски на 15 %. Повышена производительность домолачивающего устройства на 31 %.

С предложенными изменениями конструкции производительность комбайна по зерну возрастает до 21 т/ч (у серийного комбайна 18 т/ч). Пропускная способность комбайна по зерностебельной массе увеличивается до 14 кг/с (у серийного комбайна 12 кг/с). С учётом данных изменений комбайн GS600 получает возможность более широкого применения: как на среднеурожайных, так и на высокоурожайных культурах без снижения скорости и качества уборки.

При этом предложенные изменения узлов комбайна не требуют значительных затрат на подготовку производства и конструкторскую разработку новой модели комбайна. Конструкции новых узлов в значительной степени унифицированы с серийными и не требует переделки конструкции остальных узлов.

Заключение

Таким образом, предлагаемые изменения конструкции наклонной камеры, стрясной доски, молотильно-сепарирующего и домолачивающих устройств, позволят значительно повысить производительность и увеличить пропускную способность комбайна. Также они обеспечат значительное улучшение показателей технологического процесса: отсутствие забивания и наматывания в зоне приёмного окна молотильно-сепарирующего устройства при уборке в тяжёлых условиях, более плавную подачу зерносоломистого вороха в ускоряющий барабан, меньшее повреждение вороха, более качественный вымолот, что, в свою очередь, снижает нагрузку на следующие рабочие узлы комбайна. Благодаря предложенным изменениям зерноуборочный самоходный комбайн GS600 будет способен обеспечить большую пропускную способность, улучшить условия работы комбайнёра, а также увеличить скорость уборки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зерноуборочные комбайны»: уч. пособие / А.В. Клочков [и др.]. – Мн.: Дизайн ПРО, 2004. – 240 с.

2. Зерноуборочные комбайны двухфазного обмолота: уч. пособие / Л.Н. Логинов [и др.]. – М.: Информационно-аналитический консалтинговый центр, 1999. – 336 с.

3. Комбайн зерноуборочный самоходный GS12A1: Инструкция по эксплуатации. – Гомель: НТЦК ОАО «Гомсельмаш», 2022. – 245 с.

4. Зерноуборочный комбайн GS12A1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gomselmash.by. – Дата доступа: 02.04.2025.

5. Серенок Д. Н., Белый А. В. Оптимизация технологического процесса работы молотильно-сепарирующего устройства зерноуборочного комбайна GS2124 / Д.Н. Серенок // 8-ая международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня завтра» – Гомель: НТЦК ОАО «Гомсельмаш», 2024. – С. 189–201.

СОДЕРЖАНИЕ

Секционные статьи

Секция № 1 «Тенденции и направления развития уборочной техники и научно-техническое сотрудничество»

ОТДЕЛЕНИЕ ЛЕГКИХ КОМПОНЕНТОВ ОЧЕСАННОГО ВОРОХА В КОРПУСЕ АДАПТЕРА ПОСРЕДСТВОМ ЖАЛЮЗИЙНОЙ РЕШЕТКИ

В.Н. Ожерельев, В.Ю. Савин, В.В. Никитин, И.П. Адылин…… 3

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

А.А. Жешко……. 8

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПАРКА ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ

В.И. Володкевич, А.А. Жешко, А.В. Шах, О.В. Жаврид…… 13

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СТРУКТУРЫ ПАРКА ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Н.Г. Бакач, В.И. Володкевич, А.В. Шах, О.В. Жаврид …… 21

АНАЛИЗ НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК В ПОЛУМЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ПЕРЕД ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКОЙ

М.Ю. Целуев, С.Н. Целуева, А.Г. Немцев, П.С. Дробышевский, Т.М. Чудновская…… 28

АНАЛИЗ НОМЕНКЛАТУРЫ ШТАМПОВАННЫХ ПОКОВОК ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

М.Ю. Целуев, С.Н. Целуева, А.Г. Немцев, П.С. Дробышевский, Т.М. Чудновская…… 34

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО УЧЕТА ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ДЕГРАДАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Е.В. Бессчетнов, С.В. Шилько…… 40

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ КОМБАЙНА

В.В. Напрасников, Жэнь И, Чжао Цяньчэн, Чжан Чжэньбан …… 45

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К МИГРАЦИИ ДАННЫХ ИЗ CREO PARAMETRIC В КОМПАС-3D

Н.А. Лазовой, И.А. Кольцова, А.А. Бобровничий…… 49

ПРОГРАММНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МИГРАЦИИ ДАННЫХ ИЗ CREO PARAMETRIC В КОМПАС-3D

Н.А. Лазовой, И.А. Кольцова…… 59

СИНЕРГИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ - КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД МИГРАЦИИ БИБЛИОТЕК СТАНДАРТНЫХ ИЗДЕЛИЙ PTC WINDCHILL В ЭКОСИСТЕМУ АСКОН

И.А. Кольцова, Ж.В. Кадолич…… 71

ЭКСПОРТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ОРГАНИЗАЦИИ КАК ОСНОВА СТРАТЕГИИ ЕЕ РАЗВИТИЯ

С.В. Михолап, Д.Е. Муляр…… 85

АКТИВАТОР ОБМОЛОТА НОВОГО ОБРАЗЦА

Ж.С. Садыков, Б.К. Кокебаев, А.А. Родин, Е.Д. Макашева, С.А. Болотников, А.И. Ондасын…… 90

МНОГОРАЗОВЫЕ 3D-ПЕЧАТНЫЕ КАПСУЛЫ КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСЕВА И ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ

Д.Г. Асонов, Е.В. Мищенко…… 96

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ПЕЧАТИ В ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

С.Н. Пивовар, С.В. Рогов…… 103

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬХОЗМАШИН НАПЛАВЛЕНИЕМ СВЕРХПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Д.Д. Белебнёва, С.В. Рогов…… 108

ПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В СЕЛЬХОЗМАШИНОСТРОЕНИИ

В.Ю. Ксензова, С.В. Рогов…… 112

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Е.С. Садовников, С.В. Рогов…… 116

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТНОГО КОНТУРА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЯ MMZ-2.5 DTI

А.В. Предко, Е.П. Тихонович …… 120

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИЛОВОЙ НАГРУЖЕННОСТИ МЕХАНИЗМА АГРЕГАТИРОВАНИЯ САМОХОДНОЙ УБОРОЧНОЙ КОСИЛКИ ДЛЯ РЕЖИМА КОПИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОЛЯ

А.В. Котов, Д.Г. Кроль…… 126

СПОСОБ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ПЛОСКИХ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С ПОМОЩЬЮ МАТРИЦ ОДНОРОДНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТ

А.В. Котов, Д.Г. Кроль…… 131

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

А.С. Петровский, И.Ю. Ухарцева…… 137

УСКОРЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗНОСОУСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ МНОГОСТУПЕНЧАТОМ НАГРУЖЕНИИ

С.А. Тюрин, М.О. Прядко…… 141

СОТРУДНИЧЕСТВО ГГТУ ИМ. П.О. СУХОГО И ХОЛДИНГА «ГОМСЕЛЬМАШ»

О.А. Лапко…… 146

СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА МАШИН И ТЕХНОЛОГИЙ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА: ЕЕ ОСОБЕННОСТИ И РОЛЬ НА ТЕКУЩЕМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ

В.К. Липская…… 151

КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СЕЛЬХОЗСТРОЕНИИ

Д.Ю. Зайцев, С.В. Рогов…… 156

СРАВНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ШАТУННОЙ ШЕЙКЕ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДИЗЕЛЯ 3LDG, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

А.А. Никишев, А.В. Предко, А.Н. Петрученко…… 160

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕН-НОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

К.С. Деблик, С.В. Рогов…… 165

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В СТАНКОСТРОЕНИИ

К.С. Деблик, С.В. Рогов…… 168

СРАВНИТЕЛЬНЫХ СПОСОБЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ЛИТЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ВТУЛОК

В.А. Калиниченко, С.Д. Шатилло…… 171

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАЛИВКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.А. Мацинов, В.А. Калиниченко…… 176

УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВА СТАЛИ 45 С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ

Д.М. Гуцев, В.Г Кудрицкий, И.В. Царенко…… 180

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

М.А. Янковец, В.В. Пинчук……..... 186

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МУФТА В СИСТЕМЕ ВЫГРУЗКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

А.В. Хихлуха, А.В. Белый…… 191

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ РАСКЛАДНОГО ВЫГРУЗНОГО ШНЕКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

А.И. Павловец, В.Л. Зимина…… 199

МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ВИБРОАКТИВНОСТИ ПРИВОДА КОЛЕБЛЮЩИХСЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Д.А. Дубовик, Н.П. Першукевич, А.С. Климук, А.Н. Вырский…… 205

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК В СОСТАВЕ ЗЕРНОУБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А.И. Козлов…… 212

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЮРАМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЛЬЦЕВ РЕЖУЩЕГО АППАРАТА ЖАТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Н.Н. Белая, Е.В. Пигенко…….. 232

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РАБОТЫ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА GS600 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Д.Н. Серенок, А.В. Белый…… 240

Научное издание

9-ая международная научно-практическая конференция
«Инновационные технологии в агропромышленном комплексе - сегодня и завтра»

В 2 частях
Часть 1

Сборник научных статей

Статьи изданы в авторской редакции

Оригинал-макет: Романьков С.А.
Обложка: Шландыкова Н.И.

Подписано в печать 29.12.2025. Формат издания 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Newton. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 25,8. Тираж 100 экз. Заказ № 2-26
Государственное научное учреждение
«Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси»
Регистрация № 1/244 от 25.03.14
246050 г. Гомель, Беларусь, Кирова, 32а

ОАО «Гомсельмаш»
Научно-технический
центр комбайностроения

Инновационные технологии в агропромышленном комплексе - сегодня и завтра

Сборник научных статей девятой международной научно-практической конференции

Часть 2

5 ноября 2025 года
г. Гомель, Республика Беларусь

Министерство промышленности Республики Беларусь
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»
Национальная академия наук Беларуси
Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь
Министерство образования Республики Беларусь

9-ая МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ - СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

5 ноября 2025 г.

Сборник научных статей 9-ой международной научно-практической конференции

В 2 частях
Часть 2

Гомель, Республика Беларусь

УДК 631.3:620.22:001895

Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: Сборник научных статей 9-ой международной научно-практической конференции: В 2 ч. Ч. 2 - Гомель: Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2025. - 218 с.

ISBN 978-985-6477-71-6

В сборнике опубликованы научные статьи участников 9-ой международной научно-практической конференции **«Инновационные технологии в агропромышленном комплексе - сегодня и завтра»,** посвященные состоянию, тенденциям и направлениям развития сельскохозяйственного машиностроения в области создания тракторов, универсальных энергетических средств, навесных и прицепных машин, машин для уборки зерновых культур, кормов и корнеклубнеплодов, новых материалов, методов проектирования с использованием компьютерных технологий, методов повышения конкурентоспособности сельскохозяйственных машин, включая критерии надежности и безопасности.

© ОАО «Гомсельмаш», 2025

СЕКЦИОННЫЕ СТАТЬИ

СЕКЦИЯ № 1

«ТЕНДЕНЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ УБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО»

УДК 631.354.3.06

ЗУБЧАТЫЕ ГРЕБЕНКИ В РЕШЕТАХ ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ С ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ

Д.С. Коновалов, А.В. Ермак
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация: в данной работе исследуются зубчатые гребёнки для зерноуборочных комбайнов, направленные на повышение производительности уборки зерновых культур.

Введение

Современное сельское хозяйство требует высокой эффективности уборочной техники, особенно в условиях увеличения объемов производства зерновых культур. Одним из ключевых элементов зерноуборочного комбайна, влияющим на производительность и качество сепарации, является решета очистки. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения потерь и чистота зерна.

Объект исследования

Зубчатые гребенки зерноуборочных комбайнов.

Цель исследования

Разработка и оптимизация конструкции зубчатой гребенки решет очистки зерноуборочных комбайнов, обеспечивающей повышение производительности уборки зерновых культур при снижении потерь и сохранении высокой надежности.

Методы исследования – теоретический, метод сравнительного анализа.

Результаты исследования

Зубчатая гребёнка (Рисунок 1) считается рядовым элементом комбайна. Она же и стала ключевым объектом нашего исследования.

Именно эта, на первый взгляд простая деталь, при грамотной модернизации показала впечатляющие результаты в повышении производительности уборочного процесса.

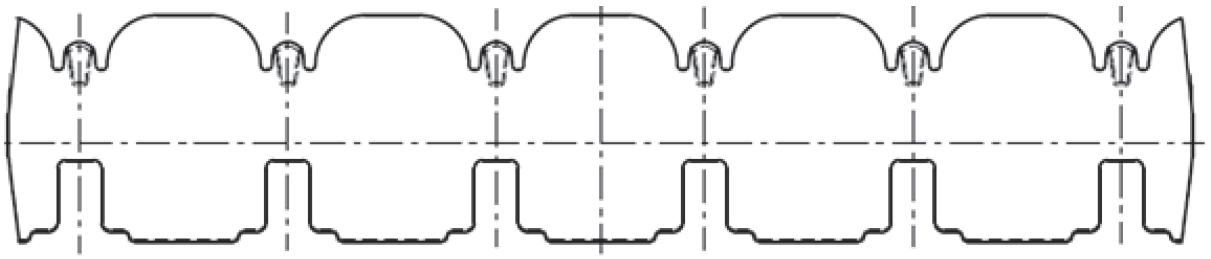


Рис. 1 – Зубчатая гребёнка

Считается, что зубчатая гребенка – простая составляющая комбайна, но именно ее модификация обеспечивает эффективность: рост производительности, меньше потерь и ощутимый рост экономии ресурса.

Изменилась форма зубьев (Рисунок 1). Новая гребенка лучше адаптируется к разной плотности массы.

Эти изменения важны, т.к. на выходе мы получаем существенно больше целого, неповрежденного зерна. Комбайну потребуется меньше остановок для устранения забивания. Если раньше часть зерна терялась, то теперь потери резко будут сокращены. Это всё - прямая экономия времени и финансовых средств.

Проведенные исследования показали значительное улучшение работы всего решетного стана (Рисунок 2) при использовании усовершенствованной зубчатой гребенки.

Оптимизированная геометрия зубьев обеспечивает равномерное распределение вороха по всему решетному стану. Предложенные зубчатые гребенки могут применяться на всех зерноуборочных комбайнов, но максимальная эффективность будет обеспечена на высокопроизводительных комбайнах GS2124, GH800, GH810, GR700.

Решетный стан содержит параллельно установленные в раме поворотные пластины, расположенные по сторонам от оси поворота и имеющие верхнюю и нижнюю рабочие поверхности. Верхняя рабочая поверхность выполнена по продольному краю с плоской гребенкой, лепестки которой имеют форму плоских сегментов. Между лепестками гребенки сформированы изогнутые зубья, направленные от плоскости гребенки вниз и в сторону нижней рабочей поверхности, которая выполнена со сквозными пазами напротив упомянутых зубьев и отогнута к низу. Изогнутые зубья имеют обтекаемую в поперечном сечении форму. Зубчатые гребенки установлены в раме одна за другой на расстоянии, обеспечивающем возможность вхождения изогнутых зубьев одной

пластины в соответствующие пазы соседней. Конструкция решетного стана исключает завихрения воздушных потоков вокруг гребенки, что обеспечивает эффективную работу решетного стана (Рисунок 2).

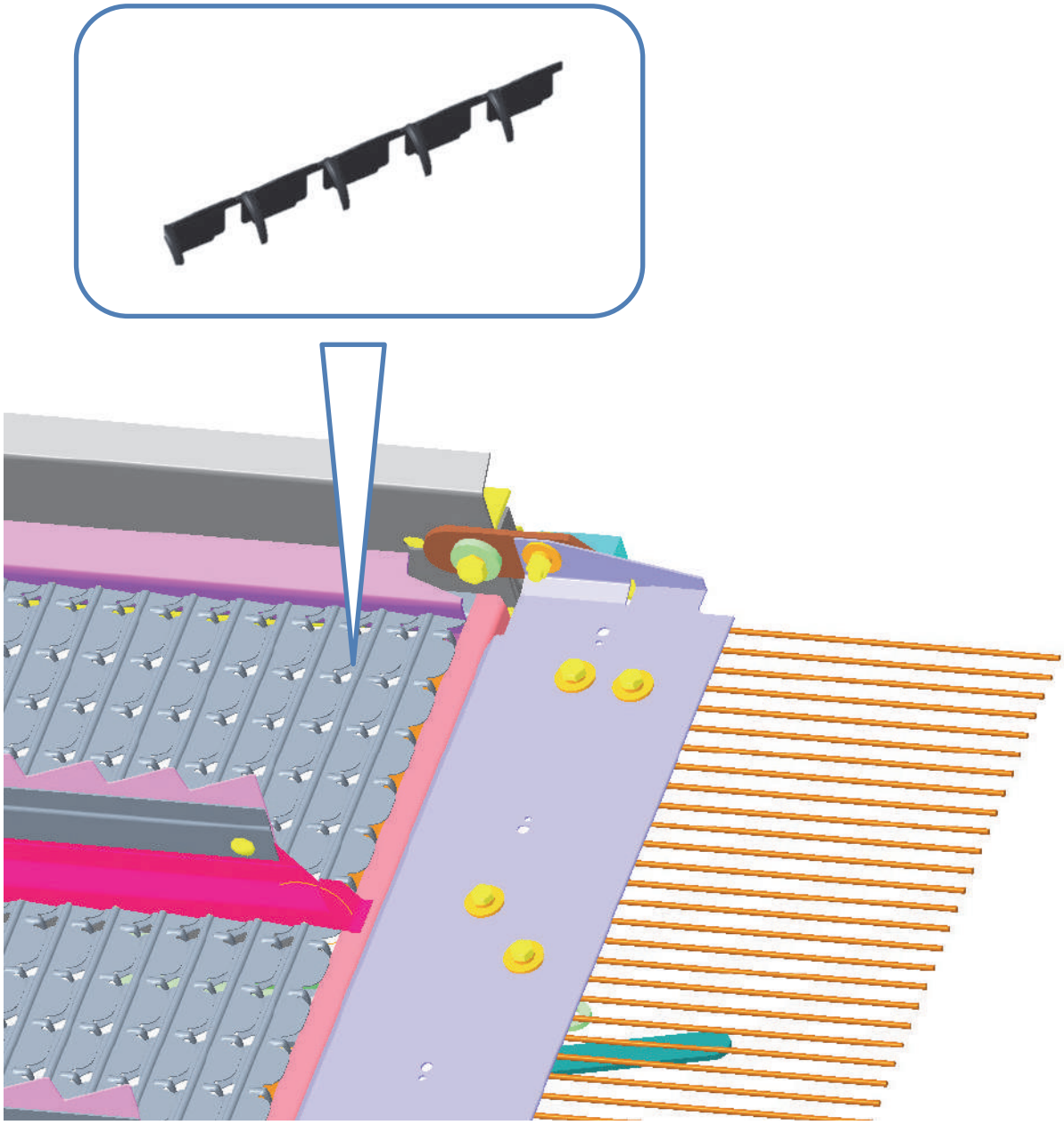


Рис. 2 – Решетный стан

Благодаря модифицированной зубчатой гребенки и подаче воздуха через специальные направляющие на решетах, производительность очистки увеличивается. Решета специально предназначены для тяжелых условий ведения уборки особенно на зерновых с повышенным содержанием измельченной соломы и половы.

В серийных системах очистки при больших подачах мелкого вороха и при повышенном содержании в смеси соломистых примесей резко возрастает толщина слоя на верхнем решетном стане и воздушный поток не может выносить легкие фракции.

Таким образом, зубчатая гребенка в системе очистки (Рисунок 3) обеспечивает качественный процесс разделения при перегрузке ее соломистыми примесями.

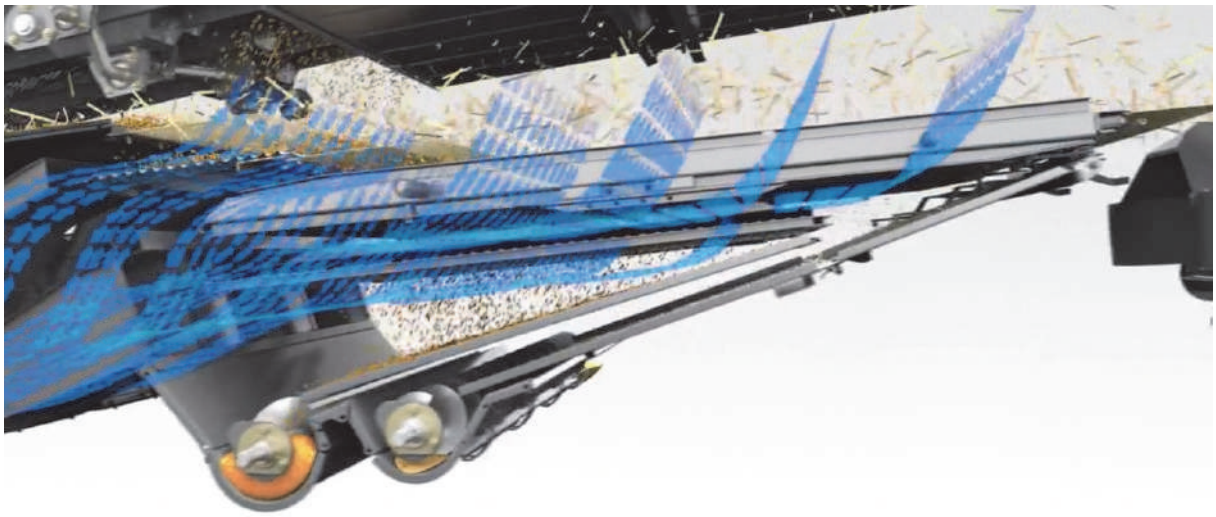


Рис. 3 – Очистка зерноуборочного комбайна.

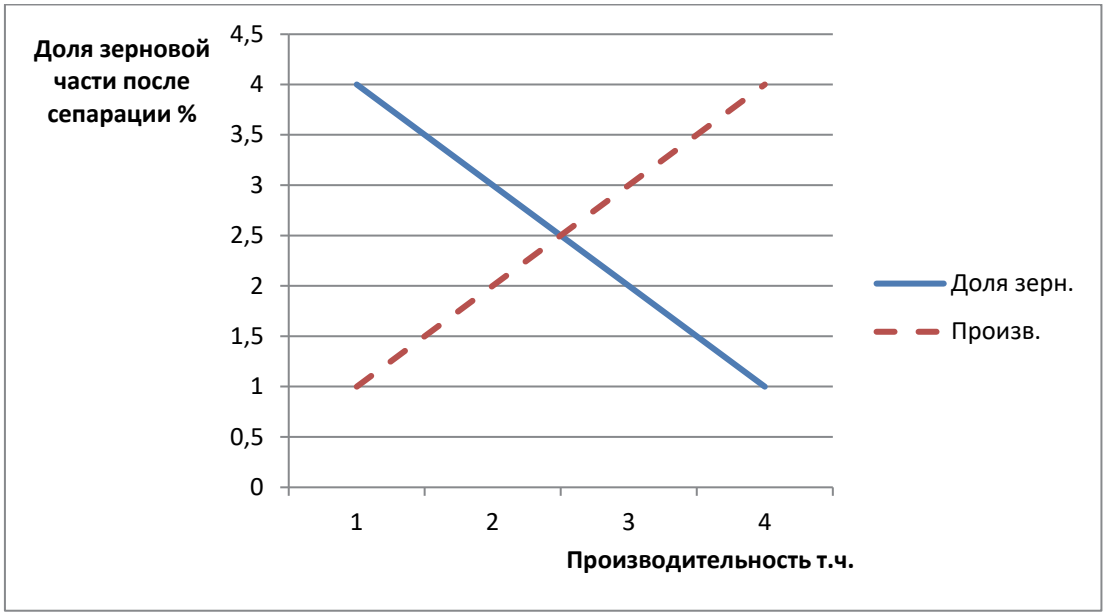


Рис. 4 – График зависимости производительности от доли зерновой части после сепарации исходной конструкции решетного стана.

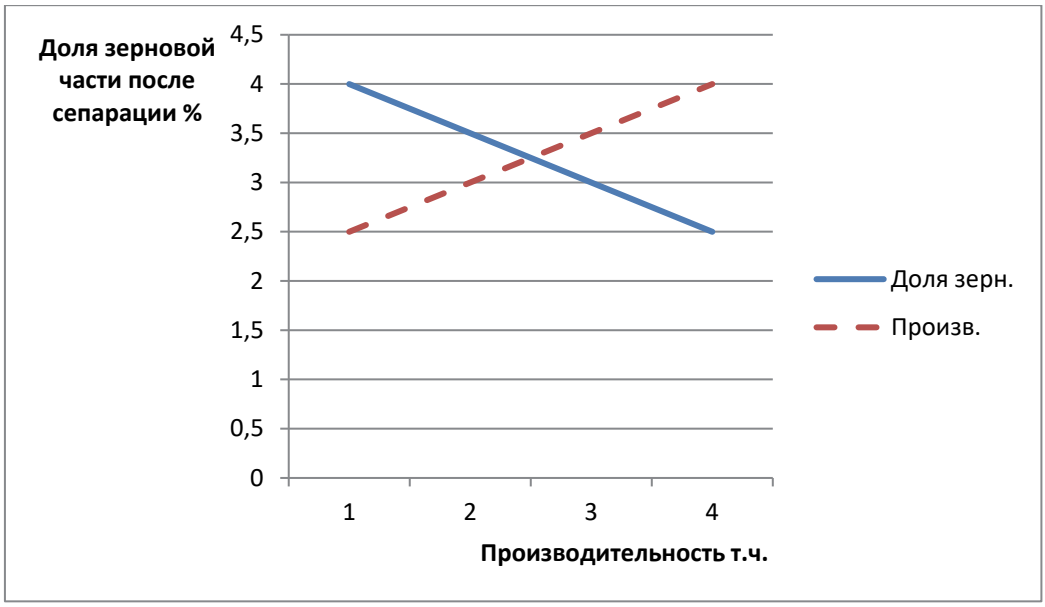


Рис. 4 – График зависимости производительности от доли зерновой части после сепарации предлагаемой конструкции решетного стана.

Модернизированная зубчатая гребенка не только улучшает свои индивидуальные характеристики, но и существенно повышает эффективность работы всего решетного стана в составе зерноуборочного комбайна. Оптимизированное взаимодействие рабочих органов позволяет достичь нового уровня качества сепарации при одновременном снижении эксплуатационных затрат.

Заключение

Проведенное исследование позволило разработать усовершенствованную конструкцию зубчатой гребенки для зерноуборочных комбайнов, обеспечивающую повышение в производительности и снижение потерь зерна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко, А.Н. Сельскохозяйственные машины: учебное пособие / В.М. Халанский. – Минск: БГАТУ, 2021. - 412 с.

2. Петрович, С.К. Совершенствование процесса сепарации в зерноуборочных комбайнах / С.К. Петрович // Вести БГАТУ. Серия «Технические науки». – 2022. - №3. - С. 45-52.

УДК 631.354.02

СНИЖЕНИЕ ВИБРОАКТИВНОСТИ РЕЖУЩЕГО АППАРАТА ЖАТКИ ДЛЯ УБОРКИ РИСА

Д.Ю. Барсуков
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В данной работе рассмотрен вопрос снижения инерционных нагрузок на элементы привода и рамные конструкции жатки и самоходной косилки с одновременным повышением производительности агрегата на уборке риса.

Введение

Рис как аграрная культура возделывается на территории более 60 стран мира**.** Сбор урожая риса – процесс трудоемкий, ведь каждый его этап требует профессионального подхода и особого внимания к деталям. Уборка риса возможна прямым и раздельным комбайнированием. При выборе способа уборки риса необходимо учитывать ряд факторов, таких как размер посевных площадей, климатические условия региона, наличие специализированный техники и трудовых ресурсов в хозяйстве. Каждый из методов обладает своими преимуществами и недостатками.

Раздельный способ уборки – наиболее распространенный и предпочтительный для российских рисоводческих хозяйств. Основная причина – в валке у зерен больше шансов дозреть и подсохнуть. Если уборка начинается с влажности 20–25%, то в валке рис может подсушиться до 16–18%. К тому же такой способ обмолота облегчает работу МСУ и увеличивает производительность комбайна. А зерно не требует дополнительной усиленной сушки [1].

Способ прямого комбайнирования применяется в меньшей степени из-за климатической неустойчивости и более жестких сроков уборки. Он используется при возделывании риса на ограниченных площадях в оптимальных погодных условиях. Современные технологии рисоводства ориентированы на максимальную механизацию процессов выращивания и уборки риса для повышения производительности труда и снижения издержек. Приоритет отдается высокопроизводительным комбайнам и раздельным способам уборки.

В настоящее время холдингом «ГОМСЕЛЬМАШ», для уборки риса раздельным способом, выпускаются косилки на гусеничном ходу CS150

CROSS с валковыми жатками захватом 5 метров, оснащенными беспальцевым режущим аппаратом с одним подвижным ножом.

Объект исследования

Жатка для уборки риса к самоходной косилке.

Цель исследования

Цель данного исследования заключается в снижении инерционных нагрузок, повышении производительности и надежности жатки для уборки риса.

Методы исследования – теоретический, расчетно-конструктивный, метод сравнительного анализа.

Результаты исследования

Основными узлами жатки для уборки риса, выпускаемой холдингом «ГОМСЕЛЬМАШ», являются: рама, установленный в передней части рамы режущий аппарат, содержащий один подвижный и один неподвижный нож, установленное на поддержках перед режущим аппаратом мотовило, установленные на раме за режущим аппаратом два поперечных транспортера. Каждый транспортер представляет установленные на раме жатки в подшипниковых опорах ведущий и ведомый валы, установленную на валах бесконечную транспортерную ленту, привод ведущего вала, механизм перемещения ведомого вала для натяжения транспортерной ленты [2].

Общий вид жатки для уборки риса представлен на рисунке 1.

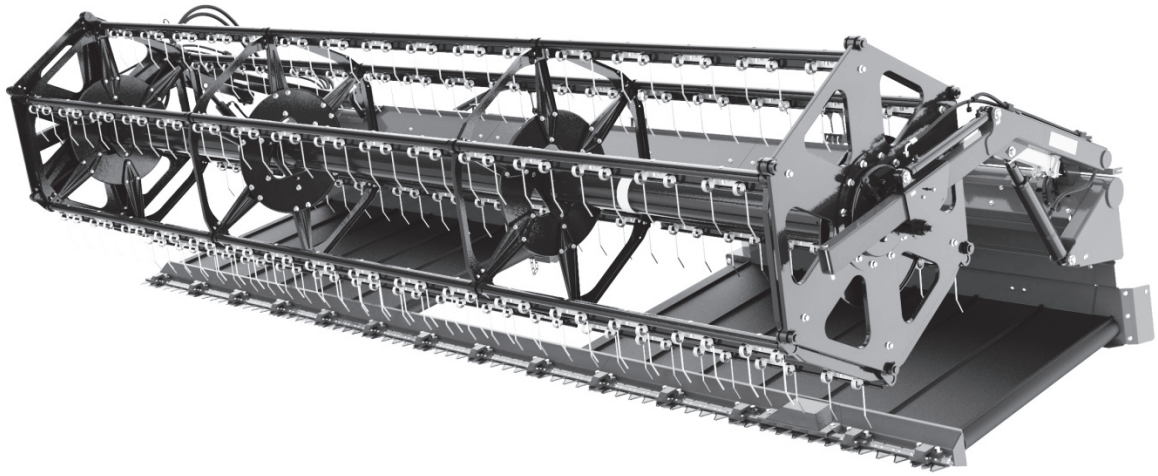


Рис. 1 – Жатка для уборки риса. Общий вид.

Режущий аппарат представляет собой два ножа, состоящие из ножевой полосы с закрепленными на ней режущими сегментами. Один из ножей – неподвижный – закреплен на раме жатки. Второй – подвижный – установлен на неподвижном ноже с возможностью совершать возвратно-поступательное перемещение. Привод подвижного ножа осуществляется от гидромотора 3, через карданную передачу 2, угловую передачу 1, шатун 7 и коромысло 6 (Рисунок 2).

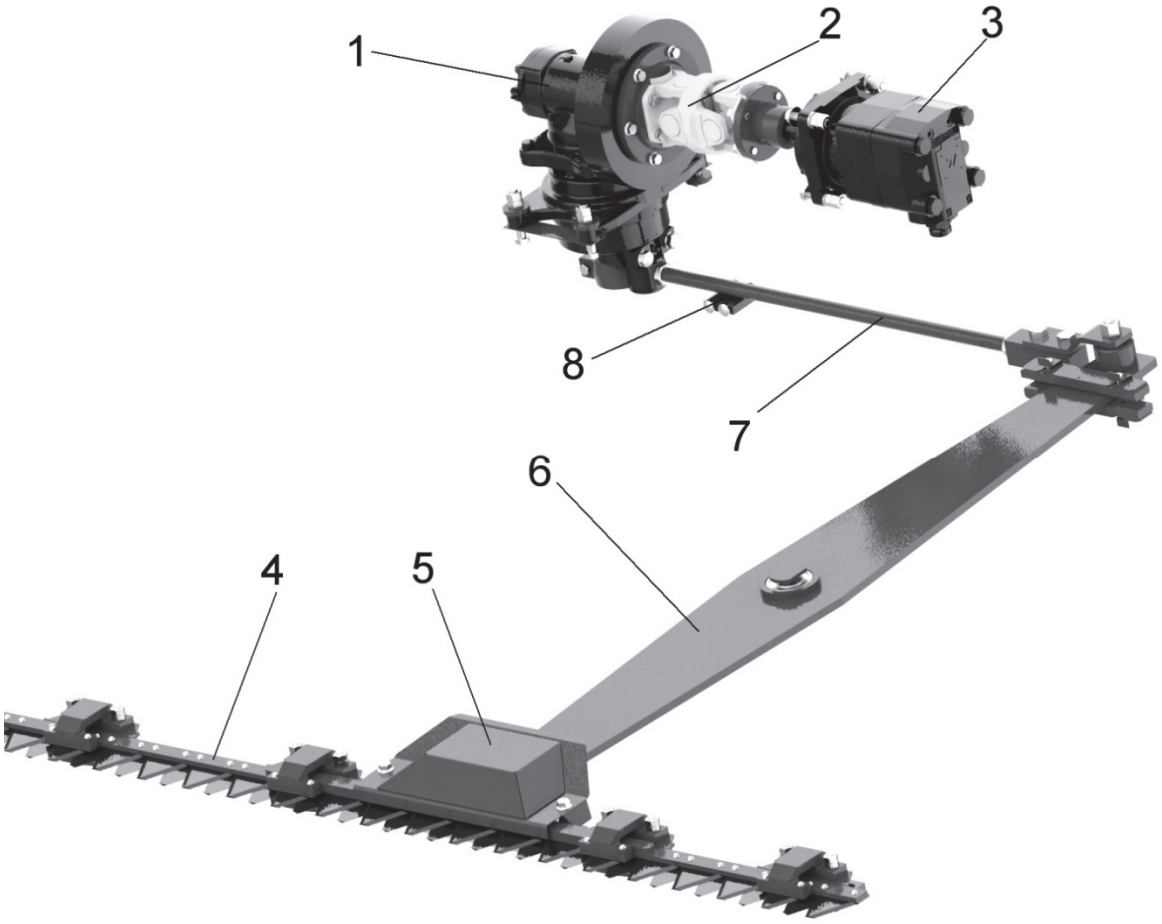


Рис. 2 – Односторонний привод режущего аппарата.

1 – угловая передача; 2 – карданная передача; 3 – гидромотор привода режущего аппарата; 4 – подвижный нож режущего аппарата; 5 – щиток; 6 – коромысло; 7 – шатун; 8 – успокоитель

Недостатком конструкции такой жатки является наличие неуравновешенной массы ножа, совершающего возвратно-поступательное движение, что вызывает инерционные нагрузки на привод и рамные элементы жатки. С увеличением рабочей скорости для обеспечения качественного среза растений требуется соответствующее увеличение числа

двойных ходов ножа, что в свою очередь повышает вибронагруженность жатки. Таким образом, возрастание вибрационных нагрузок до допустимых пределов ограничивает пропускную способность агрегата.

Предлагается применить в жатке двухножевой режущий аппарат с двухсторонним синхронизированным приводом, обеспечивающим поступательное движение ножей строго навстречу друг другу. При этом инерционные нагрузки взаимно уравновешиваются. Данное изменение позволит увеличить число двойных ходов ножей, обеспечив тем самым увеличение рабочей скорости агрегата.

Поставленная задача достигается тем, что на раме жатки установлен редуктор 1, на котором закреплен гидромотор 2. Редуктор содержит цилиндрическую полую шестерню 3, в шлицевое отверстие которой установлен шлицевой хвостовик гидромотора. Зубья шестерня 3 входят в зацепление с зубьями двух одинаковых вал-шестерен 4, нижний хвостовик которых выполнен с эксцентриситетом. Оси вращения шестерни и двух вал-шестерен расположены в одной плоскости, при этом шестерня 3 имеет четное число зубьев, а хвостовики вал-шестерен 4 установлены в противофазе и шарнирно соединены с шатунами 5 (Рисунок 3).

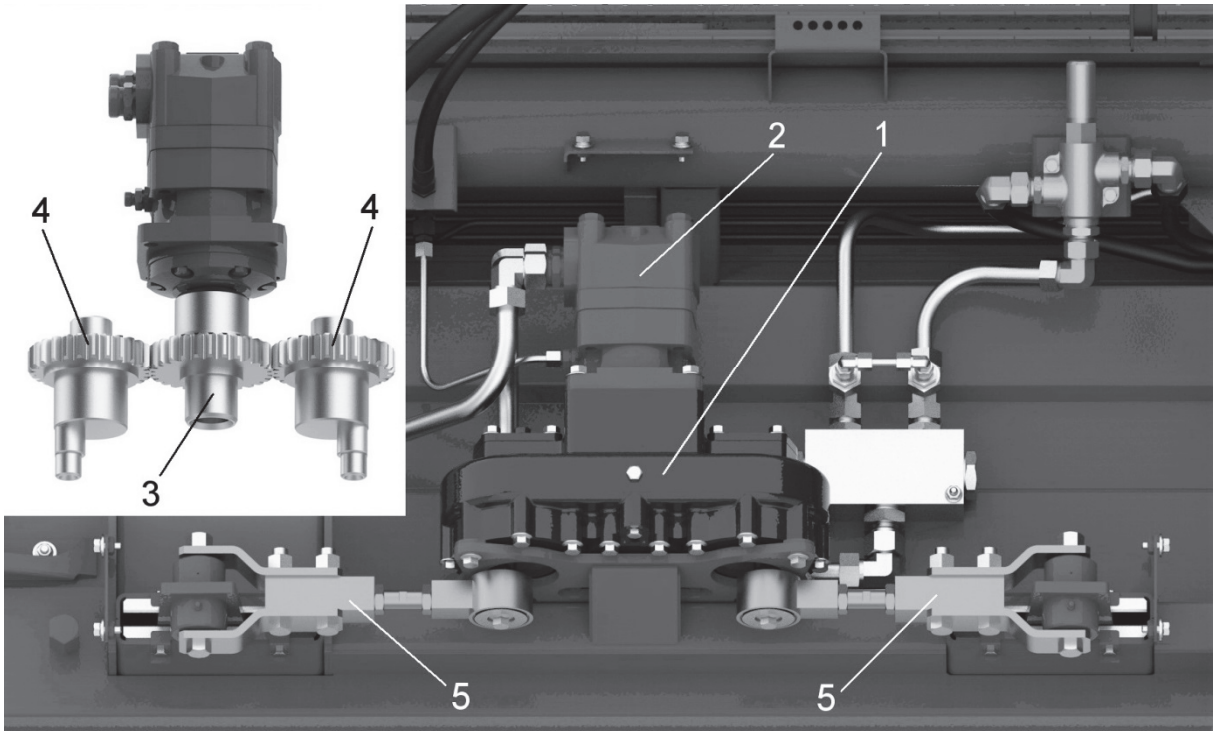


Рис. 3 – Редуктор привода режущего аппарата
1 – редуктор; 2 – гидромотор; 3 – шестерня; 4 – вал-шестерня; 5 – шатун

Шатуны в свою очередь шарнирно соединены с коромыслами 4, каждое из которых шарнирно соединено с одним из ножей 5 режущего аппарата. Направляющими для ножей служат прижимы 6, установленные на раме жатки (Рисунок 4).

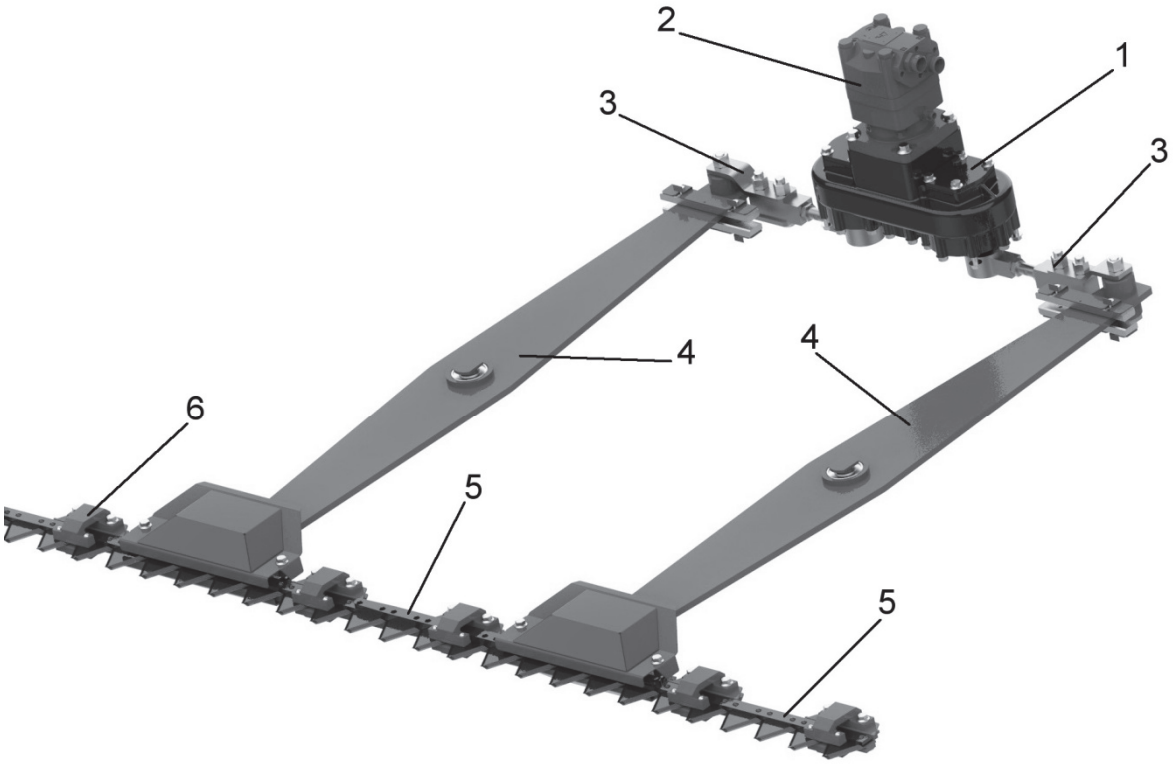


Рис. 4 – Двухсторонний синхронизированный привод режущего аппарата
1 – редуктор; 2 – гидромотор; 3 – шатун; 4 – коромысло; 5 – нож;
6 – прижим

Синхронизированный привод ножей режущего аппарата работает следующим образом. Гидромотор 2 через шестерню 3 приводит во вращение вал-шестерни 4, которые за счет эксцентриситета через шатуны 5 (Рисунок 3) и коромысла 4 преобразуют вращательное движение в возвратно-поступательное движение ножей 5 (Рисунок 4). За счет четного числа зубьев шестерни 3 и установленных в противофазе хвостовиков вал-шестерен 4 (Рисунок 3) ножи перемещаются строго на встречу друг другу, обеспечивая взаимное уравновешивание инерционных нагрузок.

Заключение

Применение в конструкции жатки двухстороннего синхронизированного привода существенно снизит виброактивность режущего аппарата, что позволит увеличить число двойных ходов ножа, обеспечив тем самым увеличение рабочей скорости косилки и, как следствие, производительности. Данная конструктивная схема кроме увеличения производительности агрегата обеспечивает повышение надежности жатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рис: биологические основы селекции и агротехники: монография / Г. Л. Зеленский. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – 238 с.

2. Жатка для риса ЖР-5. Руководство по эксплуатации. ОАО «Гомсельмаш» 2023.

УДК 621.643.02

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ВЕНТИЛЯТОРА ПЫЛЕСОСА НАКЛОННОЙ КАМЕРЫ КОМБАЙНА GS12A1

В.В. Гусарев, М.А. Савков
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В статье изложены этапы работ, выполнение которых позволит сократить затраты времени на поиск технического решения по уменьшению запыленности рабочей зоны жатки ЖЗК-7-7 и улучшению видимости ее рабочих органов при уборке зерновых колосовых культур зерноуборочным комбайном GS12A1. Авторы, для сокращения сроков выполнения опытно-конструкторских работ, предлагают, без разработки чертежей, использовать трехмерные электронные модели деталей для печати на 3D принтере при изготовлении опытных образцов.

ВВЕДЕНИЕ

Для проверки эффективности какого-либо технического решения требуется время на разработку, изготовление и проведение испытаний опытного образца. Этого времени порой недостаточно, так как уборка зерновых колосовых культур ограничена по времени. Применение современных технологий трехмерного проектирования и изготовления опытных деталей методом печати их на 3D принтере позволит повысить эффективность внедрения новых технических решений.

В качестве примера предлагается провести работы по повышению эффективности работы пылесоса наклонной камеры зерноуборочного комбайна GS12A1.

Эффективная работа пылесоса важна для зерноуборочного комбайна, так как пылесос снижает запыленность зоны обзора рабочих органов жатки. Хорошая видимость режущего аппарата, шнека и мотовила по всей ширине захвата жатки помогает комбайнеру контролировать процесс уборки, как в светлое, так и в темное время суток. Таким образом, эффективная работа пылесоса – это, прежде всего, высокая производительность зерноуборочной техники при минимальных потерях.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом для исследования является вентилятор пылесоса наклонной камеры комбайна GS12A1.

Вентилятор расположен на правой боковине наклонной камеры (рисунок 1). С левой стороны корпус вентилятора соединен с каналом, который всасывает запыленный воздух из наклонной камеры и жатки. В нижней части вентилятор соединен с отводом удаления пыльного воздуха. Отвод имеет прямоугольное сечение, ограниченное плоскими боковыми стенками и изогнутой задней стенкой.

Рис. 1 – Вентилятор наклонной камеры

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изменение конструкции отвода вентилятора с целью снижения интенсивности выветривания пыльной среды с поверхности с поля.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В вентиляторе применена крыльчатка с наружным диаметром лопастей 340 мм, вращающаяся с частотой 2600 об/мин, соответственно лопасти крыльчатки, создающие воздушный поток, имеют максимальную окружную скорость 46 м/с.

Отвод направляет и частично рассеивает воздушный поток от жатки вертикально вниз на стерню. Ранее, при проведении испытаний, на выходе из отвода вентилятора была зафиксирована скорость воздушного потока около 30 м/с при частоте вращения крыльчатки 2060 об/мин.

Можно предположить, что при частоте вращения крыльчатки 2600 об/мин скорость воздушного потока на выходе из пылесоса пропорционально возрастет до 37 м/с. При такой скорости воздушный поток

вентилятора поднимает пыль с поверхности почвы, выветривая ее. Поднявшаяся с поверхности почвы пыль частично возвращается в зону перед кабиной, ухудшая обзорность правой стороны жатки. Таким эффективность работы пылесоса снижается. Дальнейшее увеличение скорости вращения крыльчатки, при сохранении направления воздушного потока на отводе, также будет снижать эффективность пылесоса, что и произошло при переходе с частоты вращения крыльчатки 2060 об/мин на частоту 2600 об/мин. Пылесос стал активнее забирать пыль от жатки и сильнее стал пылить.

Запыленность зоны обзора рабочих органов жатки существенно затрудняет процесс уборки, особенно в темное время суток когда свет осветительных приборов, закрепленных на кабине над лобовым стеклом, отражаясь от облака пыли, ослепляет механизатора.

Актуальность работы по снижению запыленности зоны обзора продемонстрирована фотографиями, показанными на рисунке 2.

а) днем б) ночью в) облако пыли из отвода

Рис. 2 – Ухудшение видимости рабочих органов жатки при неэффективной работе вентилятора с частотой 2060 об/мин

Для улучшения работы пылесоса при сохранении частоты вращения крыльчатки вентилятора 2600 об/мин предлагается снизить скорость воздушного потока над поверхностью поля. Для достижения этой цели предлагается разбить воздушный поток на составляющие с изменением их направления.

Для решения данной задачи на первом этапе разработана трехмерная электронная модель рассекателей, форма которых показана на рисунке 3. Трехмерная модель переведена в формат необходимый для печати на 3D принтере. В связи с тем, что для печати на 3D принтере чертежи деталей не требуются, экономится время на разработку и согласование конструкторской документации.

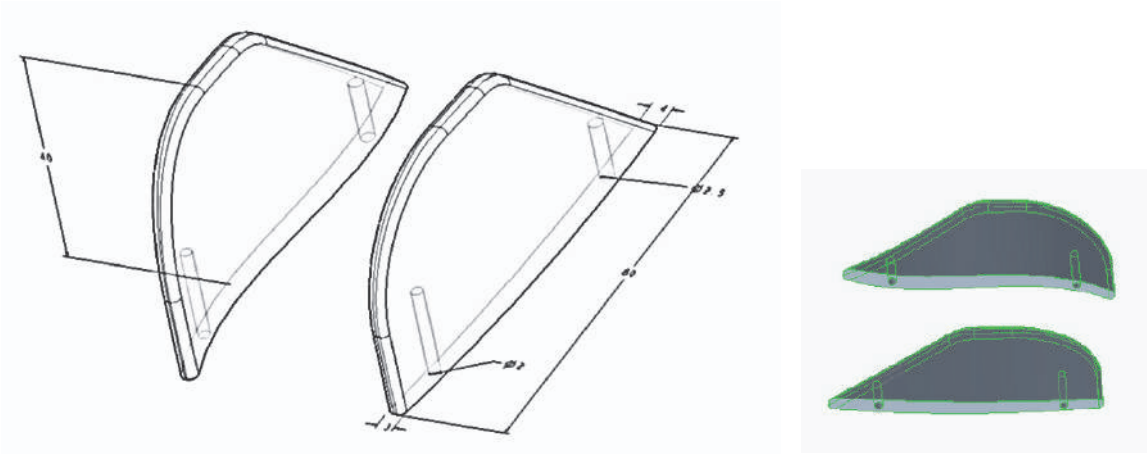


Рис. 3 – Трехмерная модель рассекателей

На втором этапе выполняется изготовление полимерных деталей рассекателей методом печати на 3D принтере. Печать деталей не требует длительной подготовки производства и выполняется с высокой точностью. Изготовление деталей на принтере сокращает срок получения опытных образцов рассекателей.

На третьем этапе выполняется доработка пылесоса наклонной камеры следующим образом:

Детали рассекателей крепятся на задней стенке отвода с возможностью регулировки по овальным пазам (рисунок 4). Для этой цели на задней стенке отвода изготавливаются овальные пазы. Установка двух рассекателей позволит разбить воздушный поток на три составляющие.

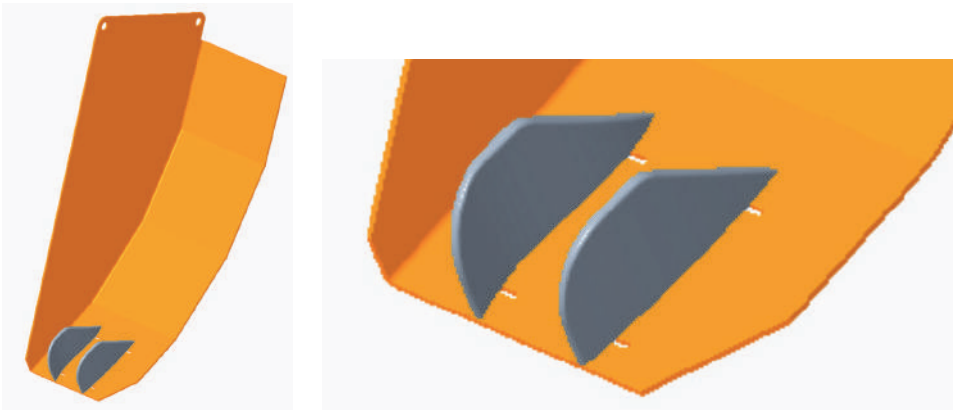


Рис. 4 – Отвод вентилятора с рассекателями

На третьем этапе проводятся испытания, в ходе которых определяются направления воздушных потоков и их скорости над поверхностью площадки. Испытания можно проводить в лабораторных условиях без выезда в поле, не зависимо от погоды и времени года, что позволит ускорить испытания.

Для регистрации направления воздушных потоков отвод вентилятора обклеивается ленточками как показано на рисунке 5.

Рис. 5 – Регистрация направления воздушных потоков

Для измерения скорости воздушного потока используется многофункциональный комбинированный прибор “Testo 400” или аналогичный по характеристикам прибор.

Для определения интенсивности выветривания, взвешенный образец пыли, полученный из сухой почвы, необходимо размещать на площадке под отводом. Интенсивность выветривания, с размерностью кг/с, может быть определена при помощи весов и секундомера.

Доработанная конструкция задней стенки отвода позволит провести несколько опытов с различными вариантами установки рассекателей. В ходе испытаний необходимо определить и зафиксировать оптимальные настройки положения рассекателей, при которых интенсивность выветривания минимальна.

На четвертом этапе выполняется оценка результатов испытаний и принимается решение. В случае необходимости, с учетом полученных данных, форма лопаток может быть быстро изменена методом корректировки трехмерной электронной модели, и печати ее на принтере. Таким образом описанные выше этапы работ должны быть повторены для получения приемлемого результата.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результатом исследования является выполнение работ первого и второго этапа – создана трехмерная электронная модель двух опытных рассекателей и распечатана на 3D принтере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для завершения работ требуется провести испытания, проанализировать результаты испытания и скорректировать положение и форму лопаток в соответствии с данными, полученными в ходе испытаний.

УДК 631.354.23

УЛУЧШЕНИЕ АЭРОДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ КАСКАДОМ В СТРЯСНОЙ ДОСКЕ

А.А. Соловьева, А.А. Морозов
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В работе рассматривается задача повышения эффективности очистки зерна в комбайнах посредством улучшения аэродинамических характеристик четырех каскадной системы. Авторами проанализировано распределение скоростей воздушных потоков в системе очистки с исходной конструкцией вентилятора и оптимизированным перепадом.

Введение

Очистка зерна является одним из ключевых процессов в работе зерноуборочного комбайна. Качество и эффективность очистки напрямую влияют на потери зерна, его чистоту и, как следствие, на экономическую эффективность.

Современное комбайностроение сталкивается с рядом вызовов, связанных с повышением эффективности процессов очистки зерновых культур. Аэродинамика играет ключевую роль в этих процессах, так как от нее зависит качество отделения зерна от примесей, а также минимизация потерь продукции. Традиционные трех каскадные системы очистки, хотя и зарекомендовали себя на протяжении многих лет, имеют свои ограничения по производительности и эффективности.

Переход к четырех каскадной системе открывает новые возможности для оптимизации аэродинамических процессов, что может значительно улучшить качество очистки и снизить энергозатраты. Четыре каскада позволяют более точно управлять воздушными потоками и взаимодействием зерна с примесями, обеспечивая более эффективное разделение на каждом этапе очистки. Это, в свою очередь, может привести к уменьшению содержания примесей в конечном продукте и повышению общей производительности комбайнов.

Предмет исследования

Система очистки с дополнительным каскадом.

Цель исследования

Цель данного исследования заключается в том, чтобы создать еще один продуваемый каскад (перепад) между стрясной доской и дополнительным верхним решетом, и этим превратить очистку из 3-х

каскадной в 4-х каскадную. Данный каскад увеличит вынос легких примесей из зернового вороха перед поступлением его на верхнее дополнительное решето и, таким образом, уменьшит воспринимаемую удельную нагрузку на решета, увеличив производительность всей очистки.

Методология исследования

Теоретический, расчетно-конструктивный, метод сравнительного анализа.

Результаты исследования

В настоящее время очистка (рис.1) зерноуборочных комбайнов GS10, GS5, GS 1218, GS3219, GH800, GH810 и их модификаций содержит стрясную доску 1, вентилятор 2, дополнительное верхнее решето 3, верхнее решето 4, нижнее решето 5 и имеет 3 каскада предварительного выдува легких примесей из зернового вороха.

Во время выполнения технологического процесса перед поступлением зернового вороха на дополнительное верхнее решето (3) *происходит только один обдув горизонтальным воздушным потоком (6)*, что, в свою очередь, является ограничением пропускной способности очистки.

Предлагаем создать еще один продуваемый каскад (перепад) между стрясной доской и дополнительным верхним решетом, за счет чего повысить производительность имеющейся очистки.

Для создания дополнительного каскада на базе имеющейся стрясной доски не изменяя ее положение в конечных точках 1,2 (рис. 1) в зоне вертикальной плоскости оси вентилятора очистки создан перепад за счет доворота на 2° передней и задней частей стрясной доски относительно крайних точек 1, 2 (рис. 1). Данный шаг позволяет создать перепад между полами стрясной доски высотой 75…80 мм, и при этом, не теряется скорость перемещения зерновой массы.

Предлагаемая 4х-каскадная очистка (рис. 2) состоит из стрясной доски 1, имеющей дополнительный продуваемый каскад (перепад) 8 между стрясной доской 1 и дополнительным верхним решетом 3, вентилятор 2, верхнее решето 4 и нижнее решето 5.

Дополнительный каскад стрясной доски увеличит вынос легких примесей из зернового вороха перед поступлением его на верхнее дополнительное решето и, таким образом, уменьшит воспринимаемую удельную нагрузку на решета, увеличив производительность всей очистки.

Во время выполнения технологического процесса зерновая смесь, попавшая на стрясную доску, транспортируется к верхнему решетному стану. Слой зерновой смеси, проваливающийся через пальцевую решетку стрясной доски, несколько разрыхляется, благодаря чему зерно и тяжелые примеси проваливаются вниз на дополнительный каскад стрясной доски 8,

а полова и другие легкие примеси под действием воздушной струи вентилятора 7 выдуваются из молотилки. Затем слой зерновой смеси, снова разрыхляется, проходя сквозь пальцевую решетку дополнительного каскада стрясной доски 8 и горизонтальным воздушным потоком 6 продувается еще раз перед попаданием на дополнительное верхнее решето 3. Часть зерна проваливается через дополнительное решето 3 на нижнее решето 5, а часть, продуваясь имеющимися в серийной очистке воздушными потоками – на верхнее решето 4. С верхнего решета 4 зерно просыпается на нижнее решето 5, с которого очищенное зерно ссыпается через поддон к шнеку зерновому и загружается в бункер элеватором зерновым и шнеком загрузным. Через удлинитель верхнего решетного стана недомолоченные колоски ссыпаются в поддон к шнеку колосовому и подаются элеватором колосовым в молотильный аппарат на домолот.

Очищенное зерно после заполнения зернового бункера выгружается в транспортное средство шнеком выгрузным.

Таким образом, зерновая смесь, проходя четыре каскада очистки, три из которых имеют пальцевые решетки, подвергается тройному обдуву, что позволяет снизить процент легких примесей в зерновом ворохе, поступающем на решета, уменьшить воспринимаемую удельную нагрузку на решета и увеличить производительность очистки.

Предлагаемая 4х-каскадную очистку предназначена для внедрения в конструкцию существующих зерноуборочных комбайнов GS10, GS5, GS1218, GS3219, GH800, GH810 и их модификаций, а также и в другие зерноуборочные комбайны, имеющие в основе схожую с базовым вариантом систему очистки.

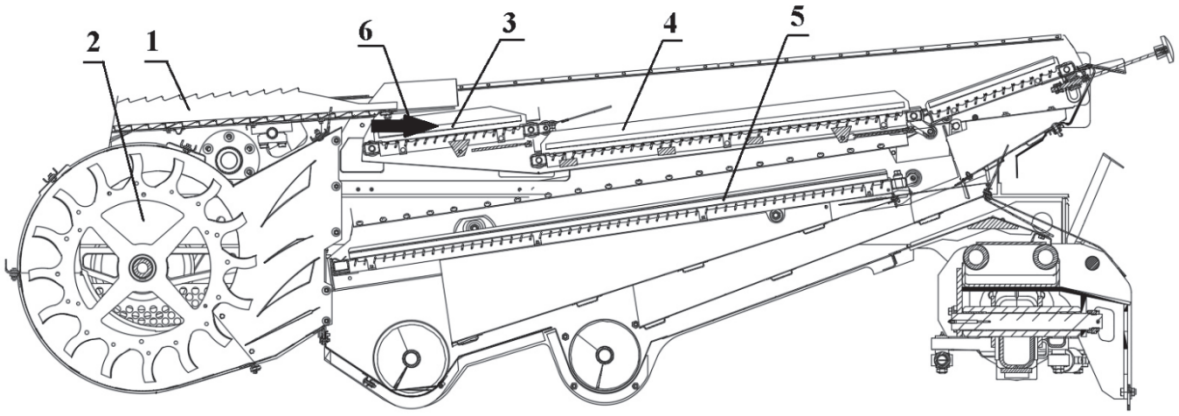


Рис. 1 – Базовый вариант трех каскадной очистки

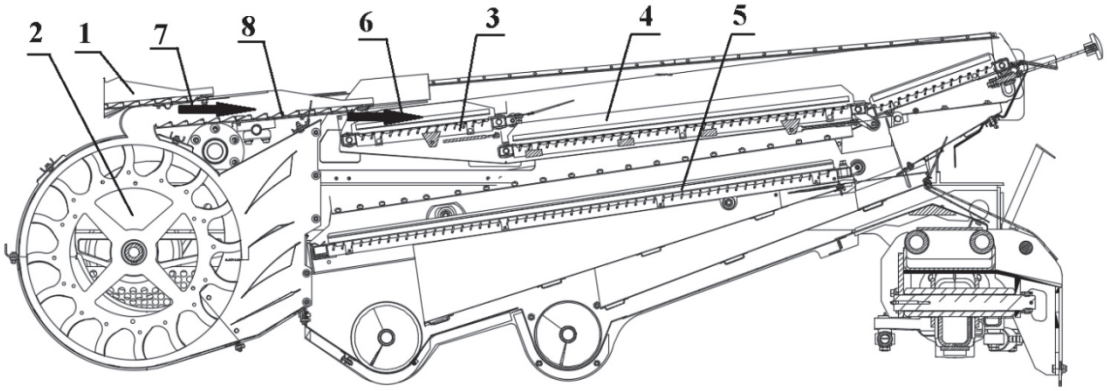


Рис. 2 – Предлагаемый вариант четырех каскадной очистки

Для повышения производительности системы очистки рассмотрена измененной конструкция стрясной доски и вентилятора очисток комбайнов GS12A1, GH800, GH810 (рис. 2 и рис. 3).

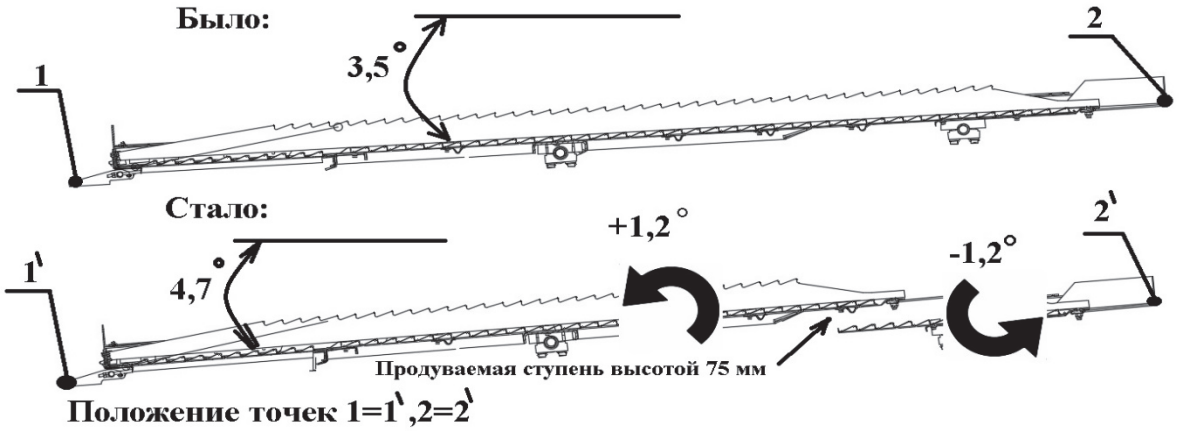


Рис. 3 – Предлагаемое изменение стрясной доски

По результатам предварительных расчетов измененной конструкции вентилятора и стрясной доски определена конструкция, представленная на рисунке 4.

Проведен сравнительный расчет исходной системы очистки и оптимизированной системы очистки с дополнительным каскадом при оборотах вентилятора 630 об/мин.

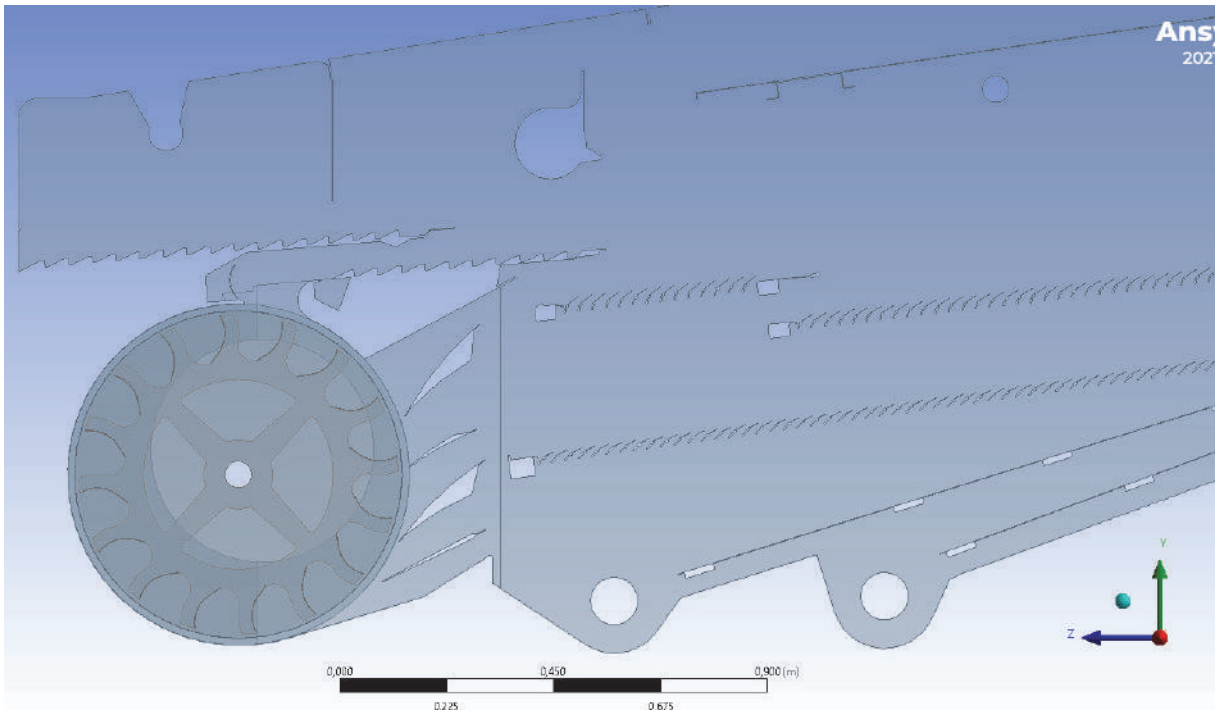


Рис. 4 – Расчетная оптимизированная модель системы очистки комбайна с дополнительным каскадом

На рисунке 5 приведены характерные плоскости в одном блоке вентилятора для анализа воздушного потока в системе очистки зерноуборочного комбайна.

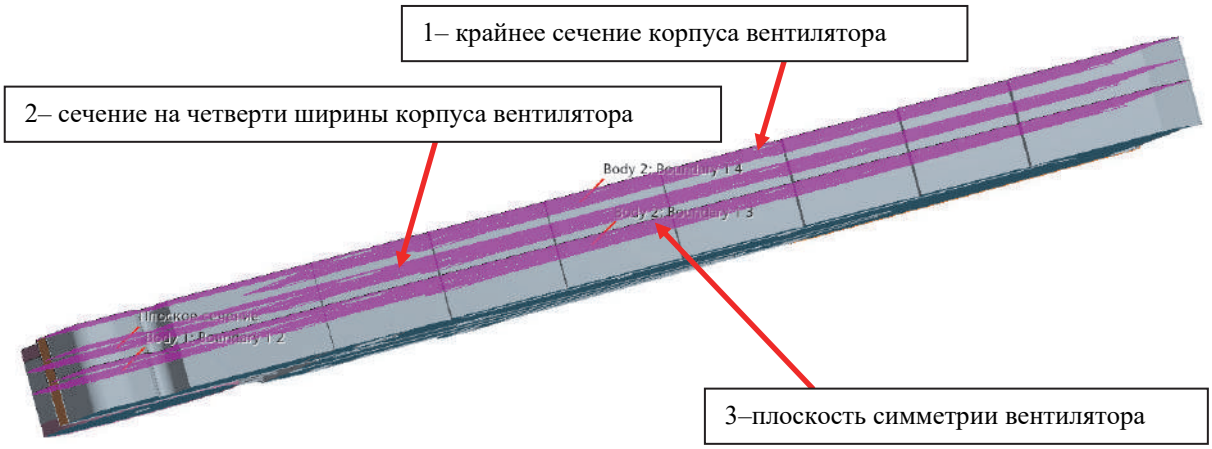


Рис. 5 – Характерные плоскости в системе очистки для анализа аэродинамического потока

На рисунке 6 приведены поля распределения усредненных скоростей воздушных потоков в проточной области исходной конструкции системы очистки в сечении 1 (рис. 5), на рисунке 7 – в измененной конструкции.

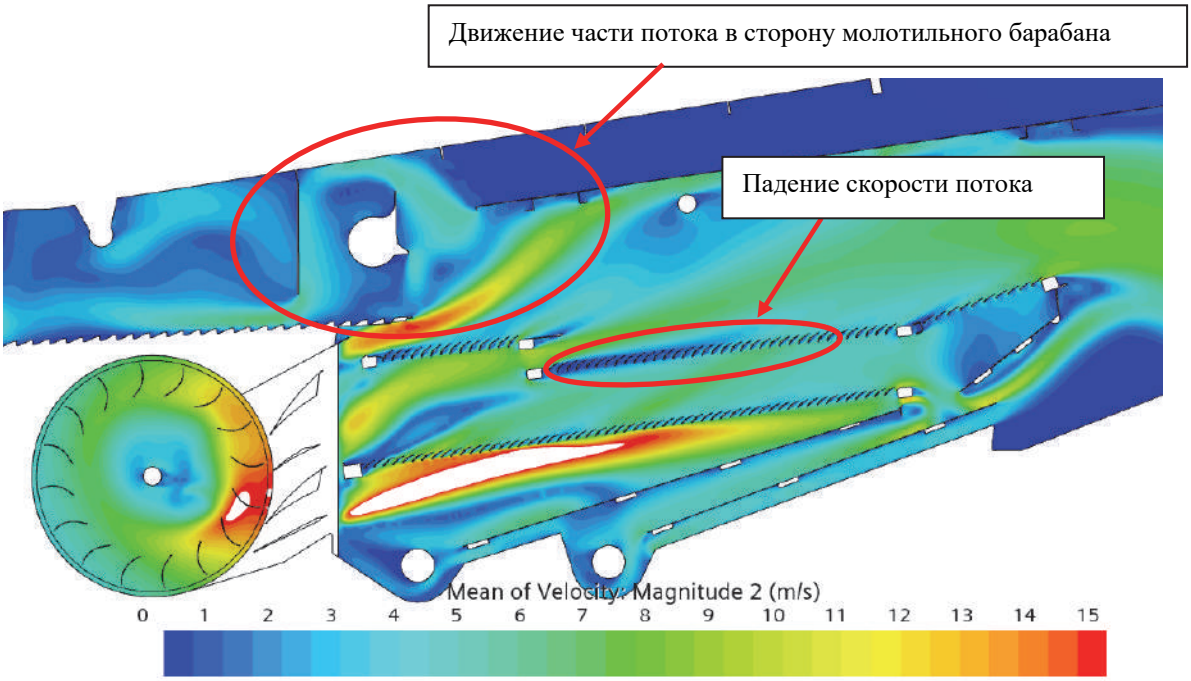


Рис. 6 – Распределение скоростей воздушных потоков в системе очистки с исходной конструкцией вентилятора в сечении 1 (рис. 5)

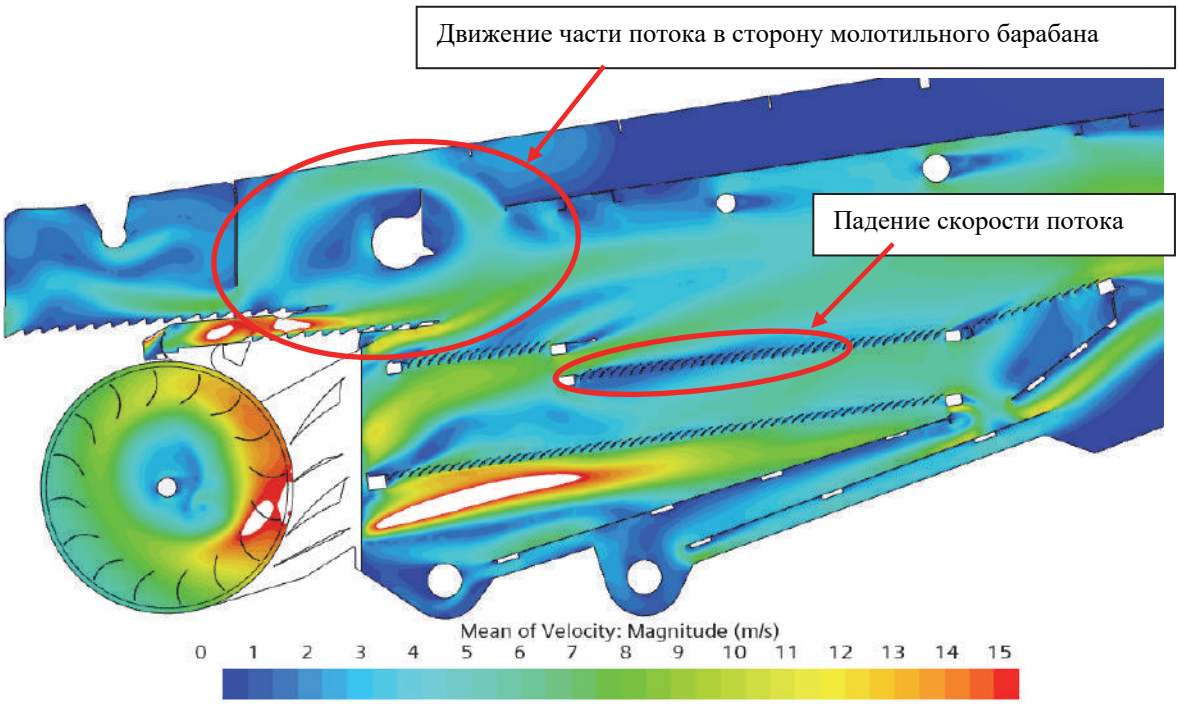


Рис. 7 – Распределение скоростей воздушных потоков в системе очистки с оптимизированным перепадом в сечении 1 (рис. 5)

Как видно из рисунков 6 и 7 при применении дополнительного каскада в стрясной доске в сечении 1 (рис. 5) наблюдается практически

аналогичная исходной конструкции картина распределения скорости в системе по верхнему и нижнему решету.

Также видим, что дополнительный каскад стрясной доски увеличит вынос легких примесей из зернового вороха перед поступлением его на верхнее дополнительное решето и, таким образом, уменьшит воспринимаемую удельную нагрузку на решета.

Вывод

Предлагаемая конструкция дополнительного каскада стрясной доски и отвода вентилятора обеспечивает повышение производительности систем очистки зерноуборочных комбайнов GS12A1, GH800, GH810 за счет дополнительной продувки массы на стрясной доске, что увеличит вынос легких примесей из зернового вороха перед поступлением его на верхнее дополнительное решето и, таким образом, уменьшит воспринимаемую удельную нагрузку на решета, увеличив производительность всей очистки. Распределение воздушных потоков над верхним и нижним решетами аналогично исходной конструкции, а в некоторых сечениях равномерность распределения улучшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов С.А. Воздушно-решетные очистки зерноуборочных комбайнов, 1987. – 158 с.

2. Казанский В.В, Справочное пособие по зерноуборочным комбайнам, - Гомель: РПУП «Полеспечать», 2000. – 254 с.

3. Баран И.А., Попов В.Б. К вопросу о повышении производительности системы очистки самоходного зерноуборочного комбайна / И.А. Баран, В.Б. Попов // Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого: научно-практический журнал. - 2023. - №1. – С. 20-30.

УДК. 62-776.2

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВОЗДУХОМ

В.В. Кравжуль, А.В. Сущенко, Ю.В. Миранович
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В работе рассмотрена одна из проблем, связанная с эксплуатацией сельскохозяйственной техники – увеличение разряжения в системе питания двигателя воздухом. Предложены пути уменьшения показателя сопротивления на входе в турбокомпрессор двигателя при работе уборочной сельскохозяйственной техники в условиях запыленности.

Введение

Для эксплуатации самоходной сельскохозяйственной техники необходимо обеспечить непрерывной работой систему питания двигателя воздухом.

Условия эксплуатации самоходной сельскохозяйственной техники характеризуются высокой запыленностью и наличием витающих частиц убираемых культурных растений и сорняков, образующихся во время выполнения технологического процесса уборки, см. рис. 1. При попадании через систему питания данных элементов в двигатель, вызывается износ цилиндров, поршневых колец, клапанов и подшипников турбокомпрессора. Для предотвращения описанных негативных последствий применяются системы очистки воздуха.

При эксплуатации самоходной сельскохозяйственной техники происходит засорение системы очистки воздуха, что в свою очередь приводит к созданию разряжения в системе питания двигателя воздухом. Результатом создавшегося разряжения является недостаточный объем подачи воздуха в цилиндры двигателя.

Объект исследования – устройство очистки системы питания двигателя воздухом.

Цель исследования – понижение значения разряжения на входе турбокомпрессора в системе питания двигателя воздухом.

Методология исследований: системный анализ, сравнительный анализ.

Рис. 1 – Образовавшаяся запыленность и витающие частицы в зоне работы реальных полевых условий самоходного кормоуборочного комбайна

Устройство

Система питания двигателя воздухом предназначена для забора воздуха из атмосферы, очистки его от пыли и распределения по цилиндрам.

Вал турбокомпрессора, приводимый в движение потоком выхлопных газов, раскручивает лопасти начиная создавать разряжение, затягивающие воздух из атмосферы.

Атмосферный воздух попадает в систему очистки, состоящую из систем грубой и тонкой очистки воздуха, соединенную трубопроводам с турбокомпрессором двигателя.

В настоящие время на кормоуборочных комбайнах FS650 с двигателем 8807.10 производства ПАО“ТМЗ”, РФ и FS650 с двигателем Weichai WP17, КНР применяется установка воздухоочистителя, которая состоит из системы грубой очистки воздуха (предочиститель GR555) и тонкой очистки воздуха (фильтр KL43E) производства “OQUATRO”, Аргентина, см. рис. 2 и 3.

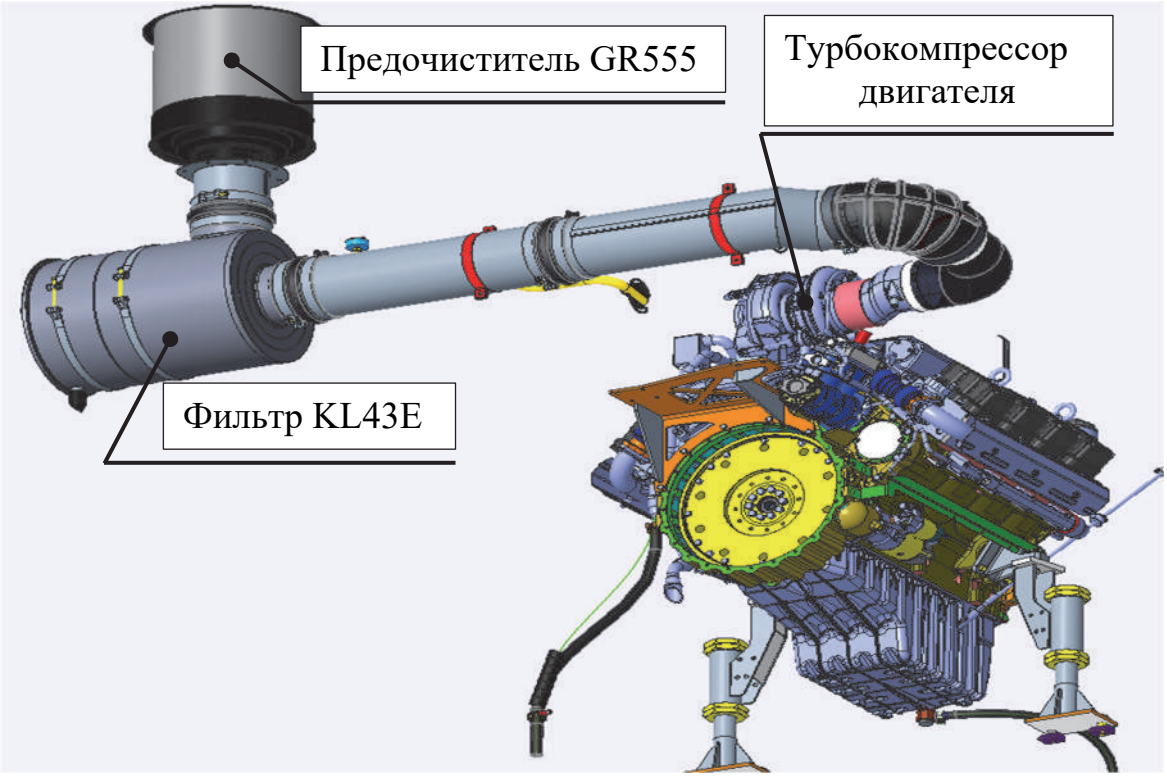


Рис. 2 – Установка воздухоочистителя на кормоуборочном комбайне FS650 с двигателем Weichai WP17, КНР

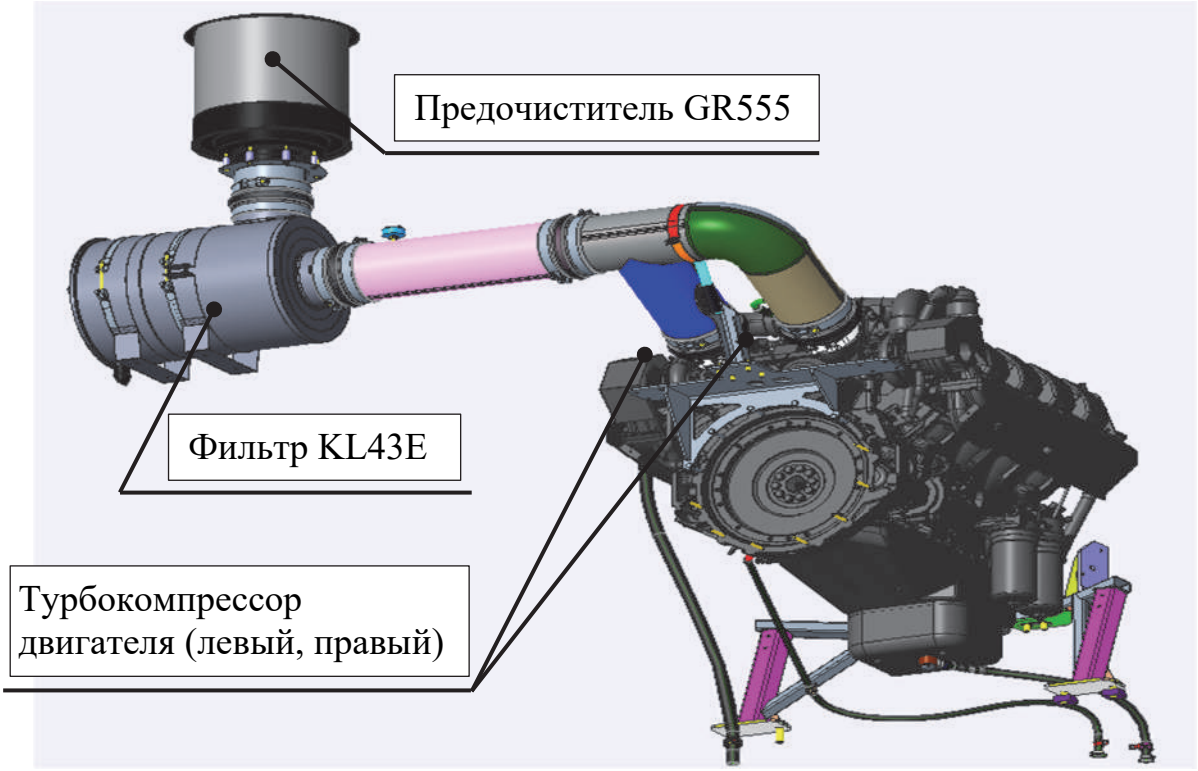


Рис. 3 – Установка воздухоочистителя на кормоуборочном комбайне FS650 с двигателем 8807.10 производства ПАО“ТМЗ”, РФ

Испытания

Испытания на тепловой режим проводились на территории участка комплексных испытаний сельскохозяйственных машин.

Измерения разряжения проводились путем установки датчиков на трубопроводе после воздушного фильтра место 1 и на входе в турбокомпрессор место 2 и 3, см. слайд №4, №5.

Во время проведения стендовых испытаний производилась загрузка двигателя до частоты вращения коленчатого вала 1960…1970 об/мин (номинальная частота вращения – 2000 об/мин) путем нагружения:

- вала гидромотора (79…81 л.с.),
- вала привода адаптеров (20…22 л.с.),
- вала гидромотора привода вальцев (30…32 л.с.),
- вала измельчающего барабана, (369…373 л.с.)

Суммарная тормозная мощность, создаваемая нагружателями составляла 500…506 л.с.

При проведении измерений на комбайне и FS650 с двигателями Weichai WP17, КНР и 8807.10 ПАО “ТМЗ”, РФ было зафиксировано, что система очистки воздуха, состоящая из предочистителя и воздушного фильтра производства “OQUATRO”, Аргентина, превышает начальное максимально допустимое значение разрежение воздуха для нормальной работы двигателя. Полученные данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Измеряемый параметр	FS650 Weichai WP17, КНР	FS650 ПАО “ТМЗ”, РФ		Предельно допустимое значение
		левый	правый	
Разряжение после воздушного фильтра, кПа	4,0	6,5	6,5	3,5
Разряжение перед турбокомпрессором, кПа	4,0	6,5	6,6	3,5

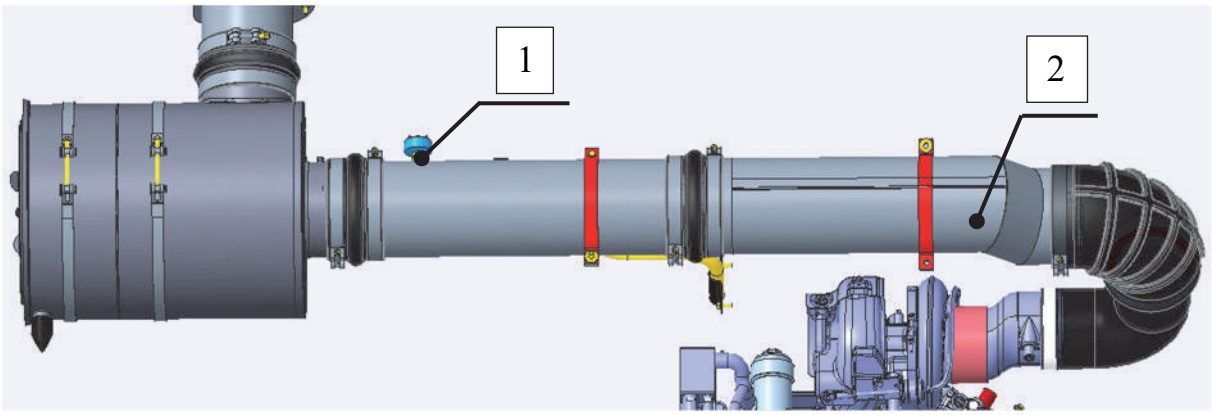


Рис. 4 – места 1, 2 измерения разрежения воздуха питания двигателя соответственно после воздушного фильтра и на входе в турбокомпрессор

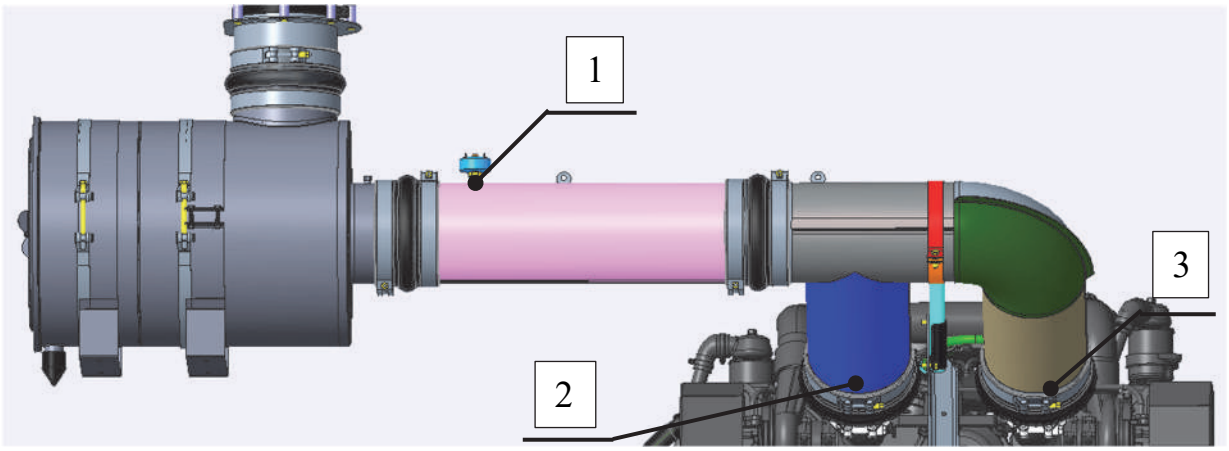


Рис. 5 – места 1, 2, 3 измерения разрежения воздуха питания двигателя соответственно после воздушного фильтра и на входе в левый и правый турбокомпрессор

Максимально допустимое значение разрежения воздуха не должно превышать 3,5 кПа. Для соблюдения данного требований производителя двигателя, была изменена система питания двигателя воздухом следующим образом:

Вместо предочистителя GR555 и фильтра KL43E разработана и применена система фильтрации воздуха, состоящая из 2-х фильтров 725.1109510-60 производства ОАО “Автоагрегат”, РФ г. Ливны, и воздухозаборника КЗК-16-3-0106250 производства ОАО “Гомсельмаш”, см. слайд №6.

Описанная система была установлена и испытана на опытном образце комбайна FS650 с двигателем 8807.10 ПАО“ТМЗ”, РФ. Согласно стендовых испытаний отмечено значительное снижение начального разряжения воздуха, см. слайд №7:

-с 6,5 кПа до 3 кПа после воздушного фильтра.

-с 6,5 и 6,6 кПа до 3,0 и 2,6 кПа перед турбокомпрессорам.

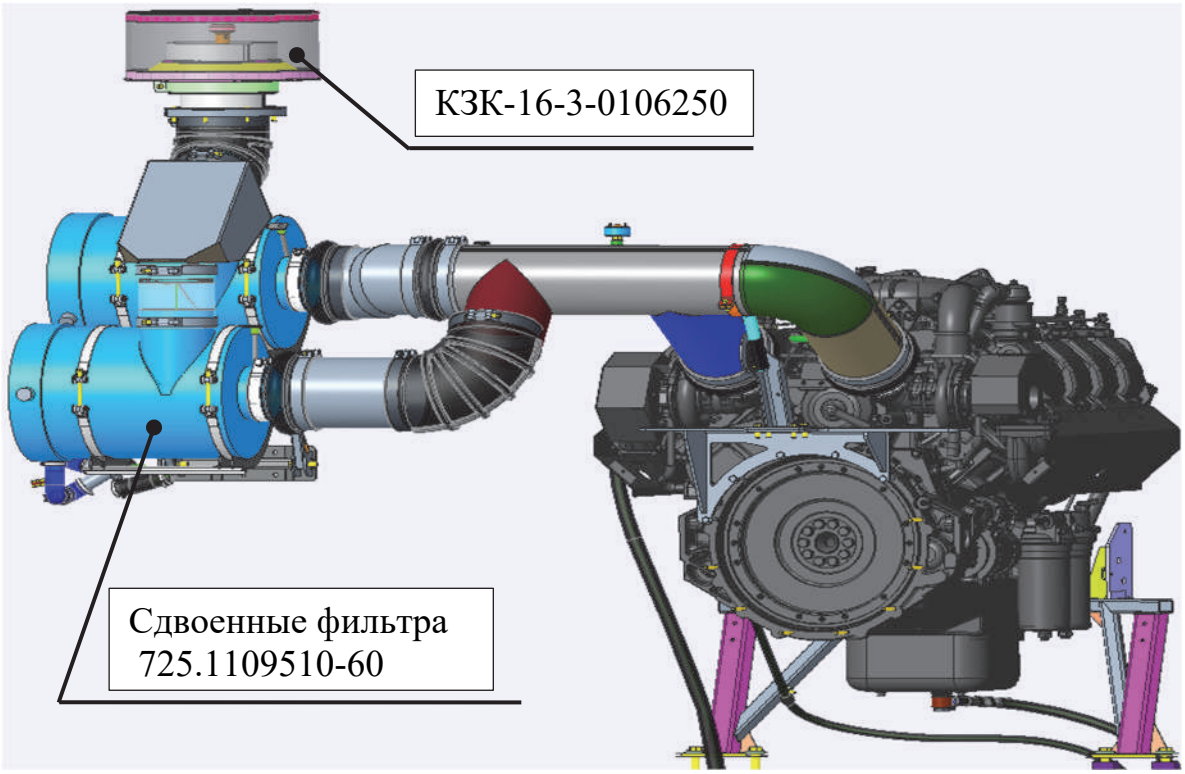


Рис. 6 –Измененная установка воздухоочистителя на кормоуборочном комбайне FS650 с двигателем 8807.10 производства ПАО“ТМЗ”, РФ

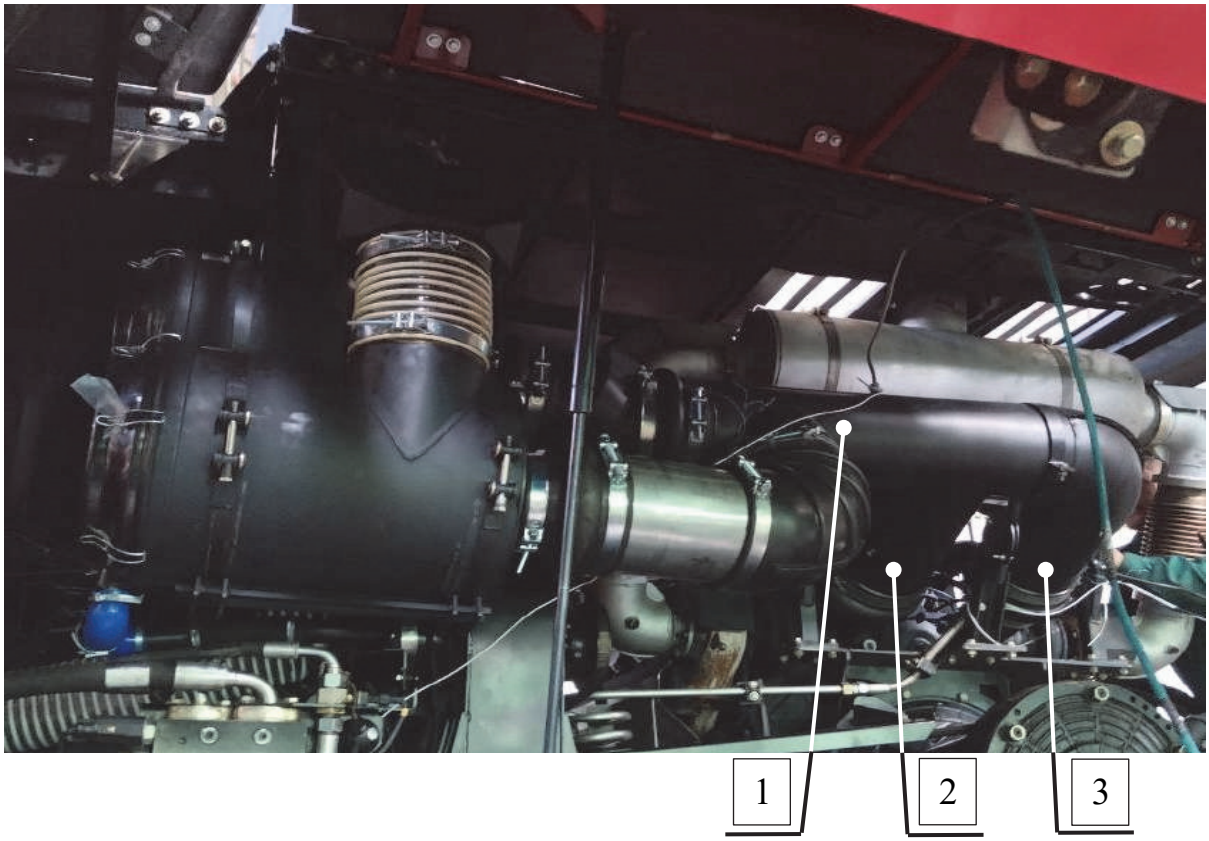


Рис. 7 – Места 1, 2, 3, измерения разрежения воздуха питания двигателя в установкой сдвоенных фильтров

Заключение.

В связи с эффективностью данного технического решения оно будет реализовываться на кормоуборочных комбайнах производства ОАО “Гомсельмаш”.

Результатами проделанных работ является:

1) снижение начального сопротивления воздушного фильтра;
2) увеличение пылеемкости;
3) увеличение межсервисного интервала.

В настоящие время с техническими службами ОАО “Гомсельмаш” согласовано временное извещение и идет подготовка производства для установки сдвоенных фильтров на FS650 с двигателем Weichai WP17, КНР, а также проработана установка сдвоенных фильтров для FS80-12 с двигателями ЯМЗ-65856 (Stage IIIA) и Weichai WP13

ЛИТЕРАТУРА

1. Протокол №075-25С по тепловому режиму FS650 с двиг. WP17G650E302
2. Комбайн кормоуборочный самоходный FS650 – Инструкция по эксплуатации
3. Двигатели автомобильные ЯМЗ-238БЕ и ЯМЗ-238ДЕ. Технические условия. ТУ 37.319.259-94. Изд-во ОАО «Автодизель», 1994. – 16 с.

УДК 631.354

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОПИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОЛЯ ЖАТКОЙ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

В.С. Ушев, В.А. Дюбин
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В работе представлена методика исследования быстродействия системы автоматического копирования рельефа поля жаткой зерноуборочного комбайна для верификации расчетной модели

Введение: Самоходные уборочные машины предназначены для сбора урожая и его первичной обработки непосредственно в поле. Чтобы процесс уборки был эффективным, с минимальными потерями урожая, крайне важно поддерживать постоянную высоту среза относительно поверхности поля.

Поскольку полевая поверхность неровная, для сохранения заданной высоты среза адаптер машины должен иметь возможность повторять рельеф поля. При этом адаптер перемещается вверх и вниз относительно корпуса уборочной машины, опираясь на землю с помощью своих опорных частей – башмаков, колес или самого режущего бруса.

Однако адаптеры сельскохозяйственных машин довольно тяжелые. Если вся их масса будет передаваться на опорные элементы, это приведет к ряду проблем: увеличению сопротивления движению, чрезмерному уплотнению и разрушению верхнего слоя почвы, попаданию земли в рабочий механизм, а также к потерям урожая или нарушению всего процесса уборки.

Чтобы избежать этого, применяются системы уравновешивания. Они перераспределяют значительную часть веса адаптера на раму машины, снижая нагрузку на опорные элементы до приемлемого уровня. При этом обеспечивается надежный контакт опорных частей с почвой.

Таким образом, главная задача механизма копирования рельефа поля адаптером заключается в поддержании постоянной высоты рабочего органа над поверхностью поля и обеспечении допустимого давления опорных элементов на почву. Это необходимо для непрерывного и качественного выполнения уборочных работ с минимальными потерями урожая [1].

Для копирования рельефа поля, уменьшения нагрузки на опорные башмаки адаптеров и поддержания их постоянного контакта с почвой используются различные системы уравновешивания [2].

В научно-техническом центре ОАО «Гомсельмаш» для расчета нагрузок на опорные башмаки адаптеров применяется математическая модель механизмов подъема и копирования адаптера. Эта модель, используемая уже более 15 лет, основана на векторном анализе механизмов. При расчетах также учитывается существенное влияние гистерезиса (возникающего из-за потерь на трение в гидравлических элементах, таких как уплотнения и местные сопротивления) на характеристики копирования при подъеме и опускании адаптера [3].

Но данные расчеты проводятся в статике, а для динамических расчетов, учитывающих быстродействие системы копирования, требуется применение математической модели в среде Simcenter AMESIM, содержащей набор библиотек с предопределенными компонентами из различных областей: механики, электрики, электроники, гидравлики и др.

Но математическая модель не представляет никакой ценности, если она адекватно не отражает реальность. Поэтому обязательным условием для построения точной и адекватной математической модели является ее проверка и настройка по результатам натурных испытаний, сравнением расчетных и полученных в результате испытаний показателей.

Объект исследования: система автоматического копирования рельефа поля жаткой зерноуборочного комбайна

Предмет исследования: методика испытаний по определению быстродействия системы автоматического копирования рельефа поля жаткой зерноуборочного комбайна для верификации расчетной модели

Цель исследования: создание методики испытаний и проведение исследований быстродействия системы автоматического копирования рельефа поля жаткой зерноуборочного комбайна

Результаты исследования: Для получения показателей, пригодных для верификации расчетной модели, при испытаниях требуется обеспечить стабильность и повторяемость процесса преодоления препятствий, а также иметь возможность изменения времени их преодоления. При проведении натурных испытаний комбайна с жаткой на естественном фоне или на искусственных препятствиях это сделать затруднительно

Для проведения испытаний системы копирования создан стенд, включающий в себя зерноуборочный самоходный комбайн КЗС-1624-1 с жаткой ЖЗУ-9 и систему сбора данных Siemens SCADAS Mobile с генераторами электрических сигналов и многоканальным регистратором. Для имитации преодоления препятствий вместо сигнала от датчиков копирных дуг на бортовой компьютер комбайна поданы сигналы изменения угла с помощью генераторов по заданным алгоритмам. Это позволило провести исследования и оценить быстродействие различных режимов работы системы копирования:

- при имитации проезда по продольным неровностям на вход бортового компьютера с помощью генераторов сигналов вместо сигналов угловых датчиков левой и правой копирных дуг жатки подавался одинаковый сигнал в виде одиночной полусинусоиды или синусоиды с разной амплитудой и частотой;

- при имитации проезда по продольным неровностям на вход бортового компьютера с помощью генераторов сигналов вместо сигналов угловых датчиков левой и правой копирных дуг жатки поочередно подавался сигнал в виде одиночной полусинусоиды или синусоиды с разной амплитудой и частотой;

- также были определены быстродействие подъема и опускания навески и быстродействие поперечного поворота жатки.

При испытаниях помимо сигнала с генератора проведена запись следующих параметров:

- высоты расположения жатки над опорной поверхностью посредством регистрации напряжений на отключенных от бортового компьютера угловых датчиках левой и правой копирных дуг;

- давления в гидроцилиндрах наклонной камеры посредством регистрации напряжения на штатном датчике давления;

- показаний датчика угла наклонной камеры;

- давления в правом и левом гидроцилиндрах поперечного копирования в поршневых и штоковых полостях

- давления в пневмогидроаккумуляторе поперечного копирования;

- управляющих сигналов подъема и опускания наклонной камеры;

- управляющих сигналов выдвижения правого и левого гидроцилиндров поперечного копирования.

Заключение: Предложена методика исследований быстродействия системы автоматического копирования рельефа поля жаткой зерноуборочного комбайна. Полученные по предложенной методике результаты исследований применены для верификации расчетной модели системы автоматического копирования рельефа поля жаткой ЖЗУ-9 зерноуборочного комбайна КЗС-1624-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор механизмов копирования уборочных машин Д.В. Джасов Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш» г. Гомель, Республика Беларусь

2. Математическое моделирование гидромеханической системы копирования кормоуборочного комбайна Д.И. Хропаков, Д.В. Джасов, В.В. Подрез НТЦК ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Беларусь

3. Опыт обеспечения работоспособности системы копирования кормоуборочного комбайна Д. В. Джасов, Ю. В. Чупрынин Научно-

технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь.

УДК 631.3.022

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ ПАРЫ НОЖ-БРУС НА ИХ ИЗНОС

А.А. Дакука
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрена зависимость величины износа рабочей кромки бруса противорежущего от угла его установки в измельчающем аппарате самоходной кормоуборочной техники.

Введение. На развитие животноводства и сельского хозяйства в целом влияют различные составляющие, одной из которых является применение современной сельскохозяйственной техники, в том числе и кормоуборочной. По этой причине ведется постоянная модернизация техники не только с целью повышения уровня надежности, снижения времени для подготовки ее к работе и времени на ее обслуживание, но также и на снижение затрат при замене быстро изнашиваемых деталей, таких как брусья противорежущие, ножи и сменные листы технологического тракта.

Одним из вариантов достижения этих целей является применение новых износостойких материалов. Однако их применение может крайне негативно сказаться на стоимости запасных частей и самой техники. Как следствие, это выразится в повышении стоимости конечного продукта.

Не менее важно совершенствование технологического процесса работы применяемой сельскохозяйственной техники, такой как самоходные кормоуборочные комбайны. И наиболее эффективным изменением будет оптимизация процесса измельчения убираемой массы, как одного из самых энергопотребляемых. Также эти, изменения при положительном эффекте, позволят продлить срок эксплуатации быстроизнашиваемых деталей технологического тракта, что в свою очередь снизит затраты на их приобретение, время на их замену и обслуживание сельскохозяйственного орудия в целом.

Объект исследования: Кормоуборочный комбайн FS80 противорежущим брусом измененной конструкции.

Цель исследования: Определить эффективность изменения угла установки противорежущего бруса относительно ножей измельчающего барабана.

Методология исследования. Проведение сравнительного анализа бруса противорежущего с серийным и измененным углами наклона при его установке.

Кормоуборочный комбайн предназначен для скашивания убираемой культуры, или ее подбора из валков, измельчения и погрузки в кузов

транспортного средства. Самой энергопотребляемой операцией при работе кормоуборочного комбайна является процесс измельчения убираемой массы. Измельчение происходит при помощи режущей пары: нож и брус противорежущий. И для получения качественного корма необходимо особое внимание уделить состоянию рабочих кромок и их взаимному расположению.

Первое на что стоит обратить внимание – это зазор между ножом и брусом. При значительном зазоре перерезаемый слой материала по линии действия лезвия не имеет опоры и таким образом имеет место резание с изгибом стеблей. Отогнутая часть стебля заклинивается в зазоре между ножом и брусом, требуя дополнительных усилий на преодоление трения. Кроме этого тонкие стебли склонные к изгибу при наличии большого зазора протаскиваются в зазор и измельчаются со значительным увеличением длины резки [1]. По итогу получаем такие негативные моменты как повышенный расход топлива, более низкая скорость уборки, повышенная вероятность забивания технологического тракта, более интенсивный износ рабочих кромок ножа и бруса противорежущего. Обеспечение минимального зазора, который для комбайна FS80 составляет от 0,3 до 0,8 мм, регулируется при помощи системы подвода противорежущего бруса (см. рисунок 1). Данная система представляет собой шарнирно закрепленный на раме подбрусник с установленным брусом противорежущим. К подбруснику жестко закреплен рычаг. Через верхнюю часть которого проходит винт. Вращение винта обеспечивает плавное движение всей системы относительно оси вращения подбрусника и, следовательно, регулировку зазора между ножами, установленными на барабане, и брусом противорежущим.

Измельчающий барабан представляет собой цилиндр с приваренными опорами. На этих опорах установлены ножи, которые зафиксированы прижимами, обеспечивающими фиксированное положение каждого ножа и предотвращающее их смещение в процессе работы. (см. рисунок 2). На ножах имеется износостойкий слой, который предотвращает его моментальный износ и обеспечивает остроту лезвия на протяжении долгого времени.

Для поддержания лезвия ножей в работоспособном состоянии и восстановления их первоначальной остроты на измельчающем аппарате установлено автоматическое заточное устройство, представляющее собой цилиндрический абразивный брусок, совершающий обратно поступательные движения вдоль направляющей и приводимый в движение гидромотором. По мере движения абразивного бруска происходит заточка каждого ножа на вращающемся барабане.

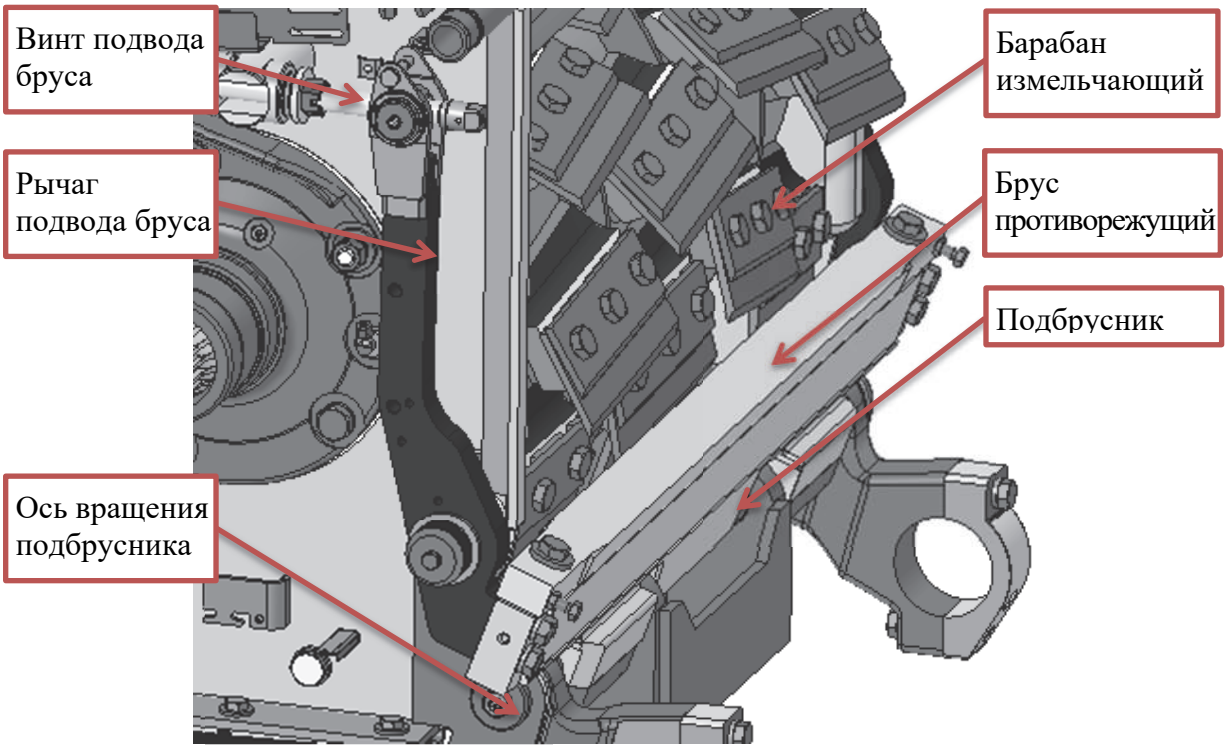


Рис.1– Общий вид системы подвода противорежущего бруса

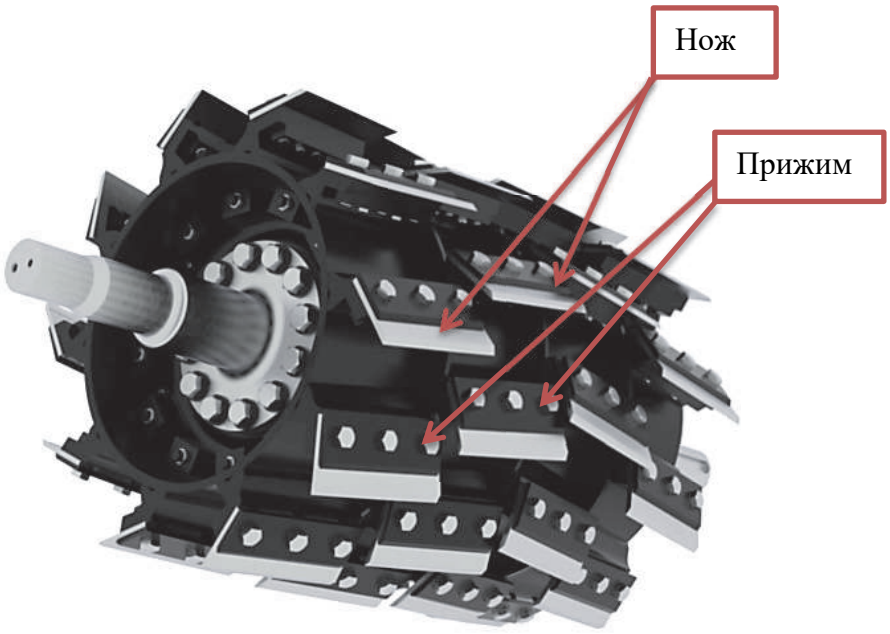


Рис. 2 – Измельчающий барабан

Выставление минимального зазора между ножом и брусом, а также обеспечение необходимой остроты лезвия ножей являются важными составляющими при получении качественного корма с минимальными трудо- и энергозатратами. Однако не менее важно уделить внимание и состоянию рабочей кромки бруса противорежущего. Данная кромка, также

как и лезвия ножей, подвержена износу. Однако как было сказано ранее, ножи подвергаются периодической заточке, что позволяет их использовать с минимальным радиусом затупления, до момента их полного износа.

Противорежущий брус в сечении представляет собой равнобедренную трапецию, в острых углах которой имеется износостойкий слой, предотвращающий его моментальный износ. Симметричная конструкция бруса противорежущего (см. рисунок 3) в продольном и поперечном сечении позволяет после износа первой рабочей кромки развернуть брус второй рабочей кромкой в сторону измельчающего барабана.

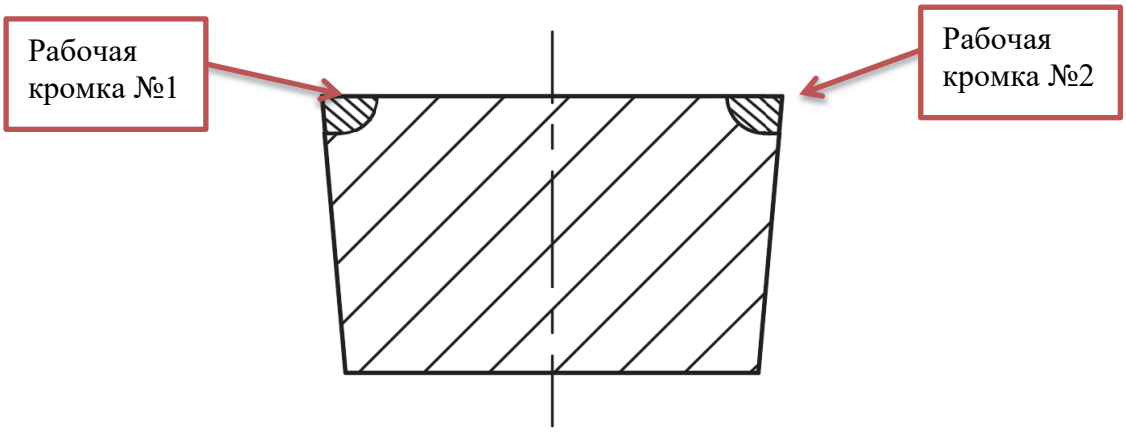


Рис. 3 – Сечение бруса противорежущего

Однако после износа обеих рабочих кромок использование бруса недопустимо т.к. это приведет к ухудшению качества измельчения и значительному увеличению энергоресурсов на выполнение операции измельчения.

По причине того, что брус противорежущий невозможно заточить как нож и, тем самым, восстановить рабочую кромку, то для увеличения ресурса использования были проведены опытные работы по определению влияния его расположения относительно ножей на его износ.

В серийной конструкции измельчающего аппарата комбайна FS80 угол установки бруса противорежущего по отношению к новым ножам составляет 79°. (см. рисунок 4) По мере подвода бруса противорежущего из-за износа ножей и уменьшения диаметра барабана этот угол уменьшается на 6°.

Целью эксперимента было определить влияние измененного угла установки противорежущего бруса.

Для этого была разработана конструкция заготовки бруса противорежущего с измененным углом наклона плоскости бруса к ножам. Для чистоты эксперимента и обеспечения одинаковой наработки в одинаковых условиях конструкция заготовки опытного бруса была разработана таким образом, чтобы левая половина повторяла форму

серийного бруса, а правая была повернута на угол 11° к плоскости относительно серийного расположения (см. рисунок 5). Таким образом, было достигнуто взаимное расположение режущей пары нож-брус равное 90°.

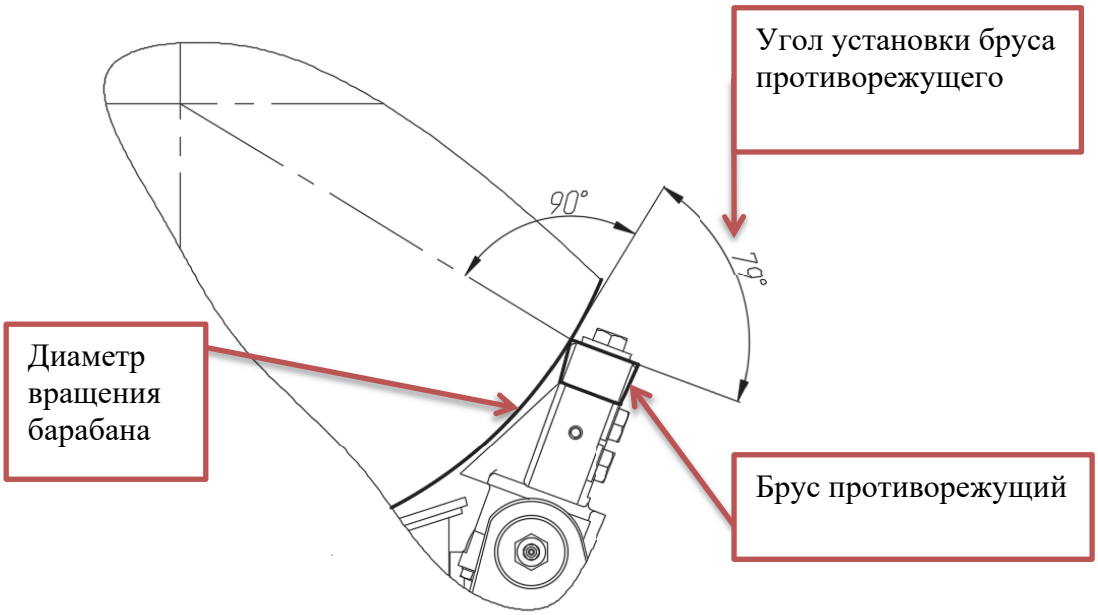


Рис. 4 – Угол установки противорежущего бруса

Рис. 5 – Опытный противорежущий брус

С целью ускоренного получения результатов опытных работ для увеличения интенсивности износа рабочей кромки опытный образец был

изготовлен из стали 40Х ГОСТ 4543-2016 без выполнения термообработки и без нанесения износостойкого слоя.

Для проведения испытаний данная заготовка была установлена на комбайн FS80. Был установлен зазор 0,3 мм между ножами и кромкой опытного бруса.

За время испытаний опытная конструкция бруса противорежущего набрала 1340 тонн. Из них на кошении трав 625,1 тонн и 714,9 тонн на подборе подвяленных трав из валков. Внешний вид опытного бруса представлен на рисунке 6. Зависимость износа рабочей кромки от наработки представлена в таблице 1.

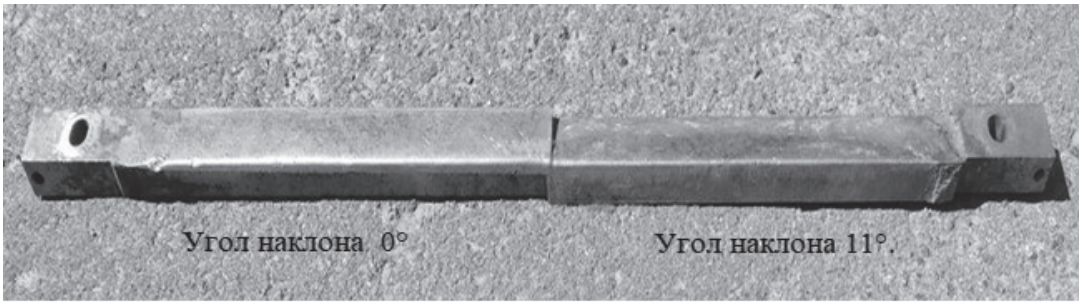


Рис. 6 – Опытный брус после окончания испытаний

Таблица 1 Зависимость износа от наработки

Наработка, тонн (вид работ)	Радиус затупления, мм	
	Серийная кромка	Опытная кромка
0 (Установили опытный брус)	0,05	0,05
136,9(кошение)	0,13	0,1
378,1(кошение)	0,25	0,2
568,6(кошение)	0,8	0,7
940,4 из них: 625,1 (кошение); 315,3 (подбор)	2,7	1,5
1340 из них: 625,1 (кошение); 714,9 (подбор)	6,0	3,5

Как видно из таблицы 1 динамика затупления кромки с серийным углом расположения выше, чем опытной. Также из представленных данных можно сделать вывод, что чем больше фактический радиус затупления рабочей кромки – тем быстрее растет интенсивность износа.

По полученной динамике износа можно предположить, что данные изменения позволят продлить срок эксплуатации противорежущего бруса.

Это снизит затраты, связанные с обслуживанием кормоуборочного комбайна.

По итогам анализа импортной кормоуборочной техники таких фирм как CLAAS JOHN DEERE было определено, что расположение бруса противорежущего относительно ножей на различных моделях разных годов выпуска варьируется от 75° до 90°

Выводы. Таким образом, по итоговым данным, полученным на основе опытных работ, можно сделать вывод, что конструкция опытного противорежущего бруса с измененным углом расположения режущей пары нож-брус показала себя более эффективно по сравнению с серийной конструкцией. Однако по причине того, что опытные работы проводились в упрощенном порядке необходимо проведение дальнейших исследований с измененным углом расположения бруса противорежущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Резник, Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н.Е. Резник. – М.: «Машиностроение», 1975. – 125 с.

УДК 658.512.2

ЭРГОНОМИЧЕСКАЯ И ЭСТЕТИЧЕСКАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ УНИФИЦИРОВАННОЙ КАБИНЫ

А.В. Третинников, А.М. Никитин
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

Статья рассматривает улучшение эргономики рабочего места оператора и его изменение при модернизации унифицированной кабины. В сравнении с предыдущим поколением кабин, требования и ожидания пользователей сегодня существенно изменились, что требует от производителей адаптации к современным стандартам. Модернизация кабины направлена на улучшение эргономики, функциональности и дизайна, что, в свою очередь, повысит его конкурентоспособность на рынке. Рассматриваются ключевые аспекты, такие как улучшение условий работы оператора и обслуживания систем кабины. В результате предложенные изменения позволят не только удовлетворить текущие потребности пользователей, но и значительно повысить привлекательность машин и их эргономические характеристики, способствуя улучшению эффективности труда механизаторов.

Введение. Цивилизация всегда двигалась вперёд благодаря инструментам – орудиям труда, которые человек создавал и совершенствовал. От каменного серпа до умного комбайна – эволюция инструмента была направлена на то, чтобы высвободить силы человека и направить их на решение более сложных задач. Двенадцать и более часов в сутки – именно столько времени проводит оператор-комбайнёр за штурвалом в период уборочной страды. Длительные смены, вибрация, шум и необходимость постоянной концентрации внимания приводят к колоссальным физическим и психологическим нагрузкам. Усталый оператор – это не только риски для безопасности, но и прямая угроза производительности и качеству уборки урожая. Таким образом, задача модернизации кабины перестаёт быть вопросом простого удобства и становится ключевым фактором экономической эффективности агробизнеса. А в условиях растущей конкуренции на рынке сельскохозяйственной техники, производители находятся в постоянном поиске решений, которые повышают привлекательность их продукции. Однако ключевой точкой роста становится не только мощность или экономичность машины, но и условия труда оператора – фактор, напрямую влияющий на производительность и качество работы. Комбайн, как главный труженик жатвы, требует кабины, которая превращает изнурительный труд

в высокотехнологичный и комфортный процесс. Данная статья подробно рассматривает комплексный подход к модернизации кабины комбайна, предлагая конкретные инженерные решения, направленные на повышение эффективности оператора и, как следствие, обще рентабельности сельхозпредприятия.

Объект исследования. Унифицированная кабина.

Цель исследования. Эргономические и эстетические исследования унифицированной кабины.

Методология исследований. Сравнительный анализ.

Результаты исследований

В современном мире тенденции в дизайне и технологиях неумолимо сменяют одну за другой. Это движение не просто каприз моды, а отражение фундаментальной человеческой потребности в совершенствовании среды своего обитания. Предметы быта и профессиональная техника постоянно подвергаются глубоким техническим, эргономическим и эстетическим метаморфозам. Эти преобразования не просто дань новизне - они дарят нам ощущение прогресса, повышают эффективность труда и личную мотивацию, порождая новые стремления и открывая ранее недоступные возможности.

Труд комбайнёра – это символ самоотверженности, а работать им - значит просыпаться с первыми лучами солнца и трудиться пока солнце не опуститься за горизонт. Здесь, механизатор проводит практически всё своё время в ограниченном пространстве кабины своей машины. Это рабочее место становится его вторым домом на период жатвы. И так же как человек нуждается в комфорте и уюте в своём быту, кабина комбайна остро нуждается в циклическом обновлении и улучшении, чтобы соответствовать растущим требованиям к производительности, безопасности и комфорту.

Рис. 1 – Общий вид кабины UNI CAB II

Рис. 2 – Общий вид кабины UNI CAB II

Наше предложение по модернизации представляет собой не набор разрозненных усовершенствований, а целостную стратегию, направленную на современное преображение рабочего пространства оператора. Мы предлагаем более функциональное улучшение кабины, что позволит соответствовать ожиданиям современного рынка и самого взыскательного потребителя. Улучшив эргономику рабочего места и обновляя элементы интерьера и экстерьера, можно усилить привлекательность машины и привлечь большее число покупателей. Улучшение условий работы механизатора, добавление новых функций сделают кабину более эргономичной для потребителей, которые ищут комфортные и эффективные решения для своих нужд [1]

.

Рис. 3 – Интерьер кабины UNI CAB II

Для оптимизации рабочего места оператора предлагается ряд модернизаций, которые существенно улучшают уровень комфорта. Первым шагом является исключение рычага КПП. Это решение преследует две главные цели:

- Увеличения свободного пространства в кабине, что снижает ощущение тесноты и усталости.[2]
- Повышение эргономических качеств осуществляется за счёт переключения передач при помощи кнопок, интегрированных в навесной пульт управления. Это оптимизирует движения руки и повышает скорость реакции. Данная технология уже зарекомендовала себя на других типах машин, а наша задача – её бесшовная интеграция, оптимальная унификация и адаптация для достижения максимальной эргономичности.

Эргономика рабочего места определяется не отсутствием лишнего, но продуманным расположением необходимого. Внедрение навесного пульта управления (рис. 4) кардинально меняет организацию рабочего места:

- Оптимизация эргономики и доступности: все ключевые органы управления выводятся в зону лёгкой досягаемости, что ускоряет работу с ними.[2]
- Высвобождение полезного пространства: компактное и функциональные размещение пульта открывает доступ ко второй двери и позволяет рациональнее использовать объём кабины [1].
- Дополнительные возможности появившегося пространства предлагают нам оборудовать дополнительными местами для хранения, повышая практичность интерьера.

Рис. 4 – Пульт интегрированный в подлокотник

Установка новой двухосевой рулевой колонки (рис.5). Данное усовершенствование направлено на:

- Индивидуальную настройку: оператор может гибко регулировать положение под свои антропометрические данные, что

критически важно для снижения утомляемости в течение длительного рабочего дня [2].

- Улучшение обзорности: оптимальная настройка положения руля и узкий корпус колонки позволяет улучшить видимость вокруг машины, напрямую влияя на безопасность и точность работы.
- Экономическую эффективность: несмотря на высокую первоначальную стоимость изготовления, унификация этой колонки для новой и серийных кабин позволит снизить общие затраты и срок окупаемости.

Рис. 5 – Двухосевая колонка

Интеграция систем хранения в интерьер кабины. Мы предлагаем современный подход к использованию пространства, превращая «мёртвые» зоны в многофункциональные.

- Встроенный охлаждающий бокс, расположенный в нижнем поясе интерьера под креслом помощника, что позволяет механизатору хранить продукты и напитки в прохладе на протяжении всего рабочего дня, обеспечивая комфорт и экономию времени. При необходимости контейнер легко выдвигается на направляющих (рис. 6).

Рис. 6 – Термобокс

• Дополнительный лоток для хранения под креслом помощника механизатора предназначен для мелочей, документов, инструментов или личных вещей. Это решение наглядно демонстрирует наш принцип: каждое негативное пространство должно быть преобразовано в полезное (рис. 7) [3].

Рис. 7 – Место хранения под креслом помощником

Рис. 8 – Крыша кабины UNI CAB II

Несмотря на кажущуюся второстепенность, обновление дизайна крыши кабины UNI CAB II является важным элементом комплексной модернизации, решающим несколько практических и маркетинговых задач:

- Улучшен доступ к фильтрам кондиционера, предусмотрена установка новых рабочих фар, видеокамер и антенн GPS-систем. возможна установка транспортных фар.
- Новая, стилистически проработанная крыша завершает общий обновленный экстерьер, гармоничный и современный образ. Это укрепляет идентичность бренда и повышает субъективную воспринимаемую ценность техники.

Таким образом, её роль выходит за рамки простого «изменения дизайна».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уровень требований к комфорту, технологичности и безопасности сельхозтехники неуклонно растёт. Производители, которые стремятся лидировать на рынке, должны не просто следить за этой эволюцией, но и активно формировать её, анализируя желания потребителя. Предложенный комплекс модернизаций – это не просто набор отдельных улучшений, а

целостная стратегия по созданию современного, эргономичного и высокотехнологичного рабочего места комбайнёра.

Улучшая условия труда механизатора, мы инвестируем в самое главное: эффективность, лояльность и благополучие. В конечном счёте, именно это определяет престиж бренда, привлекательность машины для покупателей и, как следствие, успех и рентабельность всего аграрного предприятия в условиях жёсткой конкуренции. Техника будущего начинается с сегодняшнего дня.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Ф. Макарова. Методические основы проведения эргономической оценки промышленных образцов. – М., 1992, 29 с.

2. Б.А. Повлоцкий, Р.В. Федосов. Методические рекомендации по эргономике для конструкторов и художников-конструкторов и сельскохозяйственных машин – М., 1975, 172 с.

3. Н.Л. Гомон, Т.К Кашкина, Л.А. Томилова, С.И. Чегодаева. Эргономика в машиностроении – М., 1968. – 92 с.

УДК 629.02:631.3: 697.3:62-714

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОВОРОТА ВАЛА КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПАНЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ И ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ТЕРМИНАЛА

И.И. Уздовский, А.В. Лашкевич, С.В. Семенов
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В работе представлена модернизация системы управления доворота вала коробки передач комбайна с использованием программных возможностей панели управления, вместо применения дополнительного настраиваемого реле времени, а также обеспечено управление регулировкой времени работы системы доворота вала с места оператора через терминал. Авторами проведен анализ электрических цепей, согласованы вопросы изменения программного обеспечения панели управления и терминала, приведены полученные результаты модернизации.

Введение. В рамках постоянной конкуренции при производстве сельскохозяйственных машин, происходит внедрение нового функционала, дополнительных опций, позволяющих расширить возможности техники и обеспечить удобство управления механизатором, что влечет за собой изменение и усложнение их конструкции, и систем управления. Моноблочные панели управления, применяемые в конструкции выпускаемых ОАО “Гомсельмаш” машин, обладают значительным потенциалом для реализации необходимого функционала, который еще не в полной мере изучен.

Продолжая изучение функциональных возможностей моноблочных панелей управления, постепенно приходит осознанная необходимость перехода от “физического” управления рабочими органами и системами комбайна (нажатие кнопки – включение функции), к логическому управлению и визуальному отображению происходящего процесса управления, повышение гибкости при управлении (введение дополнительных регулировок и настроек).

Использующийся функционал панелей управления, как например, контроль обрыва цепей и обработки электрических сигналов, в настоящее время может быть значительно расширен путем изменения программного обеспечения, более широкого использования CAN-шины и протокола обмена данными.

Это позволяет не только повысить уровень автоматизации и точности управления, но и обеспечить более эффективное диагностирование и профилактическое обслуживание техники.

Проведя анализ системы управления коробки передач, было предложено вместо использования реле времени [1], управление системой доворота вала коробки передач производить с помощью программного обеспечения моноблочной панели управления [2], с возможностью регулировки времени системы доворота вала и отображением информации через сенсорный графический терминал [3], используя протокол обмена данными CAN-шины между панелью и терминалом.

Объект исследования. Электрооборудование системы управления доворота вала коробки передач.

Цель исследования. Уменьшение количества узлов электрооборудования и упрощение электрической схемы комбайна, повышение надежности системы управления, осуществление контроля в цепях управления исполнительными элементами, снижение себестоимости изготовления машин.

Методология исследований. Теоретический, системный и сравнительный анализ, моделирование и проектирование

Результаты исследований

Электрическая система управления доворота вала состоит из следующих узлов электрооборудования:

1. Датчика блокировки диапазонов коробки передач [5], формирующего сигнал о разрешении включения системы доворота вала при нажатии механизатором на педаль блокировки коробки передач;
2. Реле времени, формирующего сигнал включения/выключения электромагнитов через заданный отрезок времени (выставляемый вручную на самом реле);
3. Электромагнитов, непосредственно управляющих гидравлическими распределителями изменяющими направление вращения гидромотора доворота вала (по часовой стрелке и против часовой стрелки).

Принцип работы системы электрооборудования управления доворота вала представляет следующее: при нажатии на педаль и замыкании датчика блокировки диапазонов коробки передач, реле времени получает сигнал и поочередно, с установленным отрезком времени включает электромагниты управления направлением вращения гидромотора, поворачивая вперед/назад валы коробки передач, тем самым облегчая вхождение в зацепление шестерней коробки передач.

Недостатками данной системы управления является наличие дополнительного элемента в виде реле, сложность настройки реле в соответствии с методикой изложенной в паспорте реле, отсутствие обратной связи и возможности контроля целостности электрических цепей.

С целью исключения имеющихся недостатков действующей системы, предложено решение по оптимизации электрической схемы и использованию возможностей моноблочной панели управления с доработкой программного обеспечения, а также проработано решение о выводе информации об установленных настройках в удобной форме при помощи сенсорного графического терминала и добавлена возможность изменения настроек времени.

Согласно предложенному решению из схемы исключаются реле времени и провода его подключения в электрошкафу (общая электрическая схема работы системы приведена в приложении 2), электрические цепи датчика блокировки диапазонов и электромагнитов управления гидромотором подключаются напрямую к пульту управления, изменяется программное обеспечение пульта управления и графического терминала.

Принцип работы модернизированной системы электрооборудования управления доворота вала представляет следующее: на сенсорном графическом терминале в отдельной вкладке устанавливаются два временных отрезка, продолжительность включения электромагнита и временная пауза, через которую происходит переключение электромагнитов (регулировка в графическом терминале приведена в приложении 1), заданные параметры от сенсорного графического терминала по CAN-шине передаются на моноблочную панель управления и программно отслеживаются, далее при нажатии на педаль блокировки коробки передач, сигнал датчика блокировки диапазонов коробки передач обрабатывается моноблочной панелью управления, после чего подается сигнал от панели на включение электромагнитов управления гидромотором согласно заданным параметрам и заложенному в программе алгоритму, также программно отслеживается целостность цепей электромагнитов управления гидромотором с выдачей предупреждающего сигнала в случае неисправности.

По представленной системе управления доворота вала интегрированной с графическим терминалом направлена заявка на выдачу патента на изобретение, также в настоящее время система частично применяется в составе кормоуборочного комбайна FS80, производится доработка программного обеспечения графического терминала и в 2026г. система будет проходить испытания в составе опытных машин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизированная система позволяет просто и точно регулировать временной диапазон с места механизатора, что важно для эффективной работы комбайна, улучшает эргономичность, и повышает технический уровень техники ОАО «Гомсельмаш».

Исключены дополнительные элементы (провода и реле) и упрощена электрическая схема, что позволит снизить себестоимость изготавливаемой техники и повысить ее конкурентоспособность.

Обеспечен контроль целостности электрических цепей датчика и электромагнитов, сигнализируя о дефектах звуковым сигналом и кодом ошибки на окне индикации, что повышает надежность системы вцелом, улучшает диагностику и сокращает время на поиск неисправных цепей [4].

Функция установки параметров времени, и паузы на сенсорном графическом терминале находится под цифровым паролём, ограничивая доступ не квалифицированных специалистов.

Разработанная система также предусматривает возможность автоматической калибровки и настройки параметров в зависимости от условий эксплуатации, что обеспечивает более точное и стабильное функционирование. Внедрение современных методов шифрования и защиты данных гарантирует безопасность передачи информации и предотвращает несанкционированный доступ к настройкам системы. Кроме того, расширенные возможности мониторинга позволяют вести журнал событий и сохранять историю ошибок, что значительно облегчает техническое обслуживание и профилактику. В целом, модернизированная система способствует повышению эффективности работы комбайна, снижению затрат на обслуживание и увеличению срока службы оборудования, что соответствует стратегическим целям ОАО «Гомсельмаш» по развитию инновационных решений в сельскохозяйственной технике.

ЛИТЕРАТУРА

1. СООО «Евроавтоматика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://fif.by/. – Дата доступа: 10.05.2025.

2. ООО «НПК «Контакт» - пленочные, мембранные клавиатуры, промышленные клавиатуры, панели и пульты управления, контрактная разработка и производство электроники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://swpanels.by/. – Дата доступа: 10.05.2025.

3. ATI – Производство электроники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://npf-ati.ru/. – Дата доступа: 16.07.2024.

4. Кравченко, П. И. Краткий справочник автоэлектрика по определению и устранению неисправностей в системах электрооборудования тракторов, комбайнов и автомобилей / П. И. Кравченко. – Минск, 1967. – 141 с.

5. ПАО «Лысковский электротехнический завод» – производство сигналов и тросов ручного тормоза [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.letz.ru/. – Дата доступа: 10.05.2025.

СЕКЦИЯ № 2

«МОБИЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ТРАКТОРЫ, ПРИЦЕПНЫЕ И НАВЕСНЫЕ АГРЕГАТЫ»

УДК 631.3

О ВЛИЯНИИ РАБОТЫ ФРИКЦИОНОВ КПП ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГОСРЕДСТВ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ ТРАНСМИССИИ

С.И. Кирилюк, И.А. Куда
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Объектом исследований являлась коробка передач с гидроподжимными муфтами. Конструкция коробки передач. Коробка передач (трактора «Беларус-3522») рисунок 1, 24F + 12R с переключением передач под нагрузкой (типа «POWER SHIFT») обеспечивает 24 передачи переднего хода и 12 передач заднего хода, привод независимого заднего ВОМ и переднего ведущего моста. Переключение диапазонов производится путем перемещения зубчатых муфт, расположенных в диапазонном редукторе с использованием муфты сцепления, а переключение передачи – с помощью электрогидроуправляемых фрикционных муфт, размещенных в корпусе сцепления. Коробка передач состоит из узла переключения передач, смонтированного в корпусе сцепления, и диапазонного редуктора, корпус которого расположен между корпусом сцепления и задним мостом.

Рис. 1 – Трактор Беларус 3522

Сдвоенная и одинарная гидроподжимные фрикционные муфты предназначены для переключения передач под нагрузкой без использования

муфты сцепления. Барабан (рис. 2) сдвоенной гидроподжимной фрикционной муфты внутренними шлицами жестко связан с валами четных и нечетных передач КП. В расточках барабана образованы рабочие цилиндры, в которых установлены два поршня, уплотняемые чугунными разрезными кольцами. В гнездах каждого из поршней установлено по шестнадцать отжимных пружин, предварительно сжатых опорным диском, зафиксированным на ступице барабана стопорным кольцом. В поршнях имеется по два центробежных шариковых клапана сброса давления рабочей жидкости из рабочих полостей цилиндров после отсоединения цилиндров от нагнетательной магистрали управления коробкой передач. На наружной части барабана профрезеровано восемь пазов, в которые входят выступы стальных ведущих дисков. Между ведущими находятся ведомые диски с металлокерамическими накладками и внутренними шлицами, которыми они соединяются со шлицевыми венцами шестерен нечетных и четных передач (рис. 3). Пакет из восьми фрикционных (рис. 3) и семи стальных дисков замыкается опорными дисками, фиксируемыми стопорными кольцами.

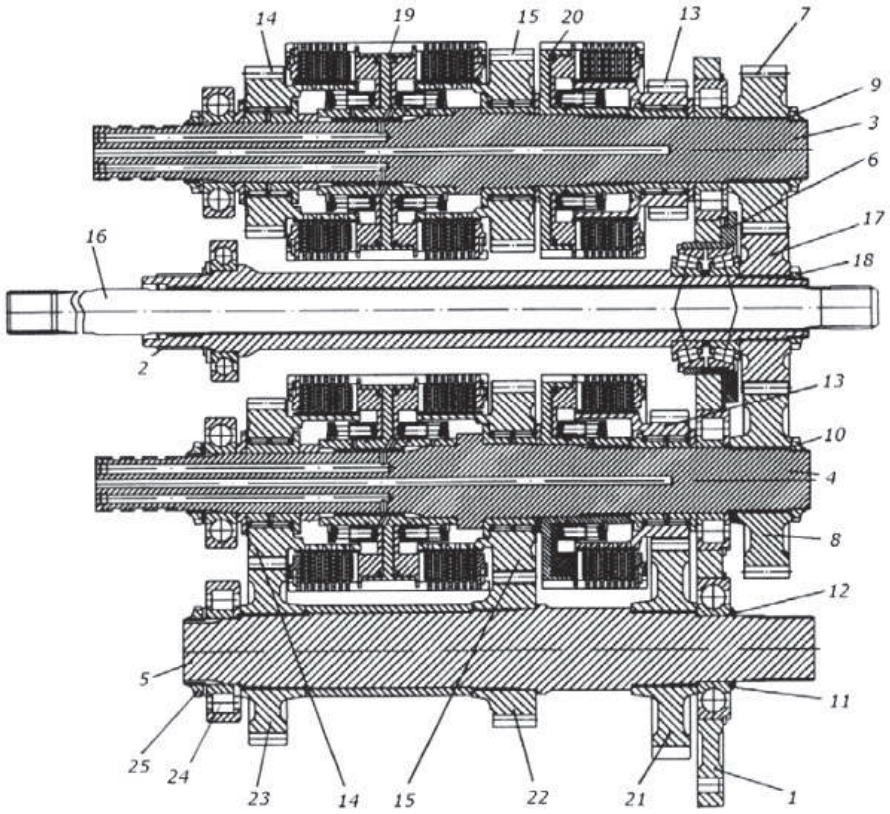


Рис. 2 – Узел переключения передач: 1 – плита; 2 – вал входной; 3 – вал четных передач (2 → 4 → 6); 4 – вал нечетных передач (1 → 3 → 5); 5 – вал входной; 6 – стакан; 7, 8 – шестерни ведомые; 9, 10 – гайки; 11 – шайба; 12 – стопорное кольцо; 13, 14, 15 – шестерни передач; 16 – вал отбора мощности; 17 – шестерня ведущая; 18, 25 – гайка; 19 – сдвоенная гидроподжимная муфта; 20 – фрикционная одинарная гидроподжимная муфта; 21, 22, 23 – шестерня; 24 – роликоподшипник

Переключение передач в КП осуществляется посредством многодисковых фрикционов Рис. 3. Включение фрикциона производится подачей рабочей жидкости в его гидроцилиндр, осуществляющий сжатие фрикционных дисков для получения необходимого момента трения. Команды на переключение передач формирует комплексная электронная система управления трансмиссией КЭСУ, а непосредственно реализуют их электрогидрораспределители переключения передач (ЭГРПП).

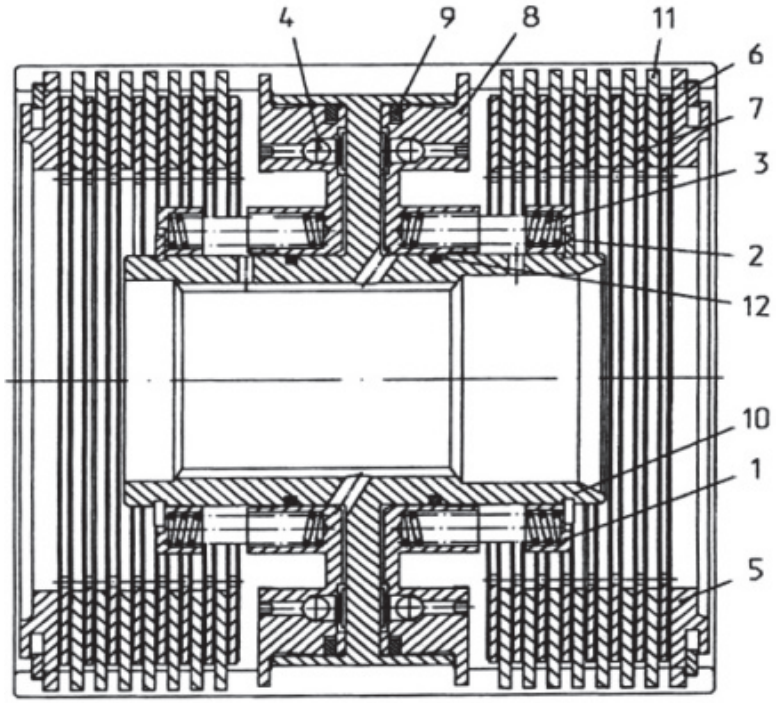


Рис. 3 – Сдвоенная гидроподжимная муфта коробки передач трактора 1 – опорный диск; 2 – стопорное кольцо; 3 – пружина отжимная; 4 – центробежный шариковый клапан сброса давления; 5 – опорный диск; 6 – стопорное кольцо; 7 – ведомые диски (металлокерамические); 8 – поршень; 9 – кольцо уплотнительное; 10 – барабан; 11 – ведущие диски (стальные); 12 – кольцо уплотнительное

Для отечественных тракторов широко используется пара трения «металлокерамика МК5 – сталь 65Г». Однако она имеет существенный недостаток, заключающийся в значительной зависимости коэффициента трения от скорости скольжения фрикционных дисков в процессе буксования фрикциона. Коэффициент трения этой можно определить по формуле [1], $\mu = \mu_0 + (\mu_к - \mu_0)\exp(-k_e|\nu_{СК}|)$

где μ_0 и $\mu_к$ μ начальное и конечное значения коэффициента трения фрикционных дисков в процессе буксования фрикциона; $\nu_{СК}$ – скорость относительного скольжения фрикционных дисков включаемого фрикциона, м/с; k_e – коэффициент экспоненты. Значения μ_0 и $\mu_к$ находятся в пределах:

$\mu_0 = 0{,}05\ldots0{,}06$, $\mu_к = 0{,}10\ldots0{,}12$ а коэффициент экспоненты $k_е = 0{,}225$. На рис. 2 показан график зависимости коэффициента трения μ от скорости скольжения дисков $v_{СК}$. При этом приняты следующие значения параметров: $\mu_0 = 0{,}06$, $\mu_к = 0{,}10$.

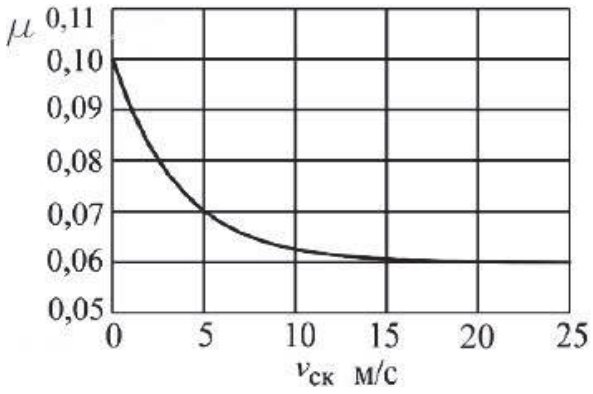


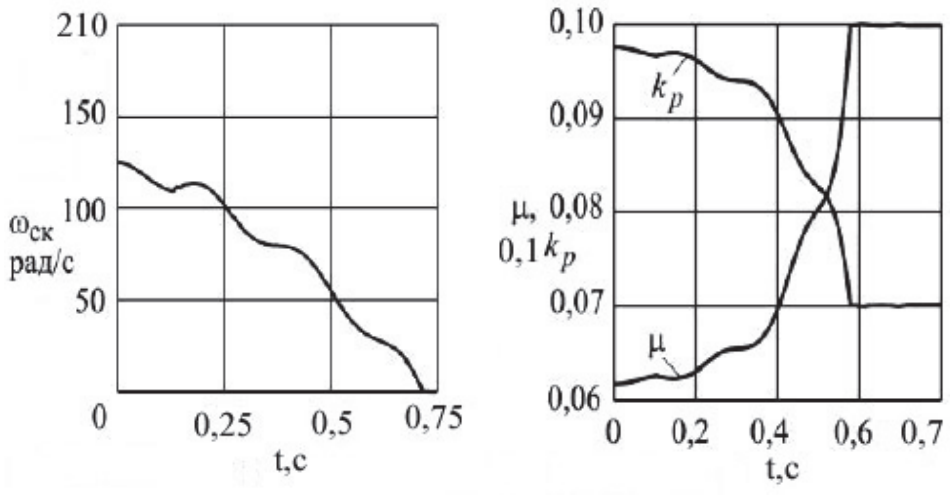
Рис. 4 – Зависимость коэффициента трения фрикционных дисков от скорости их относительного скольжения

Скорость скольжения $v_{СК}$ зависит от радиальных размеров дисков и от относительной угловой скорости их вращения: $v_{СК} = r_э\omega_{ск} = r_э\left(\omega_{вдщ} - \omega_{вдм}\right)$, где $r_э$ – радиус действия эквивалентной суммарной силы трения на поверхности и фрикционных дисков, м; $\omega_{вдщ}$ и $\omega_{вдм}$ угловые скорости вращения ведущих и ведомых дисков включаемого фрикциона соответственно рад/с. Для пары трения [1] $r_э = {(R+r)}/{2}$, где R и r – наружный и внутренний радиусы поверхности трения фрикционных дисков соответственно. Изменение коэффициента трения в процессе переключения передачи сопровождается соответствующим изменением момента трения на фрикционе $M_ф$, величина которого к моменту завершения буксования резко возрастает, что приводит к большим динамическим нагрузкам в трансмиссии энергосредства. Момент трения фрикциона, как известно [1], вычисляется по формуле $M_ф = \mu F_{сж} r_э z$, где $F_{сж}$ – усилие сжатия фрикционных дисков, Н; z – количество пар трения фрикциона. Значение $F_{сж}$ определяется давлением рабочей жидкости $p_{гц}$,Па, подаваемой в гидроцилиндр включаемого фрикциона, и площадью рабочей поверхности поршня $A_п$, м^2, по формуле $F_{сж} = A_п \cdot p_{гц}$. Значение $p_{гц}$ подставляется в эту формулу за вычетом давления $p_{вп}$, необходимого для компенсации усилия возвратных пружин поршня гидроцилиндра.

Формирование характеристики давления, используемого в процессе включения каждого фрикциона, осуществляется посредством электрогидрораспределителя согласно программе. Для компенсации отмеченного недостатка, обусловленного зависимостью коэффициента

трения фрикционных от скорости их относительного скольжения $v_{СК}$, предложена модель корректирования характеристики давления $p_{кл}(t)$. Необходимо ввести корректор давления, снижающий давление $p_{гц}(t)$ [1], подаваемое в гидроцилиндр фрикциона в заключительной фазе его буксования. Характеристика корректора давления описывается выражением $k_p = 1 - k_\omega \exp\left(-k_{ep}|\omega_{ск}|\right)$, где k_p – коэффициент коррекции давления; k_ω – максимальная величина снижения коэффициента k_p в момент замыкания фрикциона, т. е. при $\omega_{ск} = 0$; k_{ep} – коэффициент экспоненты. Характеристика давления рабочей жидкости $p_{гц}(t)$, подаваемой в гидроцилиндр фрикциона в процессе его включения, соответствует выражению $p_{гц}(t) = k_p(t) p_{кл}(t)$.

На рис. 3 приведены примеры графиков, отображающих изменение параметров характеристик управления включением фрикциона КП.



а) б)

Рис. 5 – Графики изменения в процессе буксования фрикциона относительной скорости скольжения фрикционных дисков $\omega_{ск}$ (а), коэффициента трения μ коэффициента коррекции давления k_p при кусочно-линейной характеристике управления фрикционом

Из рис. 5, в видно, что в заключительной фазе включения, когда коэффициент трения μ резко возрастает, система управления фрикционом понижает давление $p_{гц}(t)$. Это дает возможность получить более плавное изменение момента трения фрикциона $M_ф(t)$. В результате повышаются показатели качества переходных процессов при переключении передач: снижаются динамические нагрузки в трансмиссии, повышается плавность хода трактора и ресурс работы фрикционных дисков, но увеличивается время проскальзывания фрикциона, а, следовательно, большего количества

выделение тепла. После замыкания фрикциона управление давлением $p_{гц}$ прекращается и его значение поднимается до номинального уровня $p_{ном}$. Из выражений видно, что основными аргументом изменения характеристик управления фрикционом в процессе его включения является относительная скорость скольжения фрикционных $\omega_{ск}$ дисков рад/с. и $t_{ср}$ – время срабатывания фрикциона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасик, В. П. Алгоритм управления фрикционами автоматической планетарной коробки передач / В. П. Тарасик, О. В. Пузанова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 3 (72). – С. 59–68.

УДК 621.8

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МНОГОДИСКОВЫХ ФРИКЦИОНОВ КОРОБКИ ПЕРЕМЕНЫ ПЕРЕДАЧ МОБИЛЬНОГО ЭНЕРГОСРЕДСТВА

С.И. Кирилюк, М.Ю. Целуев
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Применение многодисковых маслоохлаждаемых фрикционов (ММФ) в коробках перемены передач (КПП) автоматизированных трансмиссий энергонасыщенных тракторов позволяет существенно повысить их эксплуатационные характеристики. Имеется тенденция роста энергонасыщенности мобильных энергосредств, несмотря на непрерывное совершенствование конструкций и технологий изготовления, основной проблемой, возникающей при эксплуатации ММФ, остается влияние повышенных температурных режимов работы фрикционных пар на параметры функционирования узла трения. Высокие температуры и температурные градиенты, развиваемые при трении, являются основной причиной интенсивного изнашивания и недопустимого коробления фрикционных пар [1], что приводит к явной необходимости решения задачи прогнозирования тепловой нагруженности трущихся элементов уже на этапе проектирования ММФ.

С целью прогнозирования тепловой нагруженности фрикционных пар в работе рассмотрена тепловая задача трения для пакета дисков ММФ. Расчётная схема (рис. 1) данной тепловой задачи имеет предположение того, что в *i*-ом элементе пакета дисков, занимающем расчетную область V_i, в результате фрикционного тепловыделения формируется осесимметричное температурное поле $T_i = T_i(r,z,t)$, зависящее от координат r и z цилиндрической координатной системы и времени t.

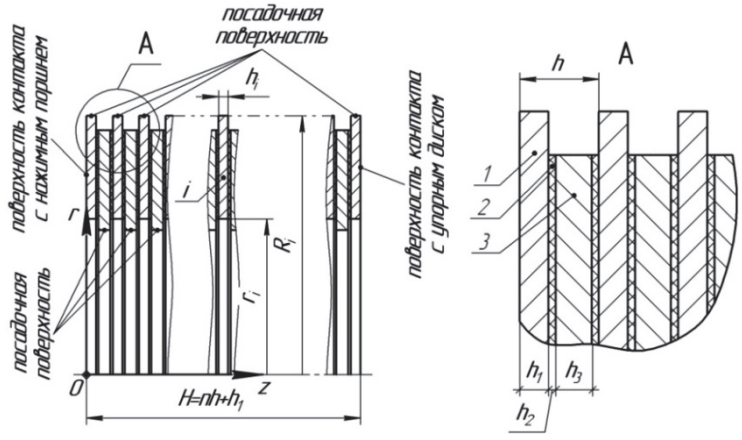


Рис. 1– Расчетная схема тепловой задачи трения для пакета дисков фрикциона: 1 – промежуточный диск, 2 – фрикционная накладка, 3 – основа фрикционного диска.

Согласно расчетной схеме температурное поле в пакете дисков описывается следующей системой уравнений теплопередачи:

$$c_i\rho_i\frac{\partial T_i}{\partial t}=\frac{\partial}{r\partial r}\left(r\lambda_i\frac{\partial T_i}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_i\frac{\partial T_i}{\partial z}\right),(r,z)\in V_i,t\geq 0,i=1,2,...,4n+1, \quad (1)$$

где ρ_i, c_i, λ_i – плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала i-го элемента пакета дисков; n – число фрикционных дисков в пакете.

В начальный момент времени принято условие об однородности температурного поля в пакете дисков. Предполагается, что на поверхностях дисков, взаимодействующих с маслом и конструктивными элементами фрикциона, выполняются граничные условия 3-го рода, а на поверхностях адгезионного контакта фрикционных дисков – граничные условия 4-го рода. Приняты предположения о том, что фрикционная накладка взаимодействует с промежуточным диском по номинальной поверхности фрикционного контакта, источником фрикционного тепловыделения является система, образованная поверхностными слоями бесконечно малой толщины взаимодействующих тел [1], а тепловой сток в масло, находящееся в канавках фрикционной накладки, распределен по номинальной поверхности трения:

$$T_{4i+1}=T_{4i+1\pm1},\lambda_{4i+1}\frac{\partial T_{4i+1}}{\partial n_{4i+1}}+\lambda_{4i+1\pm1}\frac{\partial T_{4i+1\pm1}}{\partial n_{4i+1\pm1}}=q_{2i+(1\pm1)/2}-\alpha\left(T_{4i+1}-T_0\right), \quad (2)$$
$$(r,z)\in V_{4i+1}\cap V_{4i+1\pm1},t>0,i=0,1,...,n,$$

где n_i – внешняя нормаль к поверхности i-го элемента пакета дисков; q_i – удельная мощность фрикционного тепловыделения на i-ой поверхности трения в пакете дисков; α – коэффициент теплообмена поверхности промежуточного диска с маслом, находящимся в канавках фрикционного диска, T_0 – температура масла.

При определении удельной мощности источника фрикционного тепловыделения q_i учитывался эффект снижения контактного давления при удалении i-ой поверхности трения от нажимного диска, связанный с наличием сил трения в шлицевых соединениях дисков с элементами ММФ. Для определения угловой скорости скольжения дисков использовались соответствующие дифференциальные уравнения, описывающие движение фрикционных и промежуточных дисков ММФ при переключении КПП транспортного средства [2].

В процессе численного исследования решение уравнений движения дисков ММФ осуществляли методом Рунге-Кутта 4-го порядка точности, а тепловой задачи – методом Галеркина для конечных элементов. При выполнении расчетов использовали параметры ММФ, применяемых в КПП трансмиссии трактора Беларус мощностью 350 л.с., с 16-ю парами трения рессорно-пружинная сталь 65Г – металлокерамика МК5, взаимодействующими в среде моторного масла. Характер формирования

температурных полей во фрикционных парах исследовали для условий работы ММФ, соответствующих переключению КПП на высшую передачу при движении трактора на стерне с крюковой нагрузкой 50 кН.

Рост передаточного отношения при переключении КПП приводит к увеличению продолжительности трения и тепловой нагруженности фрикционных пар ММФ как высшей, так и низшей передач. В результате исследования установлено, что при переключении КПП в диапазоне от 14-ой до 18-ой передач время буксования ММФ высшей передачи составляет от 1,90 до 2,27 с (рис. 2, а), а низшей передачи – от 0,60 до 2,04 с (рис. 2, б). Увеличение времени буксования ММФ низшей передачи более чем в три раза связано с преждевременным срывом фрикциона в связи с неполным перекрытием при включении 16-18 передач КПП. В целом тепловая нагруженность пар трения ММФ низшей передачи меньше, чем для ММФ высшей передачи.

Характер зависимости температуры на фрикционном контакте пар трения от времени в значительной степени определяется динамикой изменения угловой скорости скольжения дисков и момента трения ММФ. На первом этапе включения от 0 до 1,8 с работа ММФ высшей передачи осуществляется практически при постоянной скорости скольжения дисков и относительно медленном увеличении момента сил трения (рис. 2, а), что обуславливает непрерывное увеличение скорости роста температуры на фрикционном контакте с течением времени трения (рис. 3, а). В дальнейшем от 1,8 до 2,0 с происходит резкое увеличение момента сил трения при быстром падении угловой скорости скольжения дисков ММФ высшей передачи. При этом скорость роста температуры сначала резко увеличивается, а затем непрерывно снижается, что связано с уменьшением мощности фрикционного тепловыделения и повышением интенсивности теплоотвода от фрикционных пар при росте их поверхностной температуры.

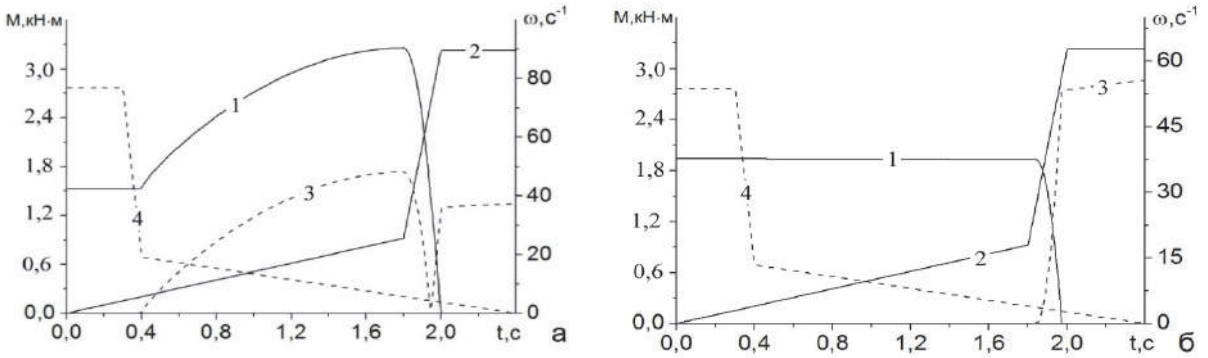


Рис. 2 – Зависимости момента трения *M* (2, 4) и угловой скорости ω (1, 3) вращения дисков фрикционов от времени при включении 15-ой (а) и 16-ой (б) передач: 3, 4 – для фрикциона низшей передачи; 1, 2 – для фрикциона высшей передачи.

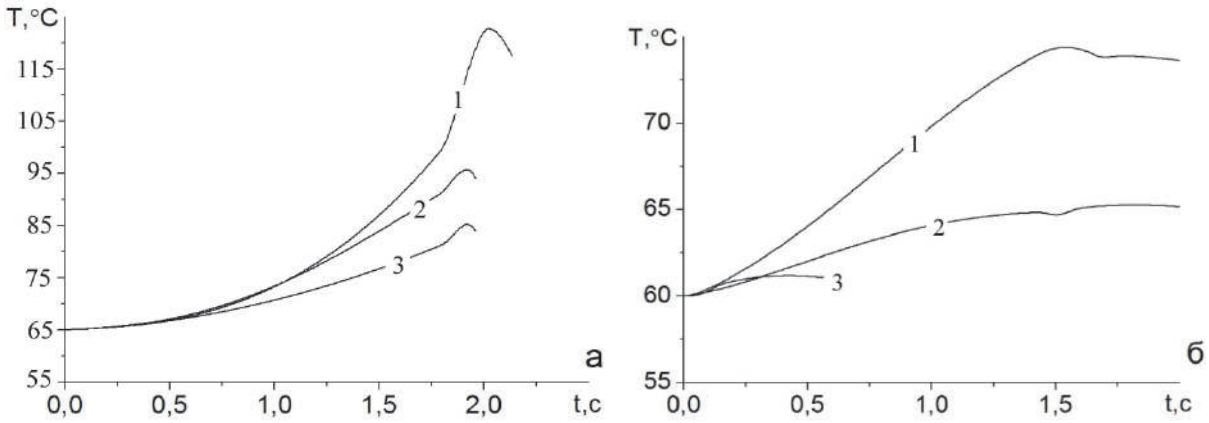


Рис. 3 – Зависимость максимальной температуры *T* в пакете дисков фрикциона высшей (а) и низшей (б) передачи от времени *t* трения при включении *i*-ой передачи: 1 – i = 17; 2 – i = 16; 3 – i = 15.

Для исследованных случаев максимальная температура на поверхности трения ММФ высшей передачи, достигающая около 120 °С, развивается в интервале 0,955…0,975 от полного времени трения (рис. 3, а), когда мощность фрикционного тепловыделения становится равной мощности теплоотвода от фрикционного контакта в объем элементов пар трения и охлаждающее масло. В дальнейшем температура на фрикционном контакте ММФ высшей передачи несколько снижается.

В случае переключения КПП без разрыва мощности, передаваемой от двигателя к движителям трактора, буксование ММФ низшей передачи начинается в конце последнего (третьего) этапа выключения фрикциона (рис. 2, б). Несмотря на быстрый рост угловой скорости скольжения дисков, небольшое время фрикционного взаимодействия и низкое значение момента сил трения обуславливают прирост температуры на фрикционном контакте пар трения не превышающий 1,5-2,5 °С (рис. 3, б). При переключении КПП с частичным разрывом мощности срыв ММФ низшей передачи осуществляется в конце второго – начале третьего этапа выключения фрикциона, в результате чего время трения фрикционных пар возрастает более чем в три раза, а прирост температуры на поверхности трения может достигать до 25 °С. В момент смены направления вращения ведомых дисков на зависимости температуры фрикционного контакта от текущего времени трения наблюдается характерный локальный минимум, связанный с падением мощности фрикционного тепловыделения до нуля.

Распределение температуры по осевой координате пакета дисков свидетельствует о неравномерной тепловой нагруженности фрикционных пар ММФ. Развиваемая на фрикционном контакте температура увеличивается и достигает максимума на 2…3 паре трения от нажимного диска, а затем практически линейно снижается при приближении поверхности трения к упорному диску (рис. 4, а). Это связано с

неравномерным распределением величины момента трения по фрикционным парам, обусловленным наличием сил трения в шлицах крепления дисков, а также теплоотводом от торцевой поверхности крайних дисков пакета. Наибольшая неравномерность в распределении температуры то толщине элементов пары трения, достигающая 5…10 °С/мм, наблюдается для фрикционной накладки, что объясняется относительно низкой теплопроводностью металлокерамики. Градиент температуры по толщине промежуточного и основы фрикционного дисков выражен значительно меньше и для исследованных случаев не превышает 0,6 °С/мм.

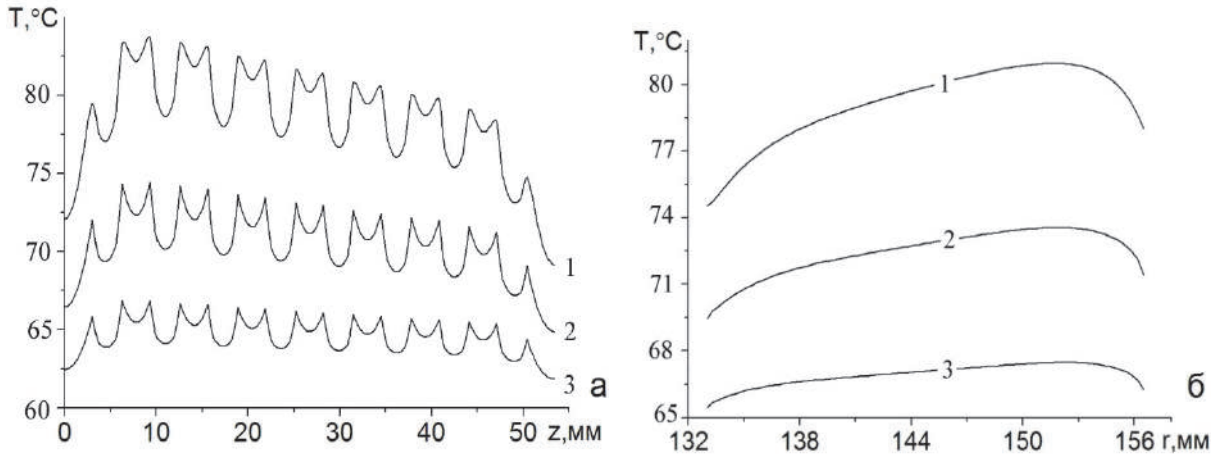


Рис. 4 – Распределение температуры *T* по толщине пакета (а) и ширине поверхности трения (б) дисков фрикциона высшей передачи при включении 15-й передачи в различные моменты времени *t*: 1 – *t* = 1 с; 2 – *t* = 1,5 с; 3 – *t* = 1,96 с.

Результаты расчета показали, что особенности теплообмена с охлаждающим маслом и элементами конструкции ММФ, приводят к формированию в трущихся телах неоднородного температурного поля с более высокой температурой в срединной области и менее нагретыми периферийными участками в радиальном сечении фрикционных пар. С увеличением времени трения наблюдается повышение достигаемых на фрикционном контакте температур, рост неравномерности распределения температуры по ширине поверхности трения и перемещение положения максимума температуры от внешнего радиуса *R* трения в интервал (0,92…0,93)*R* (рис. 4, б).

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников В.И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах. - М.: Наука, 2003. - 279 с.

2. Исследование процесса переключения передач под нагрузкой и оптимизация управления фрикционными муфтами механической

трансмиссии / В.Н. Басалаев, А.В. Коваленко// Механика машин, механизмов и материалов. - 2011. - № 2 (15). - С. 24-32.

УДК 631.3-52: 631.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЪЕМНОГО УСТРОЙСТВА УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА

В.Б. Попов, И.А. Занкевич
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация: Предлагается формирование функциональной математической модели подъемного устройства универсального погрузчика. Рассматриваются варианты аналитического описания функциональной математической модели.

Ключевые слова: функциональная математическая модель, механизм подъема, подъемное устройство универсальнй погрузчик самоходное шасси.

MATHEMATICAL MODELING OF A LIFTING DEVICE FOR A UNIVERSAL LOADER

V.B. Popov, I.A. Zankevich

Educational Institution Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi,
Gomel, Republic of Belarus

Abstract: The development of a functional mathematical model of a universal loader's lifting device is proposed. Options for an analytical description of the functional mathematical model are considered.

Keywords: functional mathematical model, lifting mechanism, lifting device, universal loader self-propelled chassis.

Универсальный погрузчик (УП) состоят из самоходного шасси (СШ), а также навесной машины (НМ) или рабочего органа (РО). Неотъемлемой частью СШ является подъемное устройтсво (ПУ), включающее гидропривод (ГП) открытого типа и механизм подъема (МП). Именно МП, как основной компонент ПУ, определяет характер взаимодействия СШ с НМ или РО.

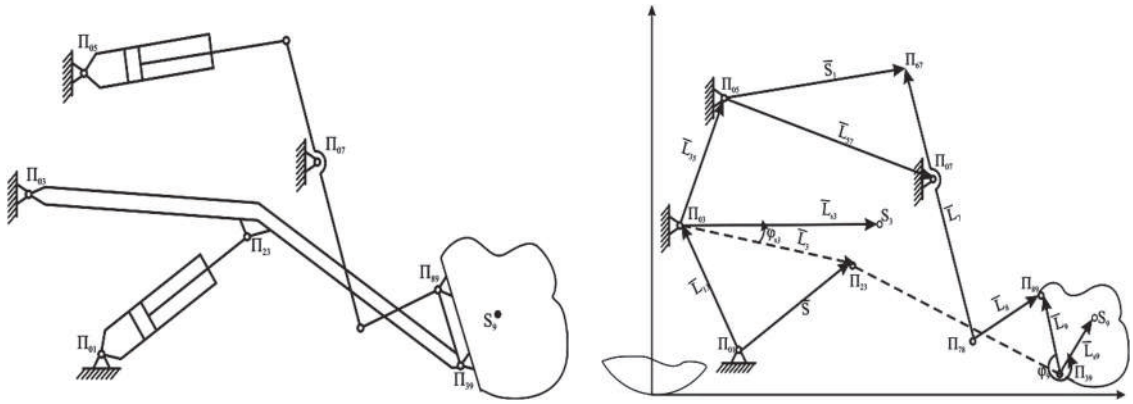
Для из эффективного взаимодействия требуется рациональный выбор параметров МП, достигаемый на базе математического моделирования его режимов работы [1]. К МЭС относятся: универсальные энергетические средства (УЭС), тракторы, фронтальные погрузчики (ФП, рис. 1), а также шасси погрузочные многофункциональные (ШПМ) [2].

Универсальный погрузчик АМКАДОР 332В (рис. 1) предназначен для погрузочно-разгрузочных, землеройно-транспортных, строительно-монтажных и такелажных работ.

Возможность агрегатирования СШ [2] с различными рабочими орудиями и машинами определяется в первую очередь грузоподъемностью его ПУ.

Рис.1 – Погрузчик универсальный АМКОДОР 342С

ПУ УП состоит из объемного гидропривода, гидроцилиндры которого движут, расположенные симметрично относительно продольной плоскости симметрии механизмы подъема стрелы (МПС) и поворота траверсы (МПТ), на которой жестко крепится рабочий орудие (РО). На рисунке 2 представлен плоский аналог механизмов ПУ шасси “АМКОДОР-342С” – структурная схема с РО в виде ковша.



(а) (б)

Рис. 2 – Схема механизмов ПУ “АМКОДОР-342С”-(а)
(б)-Векторная интерпретация механизмов подъема стрелы и поворота траверсы

Структурный анализ показывает, что в проекции на продольную плоскость симметрии ШПМ его МПС представляет собой одноподвижный четырехзвенник со средней поступательной парой [3], а МПТ идентифицируется одноподвижным шестизвенником (рис. 2 а).

Координаты характерных точек вышеупомянутых механизмов определяются на основе метода замкнутых векторных контуров (рис. 2 б), [3]:

$$X_{S3}(S) = X_{03} + L_{S3} \cdot \cos[\varphi_3(S) + \Delta\varphi], \quad Y_{S3}(S) = Y_{03} + L_{S3} \cdot \sin[\varphi_3(S) + \Delta\varphi], \quad (1)$$

$$X_{09}(S) = X_{03} + L_{39} \cdot \cos[\varphi_3(S) + \Delta\varphi_1], \quad Y_{09}(S) = Y_{03} + L_{39} \cdot \sin[\varphi_3(S) + \Delta\varphi_1], \quad (2)$$

где, X_{S3}, Y_{S3} - координаты центра тяжести стрелы; X_{09}, Y_{09} - координаты оси подвеса стелы.

ϕ_3 - угол характеризующий изменение расположения стрелы в правой декартовой системе координат; $\Delta\varphi$ - угол между L_3 и L_{S3}; $\Delta\varphi_1$ - угол между векторами L_3 и L_{39}.

Также по результатам анализа МПТ, были определены координаты центра тяжести РО (S_9) в зависимости от обобщенных координат S, S_1:

$$X_{S9}(S, S_1) = X_{09}(S) + L_{S9} \cdot \cos[\varphi_9(S_1) + \varphi_{S9}], \quad (3)$$

$$Y_{S9}(S, S_1) = Y_{09}(S) + L_{S9} \cdot \sin[\varphi_9(S_1) + \varphi_{S9}], \quad (4)$$

где φ_9 - угол, образуемый вектором L_9 (геометрическая модель траверсы) в правой декартовой системе координат; φ_{S9} - угол между векторами L_9 и L_{S9} в момент начала движения закрепленного на траверсе РО.

Влияние МПС и МПТ на изменение координат центра тяжести РО однозначно связано с изменением независящих друг от друга обобщенных координат *S* и *S1*. Причем первая изменяет положение оси подвеса стрелы (*П09*) относительно СШ, а вторая - положение траверсы (*L9*) относительно оси подвеса.

Кинематический анализ механизмов выполняется на базе геометрического анализа путем дифференцирования проекций характерных точек по независимой переменной t. В результате определяются передаточные числа МПС и МПТ. Передаточное число представляет собой аналог вертикальной скорости центра тяжести РО или кинематическую передаточную функцию 1-го порядка, зависящую только от внутренних параметров механизмов ПУ СШ [4].

Понятие грузоподъемности ПУ УП и СШ введено по аналогии с грузоподъемностью ПУ колесного трактора. Грузоподъемность ПУ трактора определяется массой поднимаемого груза (*m*) при максимальной величине усилия на штоке гидроцилиндра механизма подъема (МП) $F_{шт}^{\max}$:

$$m = \frac{F_{шт}^{\max} \cdot \eta_{МН}}{g \cdot I_S}, \quad (5)$$

где g - ускорение свободного падения; I_s - передаточное число МН трактора; $\eta_{МН}$ - К.П.Д. МН.

Максимальная сила на штоке гидроцилиндра МПС определяется по выражению:

$$F_{шт}^{\max} = p_{гц}^{\max} \cdot F_н, \quad (6)$$

где $F_н$ - площадь поршня со стороны напорной магистрали.

В выражении (6) верхняя граница $p_{гц}^{\max}$ определяется настройкой предохранительного клапана гидропривода ПУ.

С учетом принятых допущений используя выражение (5) получим уравнение установившегося движения двух нагруженных поршней силовых гидроцилиндров:

$$(m_{ро} \cdot I_{S9} + m_{стр} \cdot I_{S3}) \cdot g = F_{шт}^{\max} - F_{гц}(S), \quad (7)$$

Где I_{s9}, I_{s3} - аналоги вертикальной скорости характерных точек - центров тяжести рабочего орудия и стрелы.

$$I_{S3}(S) = \varphi_3'(S) \cdot L_{S3} \cdot \cos[\varphi_3(S) + \Delta\varphi_1] \quad (8)$$

$$I_{09}(S) = \varphi_3'(S) \cdot L_{39} \cdot \cos(\varphi_{39}(S)) \quad (9)$$

$$I_{S9}(S, S_1) = I_{09}(S) + \varphi_5'(S_1) \cdot U_{97}(S_1) \cdot L_{S9} \cdot \cos(\varphi_9(S_1)) \quad (10)$$

где $\varphi_3'(S)$ и $\varphi_5'(S_1)$ - аналоги угловой скорости звеньев L_3 и L_5; I_{09}(S) – аналог вертикальной скорости оси подвеса стрелы; $U_{97}(S_1)$ – передаточное отношение угловых скоростей звеньев L_9 и L_7 МПТ.

Поскольку аналоги вертикальных скоростей характерных точек изменяются в зависимости от текущего положения звеньев МПС и МПТ, постольку и грузоподъемность ПНУ - $G(S, S_1)$ в диапазоне изменения обобщенных координат (S, S_1), как это следует из уравнения, будет величиной переменной:

$$G(S, S_1) = \frac{p_{гц}^{\max} \cdot F_H - F_{гц}(S)}{\left[I_{S9}(S, S_1) + I_{S3}(S) \cdot \frac{m_{стр}}{m_{ро}} \right] \cdot g}, \quad (11)$$

Конструктора интересует, как правило, минимальное значение грузоподъемности, поскольку РО с таким весом устойчиво перемещается ПУ во всем диапазоне изменения (S, S_1). В этом положении аналог вертикальной скорости центра тяжести РО - наиболее влиятельный выходной параметр МПС, становится максимальным. Грузоподъемность можно рассматривать, как обобщенный показатель качества ПУ, зависящий с одной стороны от параметров гидропривода – давления в гидроцилиндре и площади его поршня со стороны напорной магистрали, а с другой от параметров механизмов ПУ и рабочего органа – их масс, передаточных чисел и к.п.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов, В.Б. Математическое моделирование подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В.Б. Попов. – Гомель. ГГТУ ми. П.О. Сухого, 2016. – 251с.: ил..

2. http:\\www.amkodor.brest.by

3. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский - М.: Машиностроение 1988. С. - 640.

4. Попов В.Б. Аналитические выражения кинематических передаточных функций механизмов навески энергоносителей / В.Б. Попов // Вестник ГГТУ им. П.О.Сухого- 2000. - №2 - с. 25-29.

УДК 621.3.049.77

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ ВЫЖИГАЕМОЙ МАСТЕР-МОДЕЛИ ДЕТАЛИ ПРИ ПОМОЩИ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.Д. Лёвкина, Е.П. Поздняков, И.Б. Одарченко
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Основным способом изготовления металлических изделий является литьё, так как может обеспечить точность исполнения поверхности детали, изготовление их большого количества и обеспечивает высокую повторяемость этих деталей. Однако метод литья имеет ряд недостатков. Изготовление технологической оснастки для данного процесса (в частности, если речь идет о деталях со сложной геометрией), как и отладка самого процесса заливки металла, занимает значительное количество времени. В современном обществе время для заказчика является важным и решающим критерием.

Современные технологии позволяют избежать многих производственных проблем. Если говорить об облегчении и ускорении создания технологической оснастки для деталей сложных форм – можно использовать метод литья по выжигаемым моделям, где сами выжигаемые модели производятся при помощи аддитивных технологий, которые позволяют создать деталь любой геометрической формы за короткий промежуток времени без потери качества детали не только различными материалами, но и с учетом различного заполнения, что непосредственно влияет на коэффициент зольности при литье [1].

Для проведения исследования была разработана и оптимизирована трехмерная модель детали «Вилка» в программном обеспечении (ПО) SolidWorks (рисунок 1). Деталь имеет точные поверхности, которые после литья дорабатываются механически, а также необрабатываемые поверхности, которые не являются ответственными.

Обрабатываемые поверхности можно выделить двух типов: простой и сложной формы. Последние являются труднообрабатываемыми, что диктует необходимость применения дорогостоящего специализированного оборудования и инструментальной оснастки, а также высококвалифицированного персонала.

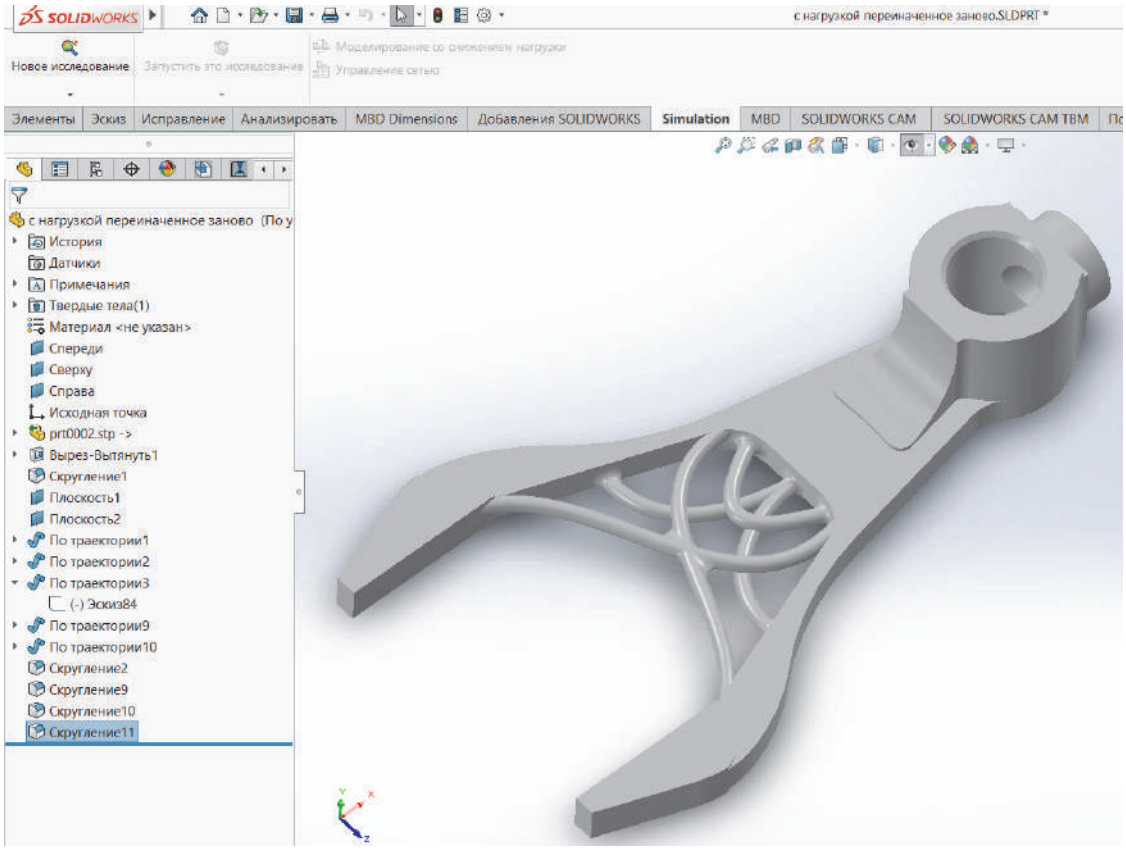


Рис. 1 – Оптимизированная модель детали «Вилка»

Учитывая сложность конструкции оптимизированной модели, можно сделать вывод о том, что получить изделие на прямую методом литья в песчано-глинистые формы трудноисполнимо, т.к. при извлечении модели отливки возможно повреждение гравюры будущей отливки.

В связи с этим деталь будет производиться при помощи метода литья по выжигаемым моделям с учетом производства выжигаемых мастер-моделей посредством аддитивных технологий. 3D-печать или аддитивное производство – это производственный процесс, при котором 3D-принтер создает трехмерные объекты путем нанесения материала слоями в соответствии с цифровой 3D-моделью объекта. Основное преимущество 3D-печати заключается в том, что детали могут иметь разную степень заполнения. С производственной точки зрения это снижает расход материала и себестоимость, а также вес конечного продукта. С точки зрения 3D печати это сильно экономит драгоценное время.

При создании выжигаемых мастер-моделей крайне важно контролировать такой параметр, как зольность [2]. В настоящее время для изготовления выжигаемых моделей при помощи 3D-печати наиболее распространенным материалом является PLA-пластик, имеющий один из самых низких показателей зольности. Несмотря на это важно учесть, что при выжигании, мастер-модель должна иметь минимальное заполнение,

чтобы на готовом литейном изделии не было золы. Исходя из вышесказанного выбираем плотность заполнения равной 8%. В зависимости от изменения параметра плотности заполнения программа автоматически подбирает дистанцию линий заполнения 5 мм.

(если взять 5% заполнения, то значение дистанции будет равняться 8 мм; при проценте заполнения 6 (7) % значение дистанции будет дробным. При 5% заполнения мастер-модель может не выдержать нагрузок, оказываемых на неё при формовке).

Шаблон заполнения - зигзаг, так как он является оптимальным решением. При таком шаблоне возможность провисания материала при построении верхних слоёв и лишнего материала внутри модели минимальна.

Процент перекрытия заполнения равен 10 - небольшое перекрытие позволит стенкам надёжно соединиться с заполнением (рисунок 2).

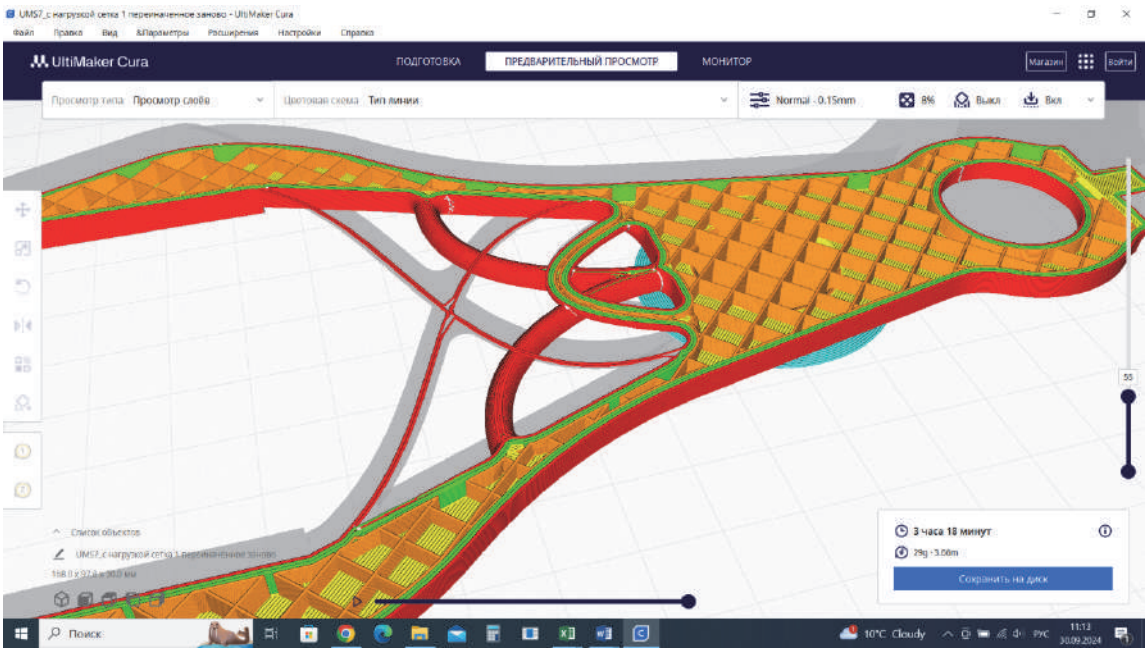


Рис. 2 – Отображение внутреннего заполнения модели на 55 слою создания мастер-модели

Так же одно из основных требований к литью по выжигаемым моделям – это качество поверхности выжигаемой заготовки. Она должна быть гладкой, с минимальной ребристостью. Для того, чтобы добиться такого качества выбрана высота слоя 0,1 мм. Однако высота первого слоя составляет 0,2 мм, т.к. данный параметр выбирается с учетом того, что высота первого слоя должна быть толще, чем последующие слои для обеспечения наилучшего прилипания пластика к столу. Ширина линии внешней стенки, внутренней стенки, линии дна/крышки, заполнение,

поддержки составляет 0,4 мм. Данные параметры напрямую зависят от диаметра сопла, который автоматически задается при выборе пластика из которого будет изготовлена модель.

В ходе исследования была разработана и оптимизирована 3D-модель детали «Вилка» с учётом требований к точности поверхностей и технологичности изготовления. Анализ конструкции показал, что традиционное литьё в песчано-глинистые формы неэффективно из-за риска повреждения гравюры при извлечении модели, особенно для деталей со сложной геометрией.

Для решения этой проблемы предложен метод литья по выжигаемым моделям с использованием аддитивных технологий для изготовления мастер-моделей. Оптимальные параметры 3D-печати (плотность заполнения 8%, шаблон «зигзаг», высота слоя 0,1 мм, перекрытие 10%) обеспечили минимальную зольность, прочность модели и высокое качество поверхности. Применение PLA-пластика и рациональное заполнение позволили снизить расход материала, себестоимость и вес изделия, а также сократить время производства.

Таким образом, сочетание аддитивных технологий и литья по выжигаемым моделям является эффективным решением для изготовления сложных металлических деталей, обеспечивая высокую точность, повторяемость и экономическую целесообразность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митраков, Г. Н. Использование аддитивных технологий при литье по выжигаемым моделям / Г. Н. Митраков [и др.] // Омский научный вестник. — 2015. — № 2 (140). — С. 80–84.

2. Куранов, А. С. Влияние зольности материала модели на качество отливок, получаемых при литье по выжигаемым моделям / А. С. Куранов // Теория и практика современной науки. — 2023. — № 6 (96). — С. 128–130.

3. Лысыч, М. Н. Материалы, доступные в рамках различных технологий 3D-печати / М. Н. Лысыч, М. Л. Шабанов, Р. В. Воронцов // Современные наукоемкие технологии. — 2015. — № 5. — С. 20–25.

УДК 331.45

БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОХРАНЕ ТРУДА НА ПРИМЕРЕ ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»

М.М. Кучук, М.Л. Калиниченко
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

ОАО «Беларуськалий» - одно из крупнейших предприятий в мире по добыче и переработке калийных соле. Производство связано с повышенными рисками. Условия подземной добычи отличаются высокой степенью опасности: работы выполняются на значительной глубине, где существует вероятность обрушения кровли, газодинамических явлений, внезапных выбросов соли и газа. Кроме того, в технологическом процессе активно используется тяжёлая техника, буровые установки и транспортное оборудование, что создаёт дополнительные риски для работников, особенно при проведении ремонтных и такелажных операций.

Среди наиболее серьёзных угроз для предприятия можно выделить обрушения пород, пожары, утечки газа, а также травмы, возникающие из-за нарушений правил эксплуатации машин и механизмов. Опасность представляют и транспортные происшествия при перемещении людей и материалов в шахтных условиях, где ограниченная видимость и сложная конфигурация путей увеличивают вероятность столкновений.

С учётом этих факторов охрана труда на ОАО «Беларуськалий» занимает ключевое место в системе управления безопасностью. Предприятие активно внедряет инженерные решения по контролю состояния горных массивов, применяет современные методы мониторинга устойчивости, а также реализует мероприятия по минимизации человеческого фактора. Особое внимание уделяется обучению персонала, проверке технического состояния оборудования и поддержанию дисциплины на рабочих местах.

Таким образом, обеспечение безопасности труда на ОАО «Беларуськалий» требует комплексного подхода, включающего как технические, так и организационные меры. Это позволяет не только снизить уровень производственного травматизма, но и создать устойчивую систему профилактики рисков в условиях высокоопасного производства.

Недавно были внесены изменения в ряд постановлений Совета Министров Республики Беларусь, касающихся вопросов промышленной и трудовой безопасности. Эти корректировки направлены на совершенствование порядка регистрации потенциально опасных объектов, уточнение правил аттестации экспертов в области промышленной

безопасности, а также обновление требований к подготовке работников, занятых перевозкой опасных грузов [1].

Все эти шаги направлены на то, чтобы сделать систему охраны труда более понятной, современной и эффективной, а значит - обеспечить каждому работнику больше уверенности в том, что его труд проходит в безопасных условиях.

Анализ несчастных случаев происшествий в ОАО «Беларуськалий» сделан на основе «Реестра происшествий в ОАО «Беларуськалий»» [2-5] за 2020, 2021 гг. и 2024, 2025 гг. и представлены на рис. 1.

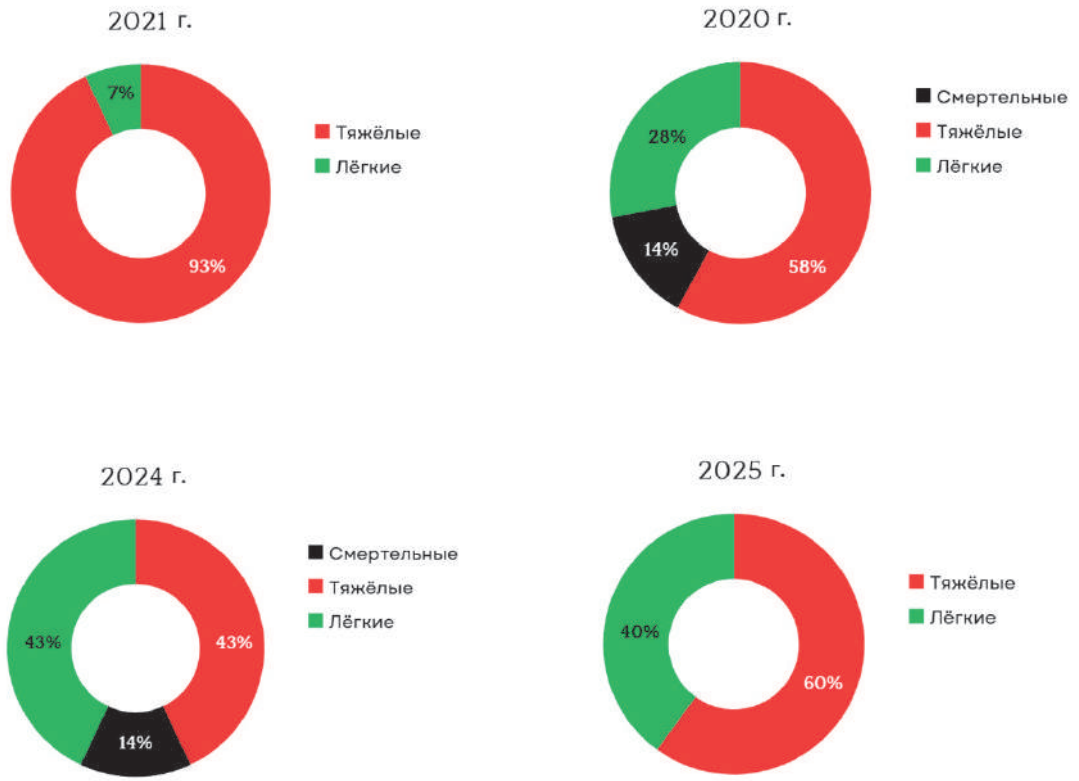


Рис. 1 Анализ несчастных случаев происшествий
в ОАО «Беларуськалий» в 2020, 2021 гг. и 2024, 2025 гг.

Проведённый анализ происшествий на предприятии показал, что значительная часть случаев связана с нарушениями трудовой и производственной дисциплины. Нередко сотрудники пренебрегают установленными инструкциями, выполняют операции в неправильной последовательности или пользуются мобильными телефонами во время работы. Бывают случаи, когда люди передвигаются по опасным зонам, игнорируя безопасные маршруты. Всё это приводит к травмам и авариям, которых можно было бы избежать при более внимательном отношении к правилам.

Другой распространённой причиной становятся ошибки при ремонте и техническом обслуживании оборудования. Особенно часто это проявляется при замене шин, колёс или при выполнении такелажных операций, когда не используются механические средства, а работа выполняется вручную. Такие действия нередко приводят к травмам и повреждениям техники.

Также фиксируются транспортные происшествия: потеря управления самоходными машинами, эксплуатация неисправной техники и усталость водителей. Всё это указывает на недостаточный контроль за состоянием транспорта и организацией рабочих процессов.

Кроме человеческих ошибок, важную роль играют геотехнические и природные факторы. Иногда происшествия происходят из-за обрушения кровли, осыпания пород или внезапных выбросов. В таких ситуациях нарушения со стороны работников не всегда выявляются - причиной становится сама сложность и опасность подземных условий.

Не стоит забывать и об организационных недочётах. В некоторых случаях техника выпускается на работу при наличии дефектов, а состояние рабочих зон проверяется не так тщательно, как требуется. Всё это в совокупности создаёт предпосылки для повторяющихся инцидентов.

Анализ за последние годы показывает, что проблемы носят системный характер. Сочетание человеческого фактора и объективных природных рисков создаёт устойчивую картину повторяющихся происшествий. Многие тяжёлые и даже смертельные случаи могли бы не произойти, если бы технологические инструкции выполнялись не формально, а добросовестно и с пониманием важности каждого действия [2 - 5].

Для устранения геотехнических рисков требуется не только дисциплина работников, но и серьёзные инженерные меры - установка датчиков, проведение мониторинга устойчивости и обновление технических решений.

Касаемо рекомендаций - в ближайшее время стоит ввести обязательные контрольные листы для всех опасных операций. Это поможет проверять, выполнены ли все шаги в нужной последовательности, а также повысит личную ответственность работников. Полезно также проводить внезапные проверки соблюдения правил и фиксировать результаты в отчётах.

Особое внимание следует уделить обучению и аттестации персонала. Каждый машинист, водитель или ремонтник должен не просто знать правила, но и уметь применять их на практике. Для этого можно проводить практические экзамены и повторные инструктажи.

Не менее важно следить за техническим состоянием оборудования. Перед началом смены техника должна проходить осмотр, а при выявлении

серьёзных дефектов - оставаться вне эксплуатации до устранения неполадок.

В долгосрочной перспективе необходимо развивать систему управления безопасностью, создавать базу данных происшествий, проводить регулярный анализ и модернизировать оборудование. Следует также расширять применение инженерных решений - укреплять горные выработки, проводить обследования с привлечением специалистов и использовать современные средства механизации для снижения ручного труда.

В соответствии с вышесказанным и по итогам анализа происшествий на предприятии ОАО «Беларуськалий» за последние годы можно сделать вывод, что большинство несчастных случаев можно предотвратить. Основные направления профилактики - это повышение дисциплины и ответственности персонала, строгий контроль выполнения технологических операций и внедрение инженерных решений, направленных на повышение безопасности. Только сочетание человеческой осмотрительности и современных технических мер позволит создать действительно безопасные условия труда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30 сентября 2024 года №718 «О внесении изменений в постановления Совета Министров Республики Беларусь» [1]
2. Реестр происшествий в ОАО «Беларуськалий» за 2020 год [2]
3. Реестр происшествий в ОАО «Беларуськалий» за 2021 год [3]
4. Реестр происшествий в ОАО «Беларуськалий» за 2024 год [4]
5. Реестр происшествий в ОАО «Беларуськалий» за 2025 год [5]

УДК 669:51-7; 669:002; 621.74; 621.792; 669.53.01.99

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК НА СКЛЕЕННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ SOLIDWORKS

Е.А. Малиновский, М.Л. Пшеничный, М.Л. Калиниченко
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

В рамках данного исследования проведен анализ разрушающих нагрузок, воздействующих на склеенные компоненты модельного комплекта в условиях литейного производства. Актуальность работы обусловлена тем, что в процессе машинной формовки уплотняемая смесь создает значительные механические напряжения, в первую очередь, сжимающего характера. Эти нагрузки являются причиной ускоренного износа, деформаций и последующего выхода оснастки из строя. Ключевой задачей работы является оценка характера и динамики разрушения склеенных соединений в модельном комплекте с применением инструментов численного моделирования SolidWorks.

Объектом настоящего исследования выступают два склеенных элемента, составляющих модельный комплект. Несмотря на идентичную высоту (50 мм) и общую геометрию в виде усеченного конуса, образцы имеют принципиальное конструктивное различие. Первый образец представляет собой цельную деталь, собранную из трех отдельных склеенных частей. Второй образец является пустотелым. На первоначальном этапе выполняются базовые настройки проекта. Моделирование осуществляется как внешняя задача, что подразумевает анализ физических процессов в окружающем детали пространстве. На систему назначается гравитационная нагрузка, стандартно направленная вдоль оси Y. В качестве среды, заполняющей объем вокруг моделей, принимается воздух. Целью расчета является определение величины полного давления, вектор которого направлен по нормали к поверхности детали. Важным параметром является уровень детализации расчетной сетки. Его выбор напрямую влияет на точность и трудоемкость моделирования: повышение плотности сетки, увеличивающее количество узловых точек, ведет к росту точности, но одновременно и к увеличению вычислительных затрат. На следующем этапе производится назначение материала для деталей. Хотя программа SolidWorks предоставляет доступ к обширным встроенным библиотекам, для данной задачи был создан пользовательский материал с вводом требуемых характеристик вручную (табл.1). Для обеспечения корректности прочностного анализа в расчетной модели задаются граничные условия. С этой целью фиксируется нижняя плоскость детали, что исключает её перемещение. На внешнюю

поверхность модели последовательно прикладываются распределенные нагрузки интенсивностью 10, 20 и 30 кН/м². Направление действия давления задается перпендикулярным к поверхности для моделирования равномерного силового воздействия по всей площади. Следующим этапом является генерация конечно-элементной сетки. Её параметры настраиваются с учетом геометрических особенностей детали и требуемой точности решения. Аналогично расчету в Flow Simulation, уменьшение размера ячеек сетки, особенно в зонах сложной формы, позволяет повысить детализацию и достоверность результатов.

Табл. 1. Параметры используемого материала для пустотелой и цельной детали

№п/п	Параметр	Единицы измерения	Значение
1	Модуль упругости	кН/м²	$2{,}4 \cdot 10^{6}$
2	Коэффициент Пуассона	Н/А	0,3
3	Модуль сдвига	кН/м²	$2{,}1 \cdot 10^{6}$
4	Плотность	кг/ м²	650
5	Прочность на растяжение	кН/м²	410
6	Прочность на сжатие	кН/м²	$28 \cdot 10^{3}$
7	Предел текучести	кН/м²	0,235
8	Коэффициент теплового расширения	$К^{-1}$	$7{,}5 \cdot 10^{-5}$
9	Теплопроводность	Вт/кг·К	0,055

По итогам анализа составляется отчет, содержащий исчерпывающее описание модели (табл. 2).

Табл. 2. Результаты расчетов моделирования оказания нагрузки на пустотелую и цельную детали

Деталь	Давление на деталь, кН/м²	Напряжение, кН/м²		Перемещение, мм
		max	min	max
Пустотелая	10	116,4	1,764	0,001218
	20	232,7	3,527	0,002437
	30	349,1	5,291	0,003655
Цельная	10	116,4	6,701	0,0095
	20	20,490	0,0134	0,001902
	30	30,740	0,0201	0,002853

Для наглядной интерпретации данных отчет дополняется диаграммами, отображающими картину распределения напряжений и перемещений. Примеры визуализации результатов моделирования, а именно полей напряжений и перемещений для цельной и пустотелой конструкций, приведены на рис. 1-3. Важным аспектом является то, что представленная геометрия подвергнута значительному визуальному искажению. Программный комплекс SolidWorks в автоматическом режиме масштабирует величину деформаций для улучшения восприятия данных. Именно этим обусловлен кажущийся парадокс, когда визуальная

деформация цельной детали выглядит существеннее, чем у пустотелой, в то время как численные результаты расчетов свидетельствуют об обратной тенденции.

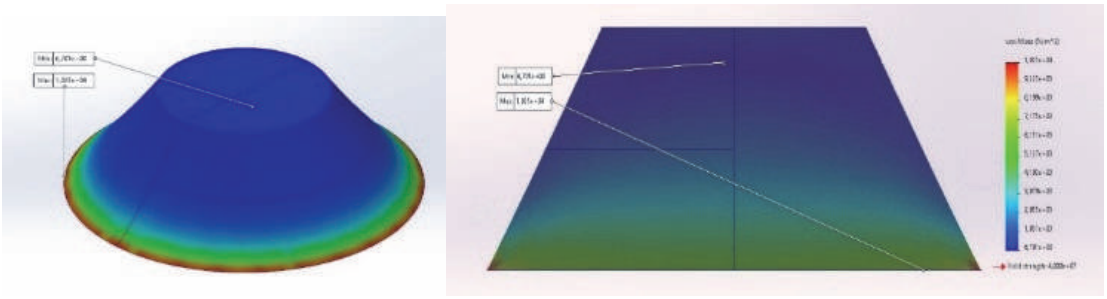
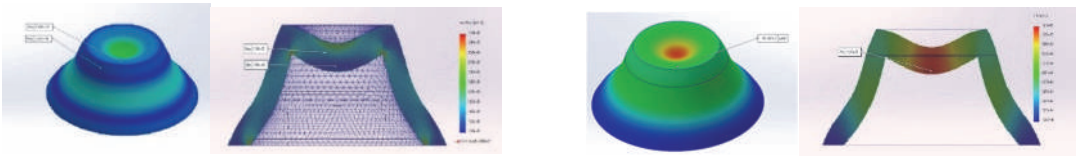


Рис. 1– Распределение напряжений для цельной детали при давлении 10 кН/м^2



а б

Рис. 2 – Распределение (а) напряжений и (б) перемещений для пустотелой детали при давлении 10 кН/м^2

Анализ рисунков позволяет установить, что в пустотелой детали зона максимальных напряжений при всех уровнях нагрузки локализуется в её верхней части. При этом при воздействии в 20 и 30 кН/м² к этой зоне добавляется и средний участок конструкции. В отличие от неё, цельная деталь демонстрирует иную картину: пиковые напряжения при всех трёх нагрузках сосредоточены на её нижних гранях. Что касается минимальных напряжений, то здесь наблюдается обратная закономерность: для пустотелой модели они фиксируются в нижней части, а для цельной - в верхней. Согласно данным, характер распределения перемещений существенно различается. В пустотелой детали максимальное перемещение сконцентрировано исключительно в центральной точке верхней плоскости. В то же время у цельной детали деформация распределена по всей площади верхнего торца, проявляясь с разной интенсивностью. Область минимальных перемещений в обоих случаях совпадает и локализована вдоль нижней закрепленной грани. При дальнейшем моделировании повышения нагрузок напряжения в пустотелой детали растут (116,4; 232,7; 349,1 кН/м²), увеличиваясь примерно на 116,3 кН/м² с каждым шагом нагрузки. Эта линейная зависимость указывает на равномерное упругое деформирование конструкции. В отличие от этого, цельная деталь

демонстрирует значительно более низкий уровень напряжений (116,4; 20,490; 30,740 кН/м²). Особенно показателен резкий спад напряжения после первоначальной нагрузки. Такое поведение свидетельствует о принципиально ином распределении нагрузок: массивная конструкция эффективно перераспределяет напряжение по всему своему объему, не образуя локальных пиков, характерных для тонкостенной пустотелой структуры. Можно заключить, что наличие пустот в конструкции кардинально меняет картину напряженного состояния, приводя к значительной концентрации напряжений и их интенсивному росту по мере увеличения внешней нагрузки. Далее проведем серию расчетов для цельной детали, установив значения давления 100, 200 и 300 кН/м². Это позволит исследовать поведение конструкции при различных нагрузках и проанализировать распределение напряжений и деформаций (рис.3, табл. 3).

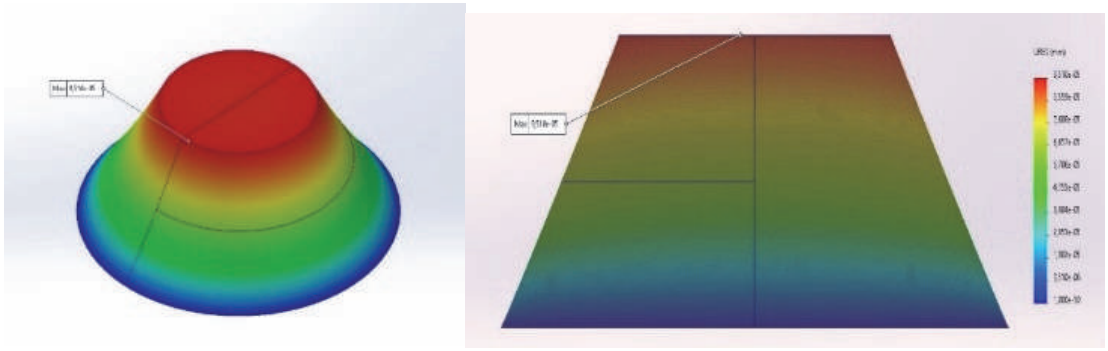


Рис. 3 – Распределение перемещений для цельной детали при давлении 10 кН/м^2

Табл. 3. Результаты расчетов моделирования оказания нагрузки на цельную деталь

Деталь	Давление на деталь, кН/м^2	Напряжение, кН/м^2		Перемещение, мм
		max	min	max
Цельная	100	1025	0,067	0,000951
	200	204,9	0,134	0,001902
	300	307,4	0,201	0,002903

Анализ данных, представленных в табл. 3, позволяет выявить четкие линейные зависимости между прилагаемой нагрузкой и откликом конструкции. С увеличением давления в три раза (со 100 до 300 кН/м²) максимальное напряжение и максимальное перемещение также возрастают пропорционально, приблизительно в три раза. При этом минимальное напряжение остается крайне низким на всех этапах нагружения, что подтверждает равномерный характер распределения нагрузки по объему цельной детали. Распределение напряжений и перемещений по объему детали сохраняет одинаковую картину при всех значениях давления: зоны максимальных напряжений стабильно локализуются в одних и тех же

конструктивных областях, не проявляя признаков пластической деформации или перераспределения. Это подтверждает надежность и предсказуемость поведения цельной детали под нагрузкой.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что конструкция сохраняет свою целостность и эксплуатационные характеристики в рассмотренном диапазоне нагрузок. Исследование пустотелой детали в диапазоне нагрузок 100-300 кН/м² целенаправленно не проводилось. Данное решение обусловлено тем, что характер распределения напряжений и деформаций в тонкостенной конструкции уже был установлен на предыдущих этапах моделирования. При дальнейшем увеличении нагрузки принципиальная картина не изменяется: не формируются новые зоны концентрации напряжений и не происходит смена формы деформации. Наблюдается лишь пропорциональное масштабирование уже известных величин - рост напряжений в стенках конструкции и увеличение величины перемещений.

Для всесторонней оценки долговечности и стабильности размеров модельного комплекта в условиях эксплуатации было проведено сравнительное моделирование двух основных технологических процессов уплотнения формовочной смеси: ручной и машинной формовки. Целью данного этапа исследования является количественная и качественная оценка распределения механических напряжений и возникающих деформаций в элементах оснастки при воздействии нагрузок, характерных для каждого из методов. Проведенное исследование выявило существенную разницу в воздействии на модельный комплект при различных способах формовки. Машинная формовка с давлением 0,2 МПа вызывает значительные механические напряжения в обеих деталях, превышающие показатели ручной формовки на несколько порядков. При этом пустотелая конструкция демонстрирует повышенную чувствительность к механическим воздействиям, проявляя более высокий уровень деформаций и напряжений по сравнению с цельной деталью при одинаковом давлении. В отличие от машинного способа, ручная формовка с давлением 0,000059 МПа оказывает минимальное воздействие на модельный комплект, создавая равномерное распределение напряжений без выраженных концентраторов [1]. Сравнительный анализ подтверждает компромиссный характер выбора технологии: машинная формовка обеспечивает интенсивное уплотнение смеси, но создает существенные нагрузки на оснастку, в то время как ручной способ сохраняет ресурс модельного комплекта, но менее эффективен для уплотнения. Конструкция цельной детали в обоих случаях показывает лучшую устойчивость к деформациям, что свидетельствует о ее повышенной надежности. Полученные результаты создают объективную основу для оптимизации технологических параметров процессов формовки с учетом требований к качеству уплотнения смеси и сохранности модельного комплекта.

Вывод. Проведенный анализ позволил оценить распределение возникающих напряжений и вызванных ими перемещений. Результаты работы наглядно продемонстрировали различие в поведении пустотелой и цельной деталей разной конструкции при одинаковых внешних воздействиях, что подтверждает эффективность применения SolidWorks для решения задач прочностного моделирования. Проведенное исследование позволило выявить ряд преимуществ и ограничений данного программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Компьютерное моделирование технологических процессов литейного производства / М.Л. Калиниченко [и др.] // Развитие современной науки: опыт, проблемы, прогнозы: сборник статей IX Международной научно-практической конференции 16 января 2025 г. / Междунар. центр научного партнерства; под ред. И.И. Ивановской, Л.А. Кузьминой. – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2025. –С. 85 – 101.

УДК 669:51-7; 669:002; 621.74; 621.792; 669.53.01.99

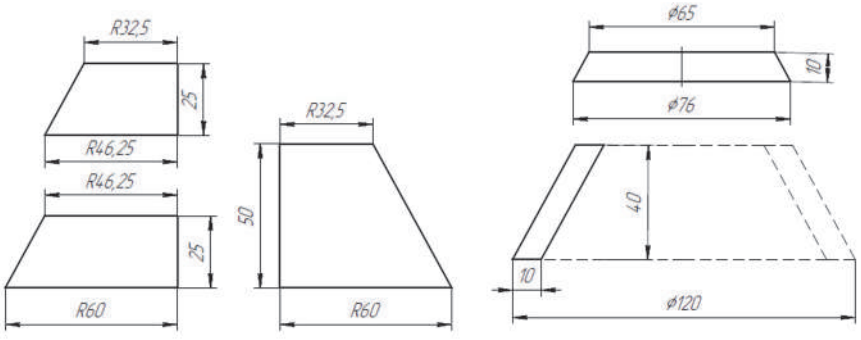
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК НА СКЛЕЕННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ КОМПАС 3D

Е.Н. Шиш, Д.А. Шклёда, М.Л. Калиниченко
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

Стоимость готового изделия определяется расходами на заготовительное производство и его финишную обработку. Как правило, финишная обработка составляет до 60% стоимости готового изделия. Как результат, для снижения финишной обработки важную роль играет класс точности получаемой заготовки. Для повышения качества заготовки не маловажную роль играет качество модели для дальнейшего производства заготовки, повышения ее качества и снижения стоимости ее производства. Одним из возможны факторов влияния на данный процесс является уменьшение их материалоемкости, например, за счет создания пустотелых конструкций. Однако критически важно оценить, как такая модификация повлияет на прочность. Поскольку главным видом нагрузки в процессе формования заготовки-формы является сжатие, необходимо детально изучить и сравнить поведение различных типов моделей, как на пустотелой остове, так и комбинированных.

Целью работы является анализ механизма разрушения и несущей способности пустотелых и цельных модельных комплектов при воздействии сжимающих нагрузок с помощью программы Компас 3D.

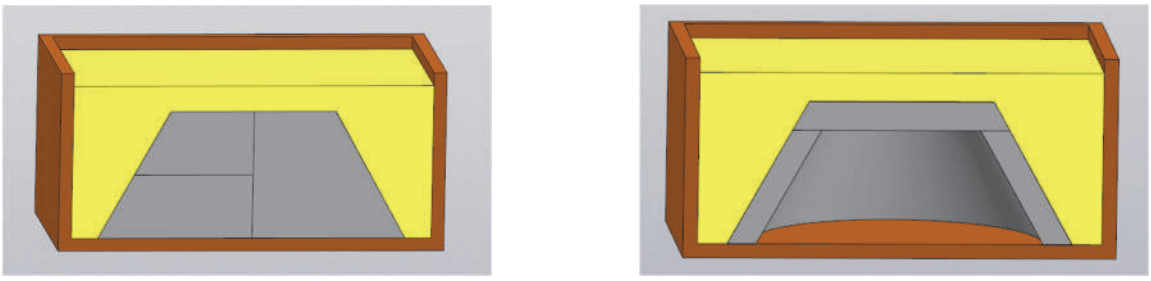
В данной работе исследуемыми деталями являются две модели: цельная, состоящая из трёх частей; пустотелая, состоящая из двух. Габариты моделей представлены на рис. 1. Вид модели в опоке представлен на рис. 2.



а б

а – цельная; б – пустотелая

Рис. 1 – Габаритные размеры склеенных частей модели



а б

а - цельная; б - пустотелая

Рис. 2 – Вид моделей в опоке

Далее создаются настройки проекта в КОМПАС 3D. Изначально задаются предварительные параметры материала, из которого состоят модели (табл. 1).

Табл. 1. Параметры используемого материала

№ п/п	Параметр	Единицы измерения	Значение
1	Модуль упругости нормальный	кН/м²	2,4
2	Коэффициент Пуассона	Н/А	0,35
3	Плотность	кг/ м²	650
4	Температурный коэффициент линейного расширения	1/С	$75 \cdot 10^{-6}$
5	Теплопроводность	Вт/(С·мм)	0,055
6	Удельная теплоёмкость	Дж/(Кг·С)	1400
7	Предел прочности при сжатии	кН/м²	$28 \cdot 10^{3}$
8	Предел прочности (Временное сопротивление)	кН/м²	$28 \cdot 10^{3}$
9	Предел текучести	кН/м²	0,04
10	Предел выносливости при растяжении	кН/м²	0,04
11	Предел выносливости при кручении	кН/м²	0,025

Далее был произведён расчет и анализ напряженно-деформационного состояния формовочной смеси и модели при ручной и машинной формовке. Известно, что давление при ручной формовке составляет – 0,059 кН/м^2, а при уплотнении форм методом машинного прессования 0,2 – 0,4 МПа. Важно, чтобы усилие запрессовки позволило форме держать свой отпечаток, но формовочная смесь не стала на столько плотной, чтобы выходящие при заливке газы ее не разрушили [1, 2]

Когда делается расчет, программа сама определяет, как соединены части между собой. Это делается автоматически, потому что расчет проводится для всей сборки, компоненты в которой уже привязаны друг к

другу. Стоит отметить, что также автоматически указывается клеевой шов. При необходимости сами связи и их тип можно задавать вручную.

Далее идёт выбор приложения (АРМ FEM), при помощи которого ведутся дальнейшие расчеты. Результаты проведенных расчетов приведены в табл. 2.

Изображения распределения напряжений и перемещений для пустотелой и цельной модели представлены на рис. 3-6. Максимальное и минимальное напряжение, а также максимальное и минимальное перемещение, отмечены на рисунках красным и синим цветом соответственно. Необходимо отметить, что эти изображения сильно искажены с целью подчеркнуть малые деформации, которые без этих искажений будут незаметны.

Таблица 2 – Результаты расчетов для сборки пустотелой и цельной детали

Модель	Давление на деталь, МПа	Напряжение, кН/м^2		Перемещение, мм
		max	min	max
Пустотелая	0,000059	0,5553	$3{,}471\cdot10^{-2}$	$1{,}721\cdot10^{-7}$
	0,02	1882	117,6	$5{,}834\cdot10^{-4}$
	0,04	3765	235,3	$1{,}167\cdot10^{-3}$
Цельная	0,000059	0,543	$3{,}393\cdot10^{-2}$	$1{,}702\cdot10^{-7}$
	0,02	1841	115	$5{,}77\cdot10^{-4}$
	0,04	3681	230,1	$1{,}154\cdot10^{-3}$

Из рис. 3 и 4 можно сделать вывод, что максимальное напряжение как в пустотелой, так и в цельной деталях приходится на середину верхней части. При нагрузке 0,000059 МПа для обеих деталей не возникает серьезных напряжений. При нагрузке в 0,02 МПа разница напряжений между двумя деталями минимальна: в пустотелой детали – 1882 кН/м^2, в цельной – 1840 кН/м^2. При нагрузке в 0,04 МПа напряжение увеличивается вдвое как с первой деталью, так и со второй: в пустотелой – 3765 кН/м^2, в цельной – 3681 кН/м^2. Минимальное напряжение для обеих деталей приходится на нижнюю часть.

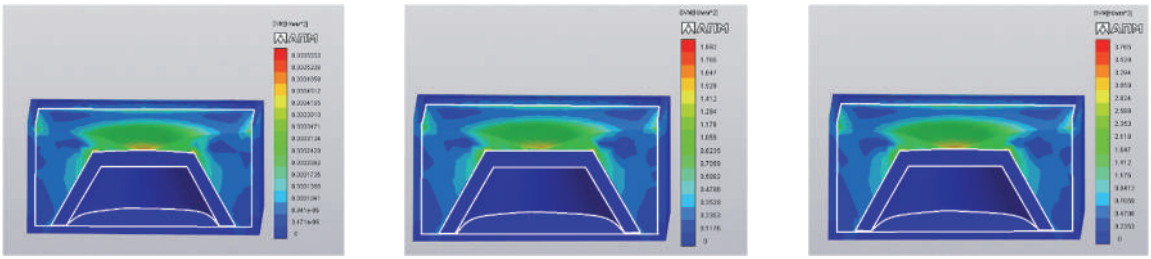


Рис. 3 – Распределение напряжения для пустотелой детали при давлении 0,000059, 0,02 и 0,04 МПа слева на право

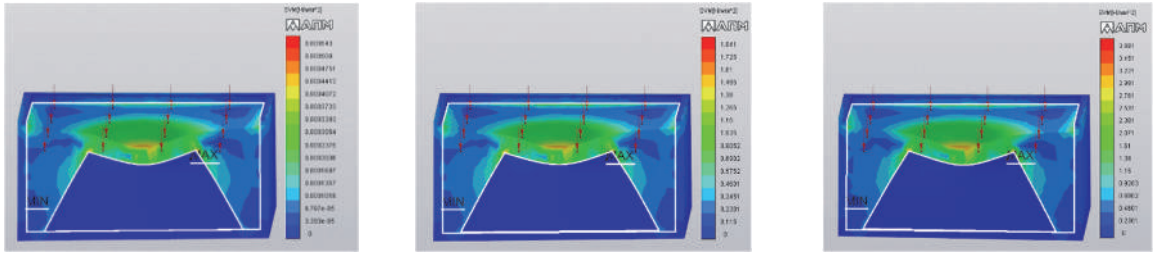


Рис. 4 – Распределение напряжения для цельной детали при давлении 0,000059, 0,02 и 0,04 МПа слева на право

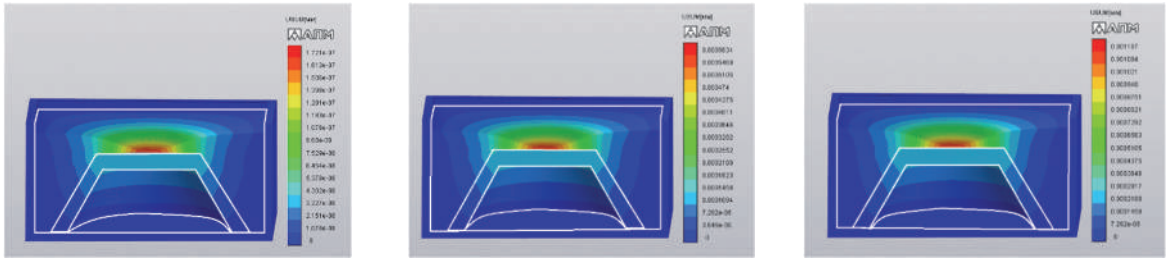


Рис. 5 – Распределение перемещения для пустотелой детали при давлении 0,000059, 0,02 и 0,04 МПа слева на право

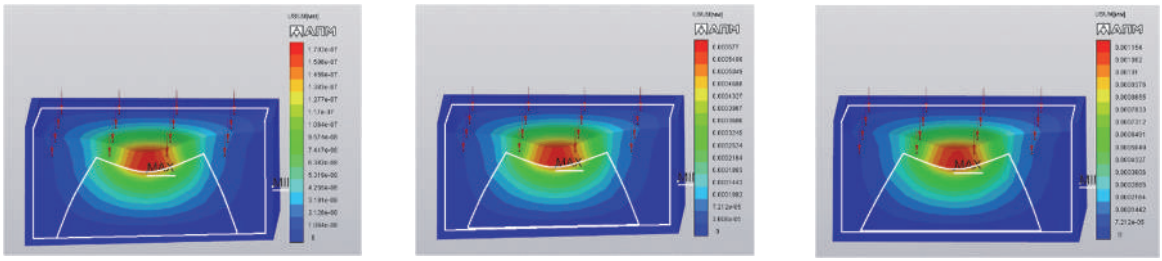


Рис. 6 – Распределение перемещения для цельной детали при давлении 0,000059, 0,02 и 0,04 МПа слева на право

Вывод: проведенное в системе автоматизированного проектирования Компас-3D моделирование нагрузок на склеенные детали (пустотелую и цельную) позволило проанализировать возникающие в них напряжения и перемещения. Исследование показало, как разная геометрия деталей влияет на их поведение под нагрузкой, подтвердив тем самым, что Компас-3D является эффективным инструментом для такого рода прочностных расчетов.

Основные преимущества программы, выявленные в работе:

1. интегрированный подход: расчеты выполняются непосредственно на 3D-моделях, что исключает необходимость переноса данных в другие приложения и экономит время;

2. гибкость настроек: параметры анализа можно изменять для изучения влияния различных факторов на напряжения и деформации;

3. пользовательские материалы: существует возможность задания характеристик нестандартных материалов, таких как композиты;

4. автоматизация отчетности: программа позволяет автоматически генерировать полный отчет о результатах расчета;

5. обширная библиотека: встроенный справочник содержит данные о большом количестве распространенных материалов;

6. масштабируемость сетки: позволяет создавать сетку любого размера, ограничением служит лишь производительность компьютера;

7. доступность: разработана российской компанией «АСКОН» и бесплатна для некоммерческого использования без сложных процедур активации.

Выявленные недостатки:

1. ограниченная нелинейность: программа не всегда точно справляется с моделированием сложных нелинейных свойств материалов (резины, композитов);

2. узкая специализация: будучи в первую очередь системой проектирования, а не анализа, программа менее гибка. Любые изменения в геометрии или параметрах требуют полного перерасчета, что может замедлить итерационный процесс;

3. требовательность к данным: расчет невозможен без полного набора данных о материале;

4. отсутствие средового воздействия: нет возможности моделировать воздействие на деталь через окружающую среду (например, поместив ее в жидкость или газ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология литейного производства: Учеб. / Б.С. Чуркин [и др.] // Под. ред. Б.С. Чуркина. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 2000. – 662 с.

2. Компьютерное моделирование технологических процессов литейного производства / М.Л. Калиниченко [и др.] // Развитие современной науки: опыт, проблемы, прогнозы: сборник статей IX Международной научно-практической конференции 16 января 2025 г. / Междунар. центр научного партнерства; под ред. И.И. Ивановской, Л.А. Кузьминой. – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2025. –С. 85 – 101.

УДК 631.35

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОРМОРАЗДАТОЧНЫХ МАШИН

М.А. Керимов, В.И. Ветушко, К.В. Горецкий, М.М. Керимов
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский ГАУ, г. Санкт-Петербург, Россия

ВВЕДЕНИЕ. В молочном скотоводстве кормораздаточные машины используются в качестве основного устройства для приготовления и раздачи кормосмеси животным. Благодаря точному взвешиванию отдельных компонентов и интенсивному их перемешиванию с помощью таких измельчителей-смесителей-раздатчиков животные получают гомогенный корм необходимой консистенции. Приготовление и раздача корма на животноводческих фермах и комплексах происходит в ежедневном режиме по установленному графику.

Несмотря на массивную конструкцию кормораздаточной машины, степень износа рабочих поверхностей её узлов является достаточно высокой. Основные компоненты кормосмеси, такие как кукурузный силос или сенаж, способствуют активному истиранию внутренней поверхности бункера и особенно износу витков шнека. Поэтому разработка схемотехнических решений, направленных на повышение износостойкости поверхностей рабочих органов кормораздаточной машины, является актуальной задачей.

Цель настоящего исследования – обеспечение надёжности кормораздаточных машин как динамических систем за счёт конструктивно-технологических решений.

Объектом исследования является кормораздаточная машина, предназначенная для измельчения, смешивания и раздачи корма КРС на фермах и комплексах.

Предметом исследования являются инженерно-технические приёмы, обеспечивающие повышение износостойкости высоконагруженных поверхностей рабочих органов кормораздаточных машин.

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Кормораздатчик представляет собой специальный механизм, который измельчает компоненты корма, смешивает их и осуществляет дозированную раздачу смеси крупному рогатому скоту.

Кормораздаточные машины должны соответствовать зоотехническим требованиям.

Кормораздаточная машина как динамическая система должна обладать надёжностью, которая закладывается при проектировании,

реализуется в производстве и поддерживается в эксплуатации. При определении требований к надёжности кормораздаточных машин учитываются соответствующие показатели, достигнутые на системах-аналогах. Оценка уровня надёжности технической системы по критерию «результаты-затраты» производятся в соответствии с выражением

$$G_i(P) = Э_i(P) - З_i(P) \rightarrow max, \quad (1)$$

где Р – показатель надёжности технической системы;

$Э_i$ (Р) – экономический эффект от применения i-го варианта системы, характеризуемой уровнем надёжности Р;

$З_i$ (Р) – затраты, связанные с обеспечением уровня надёжности Р.

Условие (1) определяет совокупность свойств, которые характеризуют успешность выполнения кормораздаточной машиной поставленных задач, т.е. её технологическую надёжность.

Расчётная схема кормораздаточной машины в терминах “вход-выход” представлена на рисунке 1.

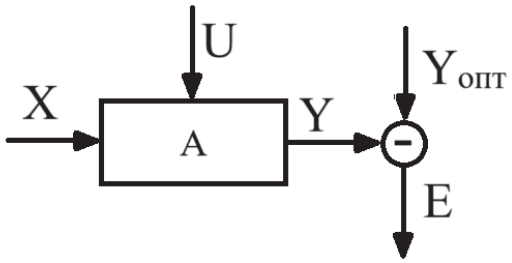


Рис. 1 – Модель функционирования кормораздаточной машины

Принятые обозначения: X – вектор-функция условий работы машины; U -вектор-функция параметров управления; A – оператор динамической системы; Y –вектор-функция выходных переменных; E – отклонения выходной функции от некоторого оптимального значения вектора $Y_{опт}$.

Вектор E характеризует модель отклонений (отказов) системы, т.е. $E= Y-Y_{опт}$. При этом условием безотказной работы будет $E \leq E_{доп}$, где $E_{доп}$ – вектор допускаемых значений показателей качества функционирования кормораздаточной машины.

Кормораздаточная машина работает в циклическом режиме. К числу её высоконагруженных узлов относятся смесительный шнек, боковые поверхности и дно бункера. Износ указанных элементов происходит неравномерно и они выходят из строя независимо друг от друга. Отказ любого из перечисленных подсистем приводит к отказу всей системы в целом.

При нормальном функционировании системы должно выполняться условие:

$$P_1(t) \cdot P_2(t) \dots P_n(t) \geq P_{тр}(t), \quad (2)$$

где $P_1(t), P_2(t), \dots P_n(t)$ – надёжность отдельных подсистем;

$P_{\text{тр}}(t)$ – требуемая надёжность системы.

Таким образом, для решения оптимальной задачи (1) необходимо обеспечить сближение фактической надёжности наиболее нагруженного элемента с требуемой (нормативной) надёжностью системы, чтобы выполнилось неравенство (2).

Существуют кормораздатчики, у которых отдельные части рабочих органов изготавливаются из различных металлов – делаются вставки или накладки из специальных сплавов, которые уменьшают интенсивность износа. К участкам с наибольшим износом относятся кромки шнека, края окна выгрузной заслонки и клинья внутри бункера.

При эксплуатации кормораздаточных машин с целью уменьшения износа рабочих органов, как правило, непосредственно на гладкую поверхность шнека навариваются металлические пластины. Применение твёрдосплавных износостойких накладок, изготовленных по инновационным технологиям, способствует уменьшению трения за счёт изменения физико-механических свойств поверхности смесительного шнека.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Твердосплавные накладки привариваются к поверхностям рабочих органов после достижения определённого износа витка – уменьшения толщины материала на 7 - 8 мм (рис. 2). Срок работоспособности краёв шнека в этом случае будет равен сроку эксплуатации кормораздатчика. Приваривание накладок на этой стадии восстановления работоспособности шнека является наиболее технологичным приёмом.

Рис. 2 – Износ шнека кормосмесителя

Приваривание твёрдосплавных накладок осуществляется в соответствии с разработанной маршрутно-операционной картой:

– осуществляется измерение остаточной толщины материала на внешнем крае смесительного шнека;

– полоскам пластин из твердосплавного металла длиной один метр придают примерную форму витков спирали шнека. При этом в верхней части спирали угол изгиба должен быть больше, чем в нижней. Поскольку

полоска имеет надрезы каждые 160 мм, то процесс гибки осуществляется без излишних усилий;

– металлическую полоску располагают таким образом, чтобы она точно воспроизводила внешний контур смесительного шнека;

– поэтапное проваривание накладки с внешней и внутренней сторон с некоторыми промежутками. Также необходимо заварить поперечные прорези в твердосплавной пластине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1.Надёжность кормораздаточных машин как системный ресурс закладывается при проектировании, реализуется в производстве и поддерживается в эксплуатации. Обеспечение технологической надёжности кормораздатчиков является важным резервом в увеличении продуктивности животных в молочном скотоводстве.

2.Повышение технологической надёжности кормораздатчиков является частью более общей проблемы – повышения эффективности функционирования кормораздаточных машин как динамических систем, причём уровень надёжности в значительной степени определяет их эффективность. Взаимосвязь надёжности и эффективности должна рассматриваться в следующей последовательности: отказ – изменение технологических показателей эффективности – изменение экономических показателей эффективности.

3.Оптимальным вариантом обеспечения требуемого уровня эксплуатационной надёжности является приваривание твёрдосплавных накладок на рабочий орган кормораздаточной машины – смесительный шнек. Указанный способ повышает износостойкость рабочих поверхностей измельчителей-смесителей-раздатчиков.

УДК 62-34

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ДРОССЕЛИРУЮЩИХ КАНАВОК НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ СИЛУ ПОТОКА

Ю.И. Железнякова, Д.Л. Стасенко
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Введение. Эффективность и точность управления в гидравлических системах напрямую зависят от поведения золотникового клапана. Ключевым фактором, влияющим на это поведение, является гидродинамическая сила потока рабочей жидкости, действующая на управляющий элемент (золотник). Данная сила создает нагрузку, противодействующую перемещению золотника, что может снижать точность позиционирования и стабильность системы. Традиционно используемые геометрии дросселирующих канавок (U-образные, треугольные, К-образные) на цилиндрической поверхности запорного элемента обеспечивают ограниченный контроль над этим параметром [1]. В связи с этим актуальной задачей является поиск и исследование новых перспективных конструкций, таких как наклонные канавки, позволяющих кардинально улучшить характеристики системы за счет плавного управления силой потока.

Цель исследования. Исследование влияния геометрии дросселирующих канавок на цилиндрической поверхности запорного элемента, в частности, перспективной конструкции наклонных канавок, на величину и характер изменения гидродинамической силы потока в золотниковых распределителях для повышения точности и плавности управления гидравлическими системами.

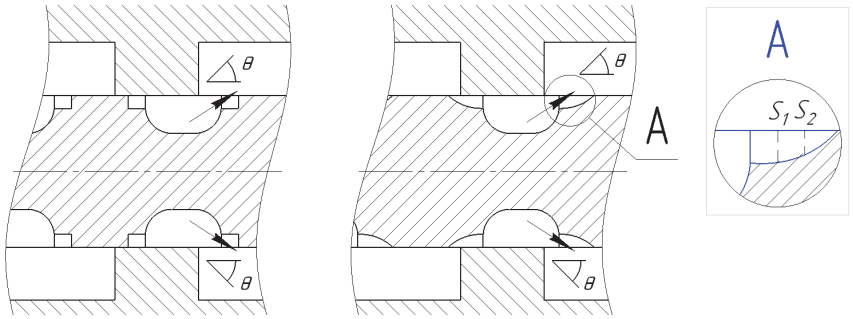
Постановка задачи. Сила потока жидкости, возникающая при работе золотникового распределителя, является критическим фактором, влияющим на точность и стабильность системы управления. Она действует против направления движения золотника, стремясь закрыть клапан, что создает дополнительную нагрузку на управляющие элементы и может снизить точность позиционирования.

Экспериментально установлено, что сила потока минимальна, когда угол наклона струи жидкости, вытекающей из щели клапана, составляет приблизительно 69° [2]:

$$F_{ГД} = \rho \cdot Q \cdot \upsilon \cdot \cos\theta,$$

где $F_{ГД}$ – гидродинамическая сила, направленная вдоль оси золотника; ρ – плотность рабочей жидкости; Q – расход жидкости через рассматриваемое сечение; υ – скорость потока жидкости; θ – угол наклона струи жидкости.

Конструкция с перпендикулярными стенками создает хаотичное поле скоростей, зоны высокого давления и турбулентность, что увеличивает силу воздействия на золотник. Прорывным решением стало применение плавного, изогнутого перехода на внутренней стенке золотника (рис. 1, а), что позволило снизить гидродинамическую силу на золотник почти на 60% [2]. Однако, когда требования к плавности хода и точности позиционирования становятся критичными (например, при работе на полях с высокой неровностью), и таких решений недостаточно.



а) б)

Рис. 1 – Конструкция золотникового распределителя:
а – традиционная конструкция; б – оптимизированная конструкция

Методы исследований. Основным инструментом управления силой потока является конструкция дросселирующих канавок на цилиндрической поверхности золотника. Разная геометрия канавок по-разному влияет на характеристики системы: треугольные и U-образные канавки демонстрируют почти линейный рост силы потока с увеличением открытия клапана, K-образные канавки обеспечивают лучшую линейность расхода, что является желательной характеристикой для точного управления, комбинированные канавки (U+K) могут вызывать колебания расхода в точке перехода между формами. Моделирование (CFD-анализ) и эксперименты показывают, что вблизи полного открытия клапана картина резко меняется: сопротивление потоку падает, а сила потока может скачкообразно возрастать [3].

Однако недостатком типов таких канавок является то, что их пропуская способность и, как следствие, формируемая сила потока определяются исключительно площадью проходного сечения, открываемого при смещении золотника. Повышение точности и плавности управления потоком достигается за счет применения наклонных канавок на цилиндрической поверхности золотника. В отличие от типов канавок с постоянным профилем, у наклонной канавки глубина и/или угол наклона стенки плавно изменяются по квадратичной зависимости и поперек оси, и по длине золотника:

$$S_n = S_{n+1}^2,$$

где S_n – площадь поперечного сечения канавки в сечении n (рис. 1, б).

Это позволит точно проектировать изменение гидродинамической силы в зависимости от хода золотника, что приведет к более линейному изменению скорости потока и давления в межзолотниковой полости и позволит уменьшить пиковое значение силы потока на определенный участок хода, снизив максимальную нагрузку на управляющий элемент и повысив точность.

Результаты и обсуждение. Таким образом, установлено, что традиционные геометрии канавок (треугольные, U-образные) на цилиндрической поверхности запорного элемента демонстрируют почти линейный рост силы потока, а K-образные и комбинированные (U+K) могут вызывать колебания расхода в точке перехода между формами. CFD-анализ показал, что вблизи полного открытия клапана сопротивление потоку падает, а сила потока может скачкообразно возрастать. Конструкция с перпендикулярными стенками создает хаотичное поле скоростей, зоны высокого давления и турбулентность, что увеличивает силу воздействия на золотник. Применение плавного, изогнутого перехода на внутренней стенке является эффективным решением для ее снижения.

На основании этого предложена конструкция наклонной канавки на цилиндрической поверхности золотника, у которой глубина и/или угол наклона стенки плавно изменяются по квадратичной зависимости как вдоль оси золотника, так и поперек. Это позволяет не просто управлять площадью проходного сечения, а точно проектировать закон изменения гидродинамической силы в зависимости от хода золотника. Также показано, что ключевым преимуществом наклонных канавок является возможность снижения пикового значения силы потока на определенных участках хода, что ведет к снижению максимальной нагрузки на управляющий элемент. Это, в свою очередь, позволяет добиться более линейного изменения скорости потока и давления, повышая точность и плавность управления.

Выводы. Гидродинамическая сила потока является критическим параметром, определяющим точность и стабильность работы золотниковых распределителей, и требует активного управления путем оптимизации геометрии дросселирующих канавок. Традиционные геометрии канавок на цилиндрической поверхности запорного элемента не позволяют гибко управлять силой потока по ходу золотника и могут приводить к ее скачкообразным изменениям. Конструкция наклонных канавок, основанная на плавном изменении профиля по квадратичному закону, представляет собой эволюционный шаг в проектировании, обеспечивающий точный контроль над характеристиками клапана. Применение наклонных канавок является перспективным направлением для создания высокоточных и надежных гидравлических систем, где предъявляются повышенные требования к плавности хода, точности позиционирования и снижению шума во всем рабочем диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стасенко, Д. Л. Теоретические положения формирования проточной части гидроаппаратуры при форсировании по давлению / Д. Л. Стасенко, Д. В. Лаевский. – Минск: Актуальные вопросы машиноведения. Выпуск 1, 2012. – 282 с.

2. Башта, Т. М. Машиностроительная гидравлика / Т. М. Башта – М.: Машиностроение, 1971. – 350 с.

3. Ye, Y.; Yin, C.-B.; Li, X.-D.; Zhou, W.-J.; Yuan, F.-F. Effects of groove shape of notch on the flow characteristics of spool valve. Energy Convers. Manag. 2014, 86, 1091–1101. [CrossRef].

УДК 65.011.56

МЕТОДИКА МИГРАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ДАННЫХ: ПЕРЕХОД НА ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Д.В. Дубовский, В.Б. Ковалевский
ОДО «КЭЛС ЦЕНТР ПРО-Технолоджис»,
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация: В свете требований по импортозамещению и необходимости интеграции с современными ERP/MES-системами многие промышленные предприятия сталкиваются с задачей переноса унаследованных инженерных данных из зарубежных CAD и PLM-систем в отечественные программные комплексы. В данной статье рассматривается комплексная методика миграции данных, основанная на практическом опыте переноса информации из систем PTC Windchill и CREO в экосистему АСКОН (КОМПАС-3D, ЛОЦМАН:PLM, ПОЛИНОМ:MDM). Детально описывается реализация процесса с использованием специализированных программ миграции, архитектура решения, ключевые этапы, обеспечивающие повторяемость и минимальные риски при выполнении проекта.

Введение

Современная промышленность, особенно в оборонно-промышленном комплексе (ОПК), сталкивается с рядом вызовов, делающих миграцию инженерных данных не просто желательной, а необходимой. Среди них:

- **Гострebования к импортозамещению:** Запрет на использование иностранного инженерного ПО при проектировании изделий ОПК.
- **Устаревание и отсутствие поддержки:** Невозможность дальнейшего сопровождения унаследованных-прикладных систем и их совместимости с современным системным ПО (UNIX).
- **Необходимость интеграции:** Требования по бесшовному обмену данными с системами управления предприятием (ERP, MES).

Миграция в данном контексте – это не просто конвертация файлов, а комплексный проект по переносу всей связанной информации: геометрии, атрибутов, структуры изделий, данных нормативно-справочной информации (НСИ) и электронных структурированных изделий (ЭСИ) с сохранением целостности и истории данных. Ключевым элементом успеха является разработка и применение специализированных программ (адаптеров и скриптов), автоматизирующих процесс.

1. Постановка задачи и планирование миграции

Основная цель миграции – обеспечить непрерывность производственных процессов за счет переноса изделий в новый, сопровождаемый программный комплекс. Ключевые требования к процессу включают:

- **Миграция геометрии и атрибутов:** Полный перенос трехмерных моделей, сборок и всей сопутствующей атрибутивной информации.
- **Миграция НСИ:** Наполнение справочников новой системы унаследованной информацией о стандартных и типовых изделиях (СтИ).
- **Миграция данных ЭСИ:** Перенос состава изделий и дополнительных атрибутов из PDM-систем.
- **Методическая повторяемость:** Процесс должен быть стандартизирован, автоматизирован и доступен для сотрудников предприятия.

Планирование миграции является отдельным критически важным этапом. Он включает:

- Подбор контрольных примеров для проверки решения.
- Проверку и доработку интеграционных скриптов и программ миграции.
- Подготовку отчетности и методических указаний для сотрудников.
- Обучение персонала.
- Опытную эксплуатацию на одном из изделий.

Общая организация процесса строится по следующим принципам:

- Миграция выполняется для отдельных изделий или подсборок.
- После переноса изделие блокируется от изменений в исходной системе.
- Процесс является однонаправленным.

2. Общая архитектура миграционного решения и реализация программ

Архитектура решения представляет собой последовательность взаимосвязанных шагов, обеспечивающих сквозной перенос данных из исходных систем (Windchill, CAD) в целевую экосистему АСКОН. Ключевыми компонентами являются **специализированные программы миграции (адаптеры)**, разработанные на основе API соответствующих систем, и **правила импорта** в интеграционной шине предприятия (ИШП) ЛОЦМАН:PLM.

Реализация процесса обеспечивается следующим программным комплексом:

1. **Программы выгрузки из Windchill:** Формируют файлы в формате **XML по спецификации АСКОН**, содержащие данные по НСИ, составу изделий и атрибутам.

2. **Интеграционная шина (ИШП) ЛОЦМАН:PLM:** С помощью **настроенных правил импорта** выполняет загрузку данных из XML-файлов в целевые системы. Например, правило импорта НСИ загружает данные в ПОЛИНОМ:MDM, а правило импорта состава – актуализирует структуру изделия в ЛОЦМАН:PLM.

3. **Программы миграции в КОМПАС-3D:** Набор скриптов, работающих в среде КОМПАС-3D через API, которые обрабатывают импортированную геометрию и структуру.

3. Ключевые этапы методики миграции

3.1.Подготовка к миграции

Процесс начинается с подготовки данных в исходной системе:

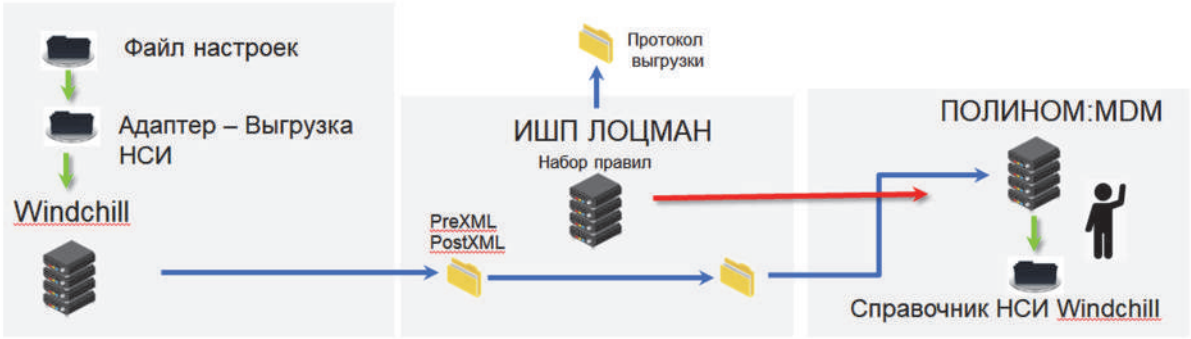
1. **Блокировка изделия** в PDM Windchill от внесения изменений.

2. **Экспорт изделия** из CAD-системы (CREO) в формат **STEP AP242**. Этот формат критически важен, так как позволяет сохранить не только геометрию, но и семантическую информацию: атрибуты, допуски, обозначения шероховатости (PMI – Product and Manufacturing Information).

3. **Сохранение файлов** в сетевой папке для дальнейшей автоматической обработки.

3.2. Миграция нормативно-справочной информации (НСИ)
Цель этапа – автоматизированная синхронизация и наполнение системы ПОЛИНОМ:MDM данными о стандартных изделиях.

- **Экспорт: Программа миграции** на стороне Windchill анализирует состав мигрируемого изделия и выгружает информацию по НСИ в **XML-файлы в формате АСКОН**.
- **Импорт: Система ИШП ЛОЦМАН:PLM с помощью настроенных правил импорта** загружает данные из XML-файлов в ПОЛИНОМ:MDM в отдельный справочник, сохраняя структуру и атрибуты.
- **Верификация:** Администратор ПОЛИНОМ анализирует импортированный справочник и выполняет **сопоставление** с существующими стандартными справочниками. При обнаружении аналога, геометрическая модель НСИ из Windchill заменяется на параметрическую модель из стандартного справочника АСКОН.
- **Результат:** В системе гарантированно присутствуют все НСИ, входящие в изделие, с параметрами из исходной системы.

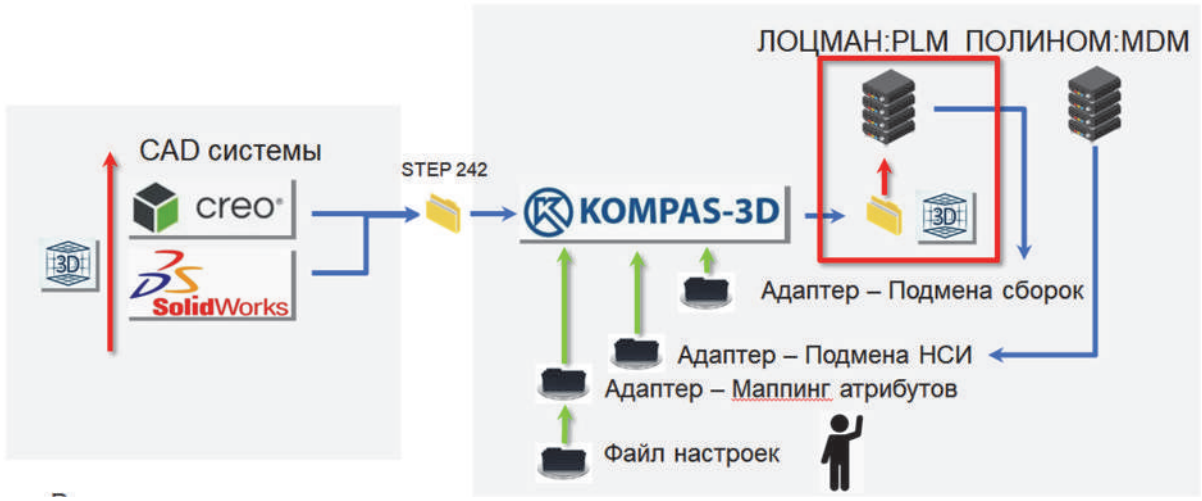


3.3. Миграция конструкторского состава и геометрии. Это центральный этап, выполняемый в среде КОМПАС-3D с использованием набора программ миграции (скриптов).

1. **Импорт в КОМПАС-3D:** В КОМПАС импортируется структура, геометрия и атрибутивный состав изделия в формате STEP 242.
2. **Обработка программами миграции:**

- **Привязка атрибутов (Программа 1):** Производится привязка значений импортированных атрибутов к стандартным свойствам КОМПАС-ЛОЦМАН на основе таблицы маппинга.
- **Подмена НСИ (Программа 2):** Производится подмена оригинальных ДСЕ (детали, сборочные единицы) на НСИ из справочника ПОЛИНОМ:MDM. Программа ищет соответствия по наименованию и атрибутам и заменяет геометрию с сохранением позиционирования.
- **Подмена заимствований (Программа 3):** Производится подмена деталей и подсборок на ранее импортированные в ЛОЦМАН:PLM. Это исключает дублирование данных в системе.

3. **Загрузка в ЛОЦМАН:PLM:** Обработанная сборка загружается в систему управления данными.

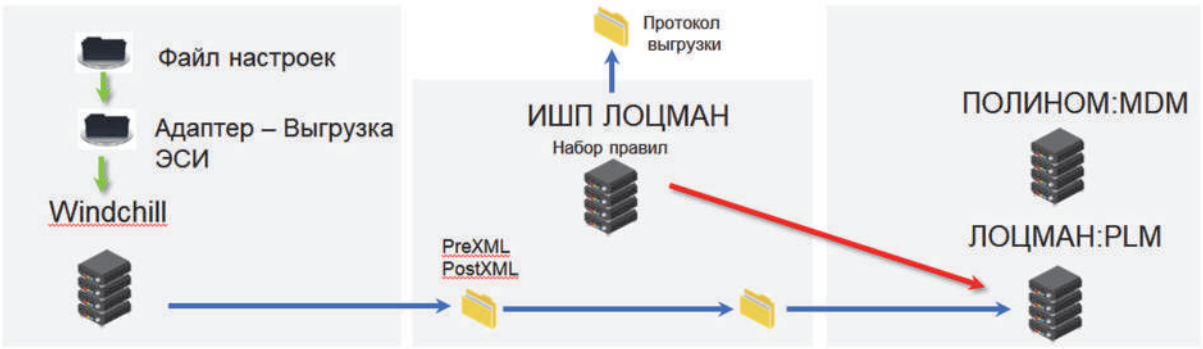


3.4. Миграция и синхронизация состава изделия из PLM
Цель этапа – финальная синхронизация и дополнение состава изделия в ЛОЦМАН данными из Windchill, которые не были учтены на предыдущих шагах.

1. **Экспорт из Windchill: Программа миграции** формирует XML-файл с полной структурой изделия (Product Structure) и связанными атрибутами.
2. **Синхронизация через ИШП: Система ИШП ЛОЦМАН:PLM с помощью настроенных правил импорта** выполняет синхронизацию состава изделия в ЛОЦМАН:PLM с Windchill. В ходе этого процесса:

- **Актуализируется состав изделия:** Добавляются отсутствующие компоненты, учитывается иерархия.
- **Передаются дополнительные атрибуты:** Загружаются атрибуты, которые не были переданы через STEP (например, атрибуты на связях, номера разделов спецификации).
- **Передаются связанные документы:** В систему загружаются вторичные представления – чертежи, спецификации, протоколы в формате PDF.

3. **Верификация в КОМПАС:** Сборка открывается из ЛОЦМАН в КОМПАС-3D для финальной проверки корректности геометрии, состава и атрибутов.



4. Результаты и ограничения методики

Результатом успешной миграции является полное и корректное представление изделия в новой системе:

- Состав изделия в ЛОЦМАН:PLM с полным набором атрибутов из CAD и PDM.
- СтИ заменены на параметрические модели из ПОЛИНОМ:MDM.
- Исключено дублирование ранее загруженных компонентов.
- Сформирована корректная спецификация, дополненная данными из Windchill.
- Геометрия оригинальных деталей сохранена в замороженном (непараметрическом) виде.
- Все данные находятся под версионным контролем.

Ограничения методики в основном связаны с особенностью формата STEP:

- Не передается дерево построения (история) параметрических моделей.
- Не передаются таблицы семейств деталей.
- Не сохраняются привязки и зависимости в сборках (сохраняется только конечное положение компонентов).
- Резьбы и некоторые элементы оформления могут передаваться не полностью.
- Чертежи мигрируют только как вторичные представления в PDF.

Заключение

Представленная методика предлагает структурированный и повторяемый подход к решению сложной задачи миграции инженерных данных. Ключевым элементом успешной реализации является разработка комплекса **программ миграции**, которые взаимодействуют со **стандартными механизмами импорта ИШП ЛОЦМАН:PLM**. Данный подход, основан на тесной интеграции программных скриптов и штатных возможностей платформы АСКОН.

УДК 631.3.022

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОЙ РАБОТЫ ЛЕЗВИЯ ИЗМЕЛЬЧАЮЩИМ АППАРАТОМ БАРАБАННОГО ТИПА

П.Е. Родзевич, К.В. Ридкина
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

При резании однородных, упруго-вязких материалов критическое усилие $F_{кр}$, при котором завершается процесс сжатия растительного материала и начинается его резание, является максимальным из всех усилий, возникающих в процессе резания. Критическую силу можно представить выражением [1]

$$F_{кр} = F_{рез} + F_{вред},$$

где: $F_{рез}$ – сила резания растительной массы; $F_{вред}$ – сила сопротивления.

Силу $F_{рез}$ можно определить как произведение площади заточенной кромки лезвия $S_{л}$ на разрушающее напряжение $\sigma_{р}$:

$$F_{рез} = F_{л}\sigma_{р} = \delta l \sigma_{р},$$

где: δ – толщина кромки лезвия; l – длина лезвия.

Сила сопротивления $F_{вред}$, представляет собой силу вредных сопротивлений, связанных с деформацией перерезаемого слоя и трения фасок лезвия ножа длиной l при внедрении его в слой растительной массы. Силу сопротивления согласно [1] можно записать в виде

$$F_{вред} = \frac{E}{2} \cdot \frac{h_{сж}^2}{h} \cdot \left[tg\beta + f \cdot \sin^2 \beta + \mu \cdot \left(f + \cos^2 \beta\right)\right] l,$$

где: E - модуль продольной упругости первого рода; $h_{сж}$ – величина слоя растительной массы, сжатой лезвием перед началом резания; h – высота слоя растительной массы перед деформированием лезвием; β – угол заточки лезвия ножа; μ – коэффициент Пуассона; f – коэффициент трения материала о лезвие ножа.

Коэффициент полезной работы λ лезвия представляет собой отношение полезной работы резания $A_{рез}$, ко всей работе, затрачиваемой при резании, и может быть записан в виде

$$\lambda = \frac{A_{рез}}{A_{рез} + A_{сж}},$$

где: $A_{сж}$ – работа предварительного сжатия слоя.

Работу $A_{рез}$ резания можно определить выражением [1]:

$$A_{рез} = F_{рез}(h - h_{сж}) = \delta l \sigma_p (h - h_{сж}).$$

Работа сжатия $A_{сж}$ может быть определена как работа критической силы $F_{кр}$, предшествующей началу резания растительной массы, к деформации слоя

$$A_{сж} = \frac{F_{кр}}{2} h_{сж}.$$

Тогда, можно записать выражение для определения коэффициента полезной работы лезвия в виде

$$\lambda = \frac{\delta l \sigma_p (h - h_{сж})}{\delta l \sigma_p (h - h_{сж}) + \frac{\delta l \sigma_p + F_{вред}}{2} h_{сж}}.$$

С учетом преобразований получим

$$\lambda = \frac{2\delta l \sigma_p (h - h_{сж})}{\delta l \sigma_p (2h - h_{сж}) + F_{вред} h_{сж}}.$$

Проведены расчеты по определению критической силы резания и коэффициента полезной работы лезвия ножа длиной l = 200 мм, при угле заточки β = 30º, для толщины кромки лезвия δ = 0,1 мм, а также от изменения величины сжатого слоя h от 5 до 20 мм при различной высоте H слоя растительной массы (кукуруза, слой). Модуль упругости $E = 36{,}3 \cdot 10^6$ Па; разрушающее напряжение σ_p = 19,3 МПа; коэффициент трения (динамический) f = 0,47; коэффициент Пуассона μ=0,071. Результаты расчетов представлены в таблице.

Таблица – Результаты расчетов критической силы резания и коэффициента полезной работы лезвия

Величина сжатого слоя h, м	Критическая сила резания, Н			Коэффициент полезной работы		
	H = 0,1 м	H = 0,15 м	H = 0,20 м	H = 0,1 м	H = 0,15 м	H = 0,20 м
0,005	1095	953	858	0,931	0,944	0,953
0,010	3223	2655	2277	0,683	0,734	0,770
0,015	6769	5492	4641	0,393	0,455	0,507
0,020	11730	9464	7951	0,208	0,257	0,300

Из таблицы результатов расчета видно, что критическая сила резания зависит от величины слоя растительной массы, подвергающееся предварительному сжатию. Так, для величины слоя массы H = 0,1 м критическая сила изменяется от 1095 Н до 11730 Н при h = 5 мм и h = 20 мм,

соответственно. Для высоты слоя $H = 0{,}2$ м критическая сила изменяется от 858 Н до 7951 Н. Это говорит о значительных затратах энергии на предварительное деформирование слоя растительной массы. Этот эффект также заметен и по величине коэффициента полезной работы лезвия.

На рисунке представлен график изменения полезной работы лезвия ножа при резании растительной массы.

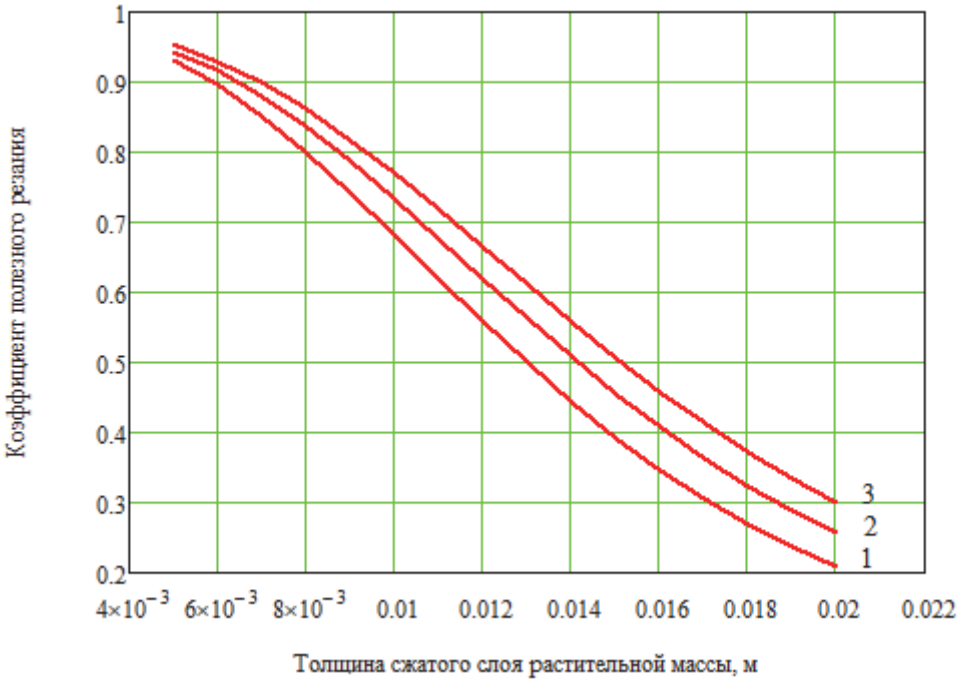


Рисунок – График изменения коэффициента полезной работы лезвия ножа при различной толщине сжатого слоя:
1 – высота слоя $H = 0{,}1$ м; 2 - высота слоя $H = 0{,}15$ м;
3 - высота слоя $H = 0{,}2$ м

Таким образом, можно сказать что, при резании слоя растительной массы всегда имеет место предварительное сжатие его лезвием, следовательно, коэффициент полезной работы лезвия всегда меньше единицы. Увеличение этого коэффициента характеризует улучшение процесса резания, так как суммарная работа A, затрачиваемая на процесс предварительного сжатия и резания, с повышением значения λ уменьшается. Кроме того, необходимо стремиться к уменьшению величины $h_{сж}$ сжимаемого слоя, поступающего из питающего аппарата кормоуборочного комбайна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Резник, Н.Е. Кормоуборочные комбайны / Н.Е. Резник. – М.: «Машиностроение», 1980. – 375 с.

2. Родзевич П.Е. Влияние углов установки на напряженно-деформированное состояние ножа измельчающего барабана

кормоуборочного комбайна / П.Е. Родзевич, В.В. Миренков, В.Ф. Хиженок, Е.П. Шельманова // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого, г. Гомель. – 2016. – №1. – С. 31-37.

3. Родзевич П.Е. Влияние сжатого слоя растительной массы на критическую силу резания // Современные проблемы машиноведения: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22 окт. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, ПАО «Компания» «Сухой» ОКБ «Сухого»; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 60-63.

УДК 621.838:621.891

ТЕПЛОВАЯ НАГРУЖЕННОСТЬ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ДИСКОВ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ТОРМОЗОВ АВТОМОБИЛЕЙ

П.Е. Родзевич
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

В настоящее время на автомобилях устанавливаются барабанно-колодочные, дисково-колодочные со сплошным и вентилируемым дисками. Главным элементом тормоза такого типа является тормозной диск, к которому прикладывается усилие исполнительного механизма. Поскольку существующие автомобильные тормоза используют трение в качестве основного принципа действия, между диском и тормозным механизмом находится колодка, покрытая слоем фрикционного материала (накладка).

К росту эффективности любых тормозов препятствует температура в паре трения. Чем интенсивнее автомобиль тормозит, тем больше выделяется тепла и тем больше нагреваются детали тормозного механизма. Для обычной тормозной колодки это приводит к потере фрикционных свойств за счет снижения коэффициента трения из-за оплавления поверхностей и разрушения связующего во фрикционной накладке.

Диск также нагревается, что приводит к нарушению формы его рабочей поверхности, ее короблению, следствием чего становится осевое биение диска, передаваемое на руль и тормозную педаль. При нагреве, диск деформируется за счет разницы длин наружного и внутреннего контура. У внутреннего она больше, следовательно, и линейное тепловое расширение также больше. Именно череда таких подъемов и опусканий при остывании и приводит к деформации диска. Чтобы уменьшить такой эффект, у дисков в местах соединений обода со ступицей с наружной стороны делаются галтели или проводятся другие мероприятия, увеличивающие длину наружного контура.

Вентилируемый диск (рис. 1) позволил повысить эффективность торможения за счет более благоприятных температурных режимов пары трения. У вентилируемого диска существенно увеличена поверхность, с которой он отдает тепло окружающей среде. Вентилируемый тормозной диск также уменьшает температурную нагрузку на ступичный подшипник.

Увеличению поверхности рассеивания тепла способствует перфорация дисков, при которой на диске изготавливают технологические канавки глубиной до 2…3 мм и отверстия в радиальном направлении или по дуге окружности. Технологические канавки и отверстия снижают вес диска, способствуют более эффективному снижению его температуры при работе, способствуют удалению газов и продуктов износа, образующихся при трении фрикционных накладок о диск.

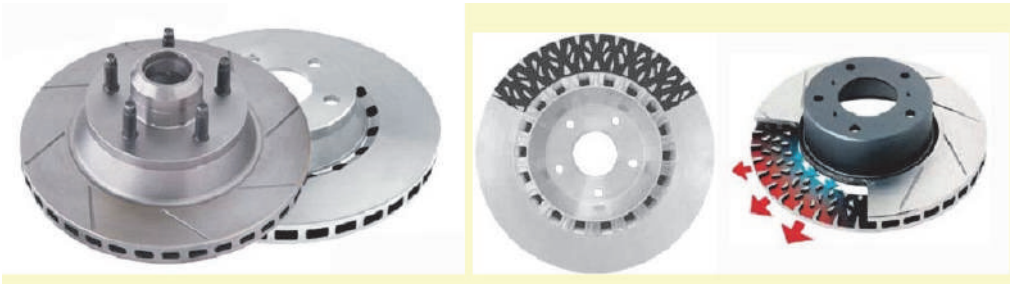


Рис. 1 – Вентилируемый диск и его устройство

Кроме того, перфорация не допускает «всплытия» тормозной колодки при попадании воды на рабочую поверхность диска в дождь или при проезде через лужи. Оказавшаяся на пути колодки вода выдавливается внутрь диска, откуда она выбрасывается наружу под действием центробежной силы.

В работах [1-3] рассмотрена методика теплового расчета фрикционных тормозов автомобилей различных марок и моделей. В основе методики лежит определение тепловой нагруженности тормозов по величине средних приращений температур на поверхности трения

$$\vartheta_2(0,Fo_2)-\vartheta_0=\frac{(1-\alpha_T)q_0h_2}{\lambda_2}\Theta_2'(0,Fo_2)-\frac{(1-\alpha_T)q_0h_2^3}{t_T\lambda_2a_2}\Theta_2''(0,Fo_2), \quad (1)$$

где: $\Theta_2'(0,Fo_2)$, $\Theta_2''(0,Fo_2)$, – безразмерные комплексы, зависящие от числа Фурье Fo_2; h_2 – толщина контртела (полудиска); α_T – коэффициент распределения тепловых потоков,

$$\alpha_T=\frac{K_{вз}\sqrt{\lambda_1c_1\rho_1}}{K_{вз}\sqrt{\lambda_1c_1\rho_1}+\sqrt{\lambda_2c_2\rho_2}}, \quad (2)$$

здесь: $K_{вз}=\frac{A_{a_1}}{A_{a_2}}$ – коэффициент взаимного перекрытия трущихся пар с номинальной площадью контакта A_{a_2} контртела и номинальной площадью фрикционной накладки A_{a_1}.

Показатели теплопроводности, теплоемкости, плотности и температуропроводности фрикционной накладки и диска, соответственно, следующие:

накладка:

$\lambda_1=0{,}96$ Вт/мК; $c_1=1200$ Дж/кгК; $\rho_1=2000$ кг/м^3; $a_1=2{,}0\cdot10^{-7}$ м^2/с;

диск:

$\lambda_2=30$ Вт/мК; $c_2=540$ Дж/кгК; $\rho_2=7300$ кг/м^3; $a_2=7{,}6\cdot10^{-6}$ м^2/с.

Расчет дисково-колодочного тормоза с вентилируемым диском проводился для трех случаев (рис. 2): для цельного диска, диска с технологическими канавками ($N_2=10$ шт) и отверстиями Ø5 мм

($N_1 = 30$ шт), диска с технологическими канавками ($N_2 = 20$ шт) и отверстиями Ø5мм ($N_1 = 60$ шт). Автомобиль двигался с различными скоростями (90, 120, 150 км/ч) по сухой асфальтированной дороге (коэффициент сцепления φ = 0,7). Масса автомобиля $m = 1355$ кг. Тепловая задача рассматривалась без учета теплоотдачи в окружающую среду.

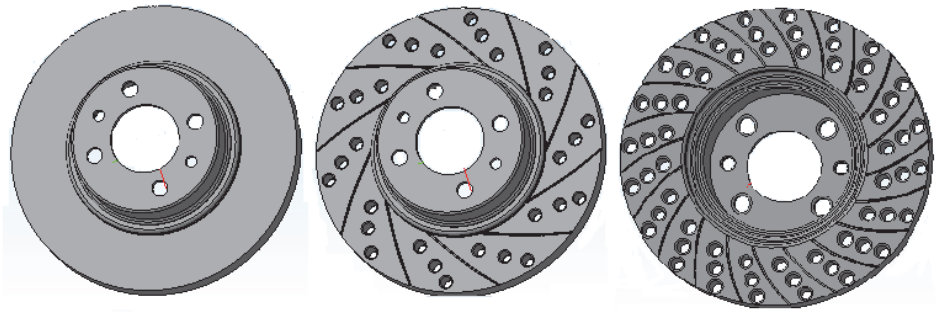


Рис. 2 – Исследуемые диски

Тепловой расчет показал, что наиболее нагруженным является диск с технологическими канавками ($N_2 = 20$ шт) и отверстиями ($N_1 = 60$ шт), у которого приращение температур при скорости 90 км/ч составляет 105,6 К. Это обусловлено уменьшением номинальной площади дорожки трения диска. При увеличении скорости автомобиля также увеличивается и приращение температур. Так при скорости 150 км/ч приращение температур составляет 261,6 К. Результаты расчетов представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

Таблица 1 – Средние приращения температур от начальной скорости

Начальная скорость υ, км/ч	Время торможения *t*, с	Цельный диск	Диск с канавками ($N_2 = 10$ шт) и отверстиями ($N_1 = 30$ шт)	Диск с канавками ($N_2 = 20$ шт) и отверстиями ($N_1 = 60$ шт)
90	0,1	29,7	31,7	33,2
	1,0	78,7	84,2	88,2
	2,3	94,2	100,8	105,6
	3,6	86,2	92,2	96,6
120	0,1	39,7	42,5	44,5
	1,5	128,0	137,0	143,5
	3,0	155,9	166,7	174,7
	4,9	150,6	161,1	168,8
150	0,1	49,8	53,3	55,8
	2,0	188,5	201,7	211,3
	4,0	236,5	253,1	265,1
	6,1	233,4	249,7	261,6

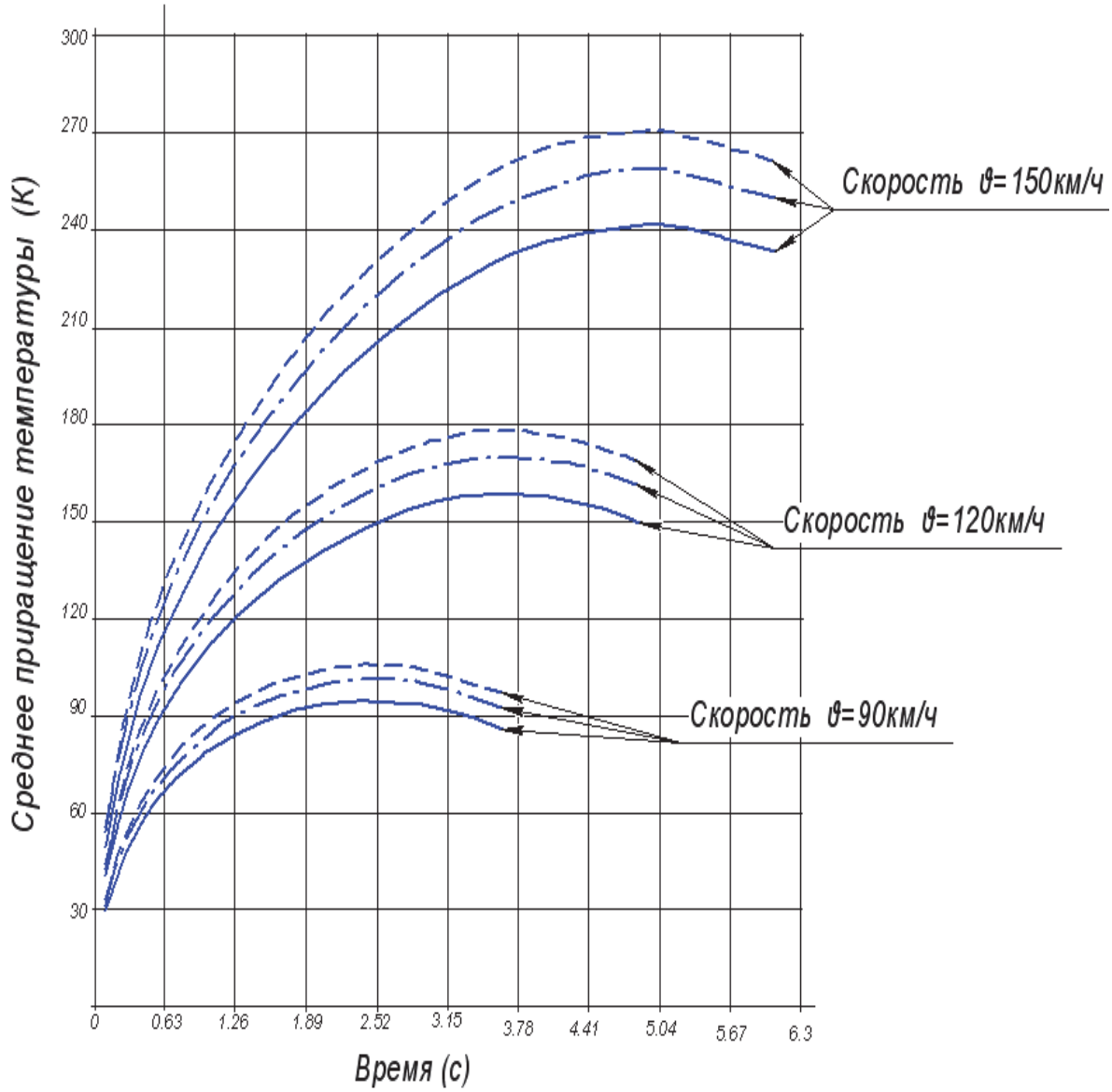


Рис. 3 – Графики зависимости средних приращений температур от времени торможения:

——— Цельный диск

——·—— Диск с канавками количеством $N_2 = 10$ шт и отверстиями Ø5мм количеством N_1 =30 шт

– – – – Диск с канавками количеством $N_2 = 20$ шт и отверстиями Ø5мм количеством N_1 =60 шт

Изменения приращений температур в перфорированных дисках по отношению к цельному приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Изменения приращений температур

Начальная скорость υ, км/ч	Время торможения *t*, с	Диск с канавками ($N_2 = 10$ шт) и отверстиями ($N_1 = 30$ шт)	Диск с канавками ($N_2 = 20$ шт) и отверстиями ($N_1 = 60$ шт)
90	3,6	6,96 %	12,06 %
120	4,9	6,97 %	12,08 %
150	6,1	6,71 %	11,79 %

Проведенные расчеты показывают, что перфорация вентилируемых дисков дисково-колодочных тормозов автомобилей увеличивает тепловую нагруженность поверхности трения в среднем на 7% и 12% по отношению к цельному диску, соответственно. Это связано с уменьшением номинальной площади дорожки трения A_{a_2} за счет изготовления технологических канавок и отверстий. Очевидно, что перфорирование снижают вес диска, способствуют более эффективному удалению газов, жидкости и продуктов износа, образующихся при трении фрикционных накладок о диск.

Представляет интерес расчет приращений температур с учетом теплоотдачи в окружающую среду со стороны дорожки трения и технологического перфорирования. Особенно это актуально для вентилируемых дисков, в которых дополнительная теплоотдача реализуется с внутренней стороны диска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В.А., Сергиенко В.П. Тепловые расчеты тормозов и узлов трения. Гомель: Институт механики полимеров и металлополимерных систем НАНБ, 1999. – 220с., ил.51.

2. Балакин В.А., Сергиенко В.П., Родзевич П.Е. Сравнительный анализ дисково-колодочных тормозов легковых автомобилей. // Трение и износ, 21 (2000), №4, с. 408-41.

3. Балакин В.А., Сергиенко В.П., Родзевич П.Е., Лысенок Ю.В. Сравнительный анализ тормозов грузовых автомобилей. // Трение и износ, 22 (2001), №2, с. 123-127.

4. Родзевич П.Е. Сравнительный анализ и оценка эффективности тормозов микроавтобусов. // Современные проблемы машиноведения: сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – с. 61-65.

УДК 621.373.826

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Б.И. Долгий, Е.М. Акулова
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Современное машиностроение переживает этап интенсивной технологической трансформации, обусловленной необходимостью соответствия возрастающим требованиям к эксплуатационным характеристикам деталей и узлов. В условиях глобальной конкуренции и постоянного роста стоимости материалов особую актуальность приобретают инновационные технологии, позволяющие значительно продлевать ресурс дорогостоящих компонентов технологического оборудования. Статистические данные международных исследований показывают, что до 70% отказов промышленного оборудования происходят по причине износа поверхностных слоев деталей [1], в то время как их основная масса сохраняет достаточный запас прочности для дальнейшей эксплуатации.

Традиционные технологии восстановления, такие как дуговая наплавка, гальванические покрытия и термическая обработка объемного характера, зачастую не обеспечивают необходимого качества восстановленного слоя и сопровождаются значительными термическими деформациями, требующими последующей механической обработки [2]. В этом контексте лазерные методы обработки демонстрируют исключительный потенциал благодаря возможности прецизионного воздействия на материал и минимального теплового влияния на обрабатываемую деталь. Лазерные технологии открывают новые горизонты для восстановления сложнодоступных участков деталей, создания поверхностных слоев с заранее заданными свойствами и существенного повышения эффективности ремонтного производства [3].

Современное состояние лазерных технологий восстановления характеризуется активным развитием и интеграцией нескольких взаимодополняющих направлений. Лазерное термоупрочнение, основанное на фазовых превращениях в твердом состоянии при высокоскоростном нагреве и охлаждении, демонстрирует выдающиеся результаты при обработке различных классов сталей и чугунов [1]. При лазерном воздействии формируется уникальная структура мартенсита с дисперсными карбидами, обеспечивающая твердость до 68 HRC для инструментальных сталей. Глубина упрочненного слоя может варьироваться в пределах 0,3-2,0 мм в зависимости от оптических характеристик лазерного излучения,

режимов обработки и физико-механических свойств обрабатываемого материала [4].

Важнейшими преимуществами данной технологии являются исключительная локальность обработки с минимальной зоной термического влияния 0,1-0,5 мм, отсутствие необходимости применения охлаждающих жидкостей, сохранение исходной шероховатости поверхности в пределах Ra 0,8-1,6 мкм, а также возможность обработки деталей после выполнения финишных операций без последующей механической обработки [1, 4]. Экспериментальные исследования демонстрируют, что лазерное упрочнение позволяет повысить износостойкость чугунных деталей в 10-12 раз, стальных компонентов в 3-8 раз в зависимости от марки стали и режимов обработки.Параллельно отмечается значительный рост коррозионной стойкости (в 2 раза) и усталостной прочности (в 4 раза), что существенно расширяет область применения данной технологии [2, 5].

Лазерная наплавка представляет особый интерес для восстановления геометрических параметров изношенных деталей и создания функциональных покрытий с заданными свойствами [5]. В современной промышленной практике успешно применяются различные модификации этого процесса: порошковая газопорошковая и сухая, проволочная с непрерывной подачей присадочного материала, а также ленточная для наплавки широких поверхностей [6]. Технологические параметры процесса характеризуются скоростью наплавки 0,5-5,0 м/мин, толщиной single слоя 0,1-3,0 мм, шириной дорожки 0,5-5,0 мм при коэффициенте перемешивания основных и присадочных материалов 3-7 % [5, 6]. Такие характеристики обеспечивают минимальную зону термического влияния 0,2-0,8 мм и значительно снижают вероятность возникновения термических деформаций [2].

Особого внимания заслуживают гибридные технологии, комбинирующие лазерную обработку с другими перспективными методами поверхностного модифицирования [4]. Сочетание детонационного напыления с последующим лазерным проплавлением позволяет достичь пористости не более 0,5 % и значительно повысить адгезионную прочность покрытия. Электроискровое легирование в комбинации с лазерной обработкой обеспечивает адгезию не менее 250 МПа, а газотермическое напыление с лазерным упрочнением позволяет достигать твердости до 75 HRC для специальных сплавов [4, 7]. Такие гибридные подходы открывают новые возможности для создания многофункциональных покрытий со сложной архитектурой и градиентными свойствами [7, 8].

Перспективные направления развития лазерных технологий включают аддитивные компьютеризованные методы, характеризующиеся исключительной точностью позиционирования ±0,025 мм, скоростью построения 5-50 см³/ч, минимальной толщиной слоя 0,02 мм с

возможностью работы с многокомпонентными сплавами сложного химического состава [7]. Значительный потенциал демонстрируют современные роботизированные комплексы, включающие 6-осевые роботы с нагрузкой до 500 кг, системы технического зрения с разрешением 0,05 мм, лазерные сканеры для 3D-оцифровки поверхностей и системы адаптивного управления траекторией в реальном времени [3, 7].

Современные интеллектуальные системы управления технологическими процессами оснащаются многоуровневыми системами мониторинга, включающими пирометры для бесконтактного контроля температуры с точностью ±10 °C, оптические датчики контроля плазменных процессов, акустические системы мониторинга формирования наплавленного слоя и нейросетевые алгоритмы адаптивной оптимизации режимов обработки [3, 6]. Такие системы позволяют в автоматическом режиме компенсировать отклонения геометрических параметров восстанавливаемых деталей и обеспечивать стабильно высокое качество наплавленного слоя [3].

Материаловедческие аспекты лазерных технологий охватывают широкий спектр современных порошковых материалов, включая металлические порошки сталей, никелевых и кобальтовых сплавов, керамические материалы на основе карбидов, боридов и нитридов, композитные порошки системы металл-керамика и функционально-градиентные композиции с программируемым распределением свойств по толщине покрытия [5, 8]. Структура и свойства наплавленных слоев характеризуются твердостью 35-65 HRC, износостойкостью в 2-10 раз выше базового материала, коррозионной стойкостью в 1,5-5 раз выше исходных показателей и усталостной прочностью 80-120 % от первоначальных характеристик [5, 6, 8].

Экономическая эффективность внедрения лазерных технологий оценивается через комплексный анализ капитальных и эксплуатационных затрат. Стоимость базового оборудования включает лазерные технологические комплексы ценой 150-500 тыс. € [3], роботизированные системы стоимостью 50-200 тыс. € и вспомогательное оборудование на 30-100 тыс. €. Эксплуатационные показатели демонстрируют снижение стоимости восстановления на 25-40 %, увеличение межремонтного периода в 2-3 раза, экономию материалов на 15-30 % и сокращение времени восстановления на 35-50 % по сравнению с традиционными методами [2, 3].

Экологические аспекты лазерных технологий включают отсутствие вредных выбросов в атмосферу, минимальное образование твердых отходов, высокую энергоэффективность с КПД до 85 % и возможность рециклинга материалов, что полностью соответствует принципам устойчивого развития и ресурсосбережения [1, 3]. Лазерные технологии могут успешно интегрироваться в системы замкнутого производственного цикла, обеспечивая минимальное воздействие на окружающую среду [3].

Проведенное исследование убедительно подтверждает высокую перспективность и технологическую целесообразность применения лазерных технологий для восстановления и упрочнения машиностроительных деталей. Основными конкурентными преимуществами являются минимальные термические деформации, возможность высокоточной локальной обработки и формирование поверхностных слоев с повышенными эксплуатационными характеристиками [1, 2, 5]. Лазерные технологии демонстрируют значительное превосходство над традиционными методами восстановления по точности, качеству получаемых поверхностей и общей экономической эффективности [2, 3].

Перспективы развития связаны с созданием интегрированных гибридных технологических комплексов, глубокой интеграцией роботизированных систем и развитием предиктивных компьютерных моделей процессов лазерной обработки [3, 4, 7]. Особый потенциал имеют аддитивные методы, позволяющие не только восстанавливать геометрические параметры деталей, но и целенаправленно улучшать их функциональные характеристики [7, 8]. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку новых поколений композиционных материалов для наплавки, совершенствование систем автоматического контроля и управления технологическими процессами в реальном времени, а также оптимизацию экономических показателей внедрения лазерных технологий в ремонтное производство [3, 5, 8].

Внедрение этих технологий позволит существенно повысить эффективность ремонтного производства и ресурс восстанавливаемых деталей, что полностью соответствует современным требованиям промышленности к качеству, надежности и экономической целесообразности восстановительных операций [1, 2, 3]. Лазерные технологии восстановления открывают новые возможности для перехода к экономике замкнутого цикла в машиностроении, обеспечивая значительное сокращение расходов на запасные части и уменьшение экологической нагрузки на окружающую среду [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 663 с.

2. Скрипченко А.И., Попов В.О., Кондратьев С.Ю. Возможности лазерного поверхностного модифицирования деталей машиностроения // РИТМ. 2010. №6. С. 23-29.

3. Шастин В.И. Современное состояние и перспективы промышленного использования лазерных технологий в машиностроении //

Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 4 (20). С. 60-66.

4. Иванов В.П., Петров С.М. Гибридные лазерные технологии в машиностроении // Сварочное производство. 2019. № 5. С. 45-51.

5. Smith J., Johnson K. Laser Cladding and Alloying // Surface Engineering. 2020. Vol. 36. No. 4. P. 345-362.

6. Petrov P.V., Sokolov M.K. Advanced Laser Surface Treatment // Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 825. P. 112-125.

7. Kumar S., Singh R. Additive Manufacturing Technologies // Journal of Manufacturing Processes. 2022. Vol. 73. P. 456-470.

8. Chen X., Wang Y. Functional Gradient Materials in Laser Additive Manufacturing // Materials Today. 2023. Vol. 64. P. 123-145.

УДК 534.8

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРЫ 3D ИЗДЕЛИЙ

М.С. Захаренко, Е.М. Акулова
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

В настоящее время активно разрабатываются различные методы аддитивного производства, которые позволяют послойно создавать детали из металлов и сплавов. Технологии 3D-печати металлических изделий на основе проволоки, например, аддитивное электродуговое выращивание (англ. Wire + arc additive manufacturing (WAAM)) [1] и электронно-лучевая аддитивная технология (англ. Electron beam freeform fabrication (EBF3)) [2], привлекают значительное внимание вследствие дешевизны данных методов. Однако в процессе послойного производства материал многократно проходит ряд термических циклов, которые включают в себя нагрев, переплав и охлаждение. Как следствие особенностью изделий, изготовленных с помощью аддитивных технологий, является специфическая микроструктура.

Ультразвуковая обработка (УЗО), заключающаяся в интенсивной пластической деформации поверхности металлов и сплавов ударником, колеблющимся с ультразвуковой частотой, является эффективным методом повышения прочности, износостойкости и усталостной долговечности аустенитных и мартенситных сталей, сплавов на основе меди, алюминия, титана и других материалов, применяемых в машиностроении, в том числе титанового сплава Ti-6Al-4V. Указанное повышение эксплуатационных характеристик конструкционных материалов связано, прежде всего, с нано структурированием их поверхностных слоев и развития в них сжимающих напряжений. Однако остается неизвестной каким образом УЗО будет приводить к изменению микроструктуры и соответственно механических характеристик 3D-напечатанных металлов и сплавов. Целью настоящей работы является исследование влияние ультразвуковой обработки на микроструктуру и фазовый состав 3D-напечатанных образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, а также закономерности их изменения в процессе последующего одноосного растяжении.

На примере исследования образцов из титанового сплава было показано, что упрочнение поверхностного слоя 3D-напечатанных образцов Ti-6Al-4V в процессе УЗО связано как с его интенсивной пластической деформацией, которая подтверждается формированием ярко выраженной текстуры, о чем свидетельствует соотношение пиков α-Ti (002) (2θ =

38.547˚) и (101) (2θ = 40.420˚), так и образованием фазы диоксида титана. Диоксид титана находится в двух модификациях, рутил- с тетрагональной решеткой и брукит с орторомбической решеткой. Детальные исследования, проведенные методом ПЭМ, наглядно продемонстрировали существенное измельчение фаз α-Ti и β-Ti, а также образование наноразмерных оксидов титана TiO2внутри зерен α-Ti в результате УЗО обработки 3D-напечатанных образцов Ti-6Al-4V. Исследована эволюция микроструктуры и фазового состава 3D-напечатанных образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, подвергнутого ультразвуковой обработке, в процессе его одноосного растяжения. Методом РСА показано, что с самого начала нагружения (1.85%) в образцах обработанных УЗО имеют место фазовые превращения, о чем свидетельствует уширение основания пиков и раздвоение максимумов пиков α-Ti (002) (2θ = 38.547˚) и (101) (2θ = 40.420˚). С увеличением степени деформации основания этих пиков продолжает уширяться [2].

Качество сформированного по технологии 3D принтирования изделия, во многом определяется размерами зернистой структуры металла. Один из эффективных способов управления структурой применения технологий ультразвуковой обработки. В процессе кристаллизации в настоящее время ведутся активные исследования внедрение данной технологии в сферу аддитивного производства.

Одна из гипотез, объясняющих измельчение зеренной структуры металла при воздействии ультразвуковой волны - ультразвуковая кавитация [3]. Под действием растягивающих давлений жидкость разрывается и образуется парогазовый пузырек. При наступлении сужающего давления кавитационный пузырек сжимается и схлопывается. При схлопывании локально возрастают давление и температура, и, если схлопывание произошло вблизи кристаллизующегося металла, зерно разбивается на более мелкое.

Существует два режима схлопывания - резонансный и безрезонансный. Для первого случая существует частота УЗ, при которой давление, оказываемое ультразвуком, существенно меньше, чем в случае, где резонанса нет. В зависимости от состава пузырька, процесс, проходящий над ним, различен, следовательно, показатель политропы в различных ситуациях разнится. Возникает вопрос о влиянии показателя политропы на такие пороговые характеристики, как акустическое давление и частота ультразвука, необходимых для схлопывания кавитационных пузырьков [4].

Проводились расчеты для пузырьков, радиусы которых равны 10^{-5} мм, 10^{-6} м и 10^{-7} м. Было установлено, что при росте показателя политропы увеличиваются и пороговые характеристики акустического давления и частоты УЗ, необходимого для схлопывания кавитационных пузырьков. Похожие результаты получены и для пузырьков с радиусами 10^{-5} м и 10^{-7} м. Пороговые значения ультразвука, необходимые для активации кавитации (для пузырьков, радиус которых 10^{-6} мм): частота УЗ

$\approx 3.8 \cdot 10^6$ Гц, акустическое давление $\approx 1.1 \cdot 10^6$ Па.

При изменении показателя политропы, связанного прежде всего с химическим составом пузырька, значения пороговых характеристик УЗ увеличиваются примерно в два раза. Отсюда можно сделать вывод: при подаче УЗ в процессе печати необходимо учитывать теплофизический фактор в виде показателя политропы.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. У. Уильямс, Ф. Мартина, А. С. Эддисон, Дж. Динг, Г. Пардал и П. Колегроув. Аддитивное производство проволоки и дуги. // Технология материаловедения, Том 32, номер 7. 2016. С. 641-647.

2. Дж. К. Уотсон, К. М. Тамингер, Р. А. Харли, Д. Д. Петерсен. Разработка прототипа низковольтной электронно-лучевой системы изготовления произвольной формы. // Материалы 13-го симпозиума SFF. 2002. Р. 458-465.

3. Иванов И. А. и др. Влияние лазерно-индуцированной ультразвуковой обработки на структуру материала при лазерной обработке поверхности для селективного лазерного плавления. // Научные доклады. - 2021. Т.11. -№1. - С.23501.

4. Тодаро К. Дж. и др. Контроль структуры зерен при 3D-печати металла с помощью ультразвука высокой интенсивности // связь с природой. 2020. – Т. 11. – №. 1. – С. 1-9.

УДК 621.891.539.375.6

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

М.К. Ничипоренко, Е.М. Акулова
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Одним из направлений дальнейшего развития технологии машиностроения является совершенствование существующих и разработка новых наукоемких, в том числе и комбинированных технологических методов обработки деталей. Разработка нового метода обработки является творческой задачей и требует использование системного подхода, базирующийся на единстве технологий проектирования, производства и эксплуатации изделий машиностроения.

Большинство методов обработки используют один вид энергии, с одним способом его подвода в зону обработки. Например, широко применяемые методы ППД (обкатывание, выглаживание и т.д.), позволяют применять только механическую энергию при равномерном движении инструмента и детали.

Комбинированные методы обработки (КМО) позволяют совмещать воздействие нескольких физико-химических явлений и способов их подвода в зону обработки и сочетать в себе преимущества различных методов, в том числе модификации поверхностей и нанесения покрытий, тем самым достигая более высокие эксплуатационные свойства деталей. Суть КМО заключается в суммарном воздействии физических и химических явлений. Так, известны различные комбинированные способы, совмещающие обработку ППД с механическим, термическим и химико-термическим воздействиями.

Технологические методы обработки деталей, повышения их износостойкости многообразны. Вместе с тем, весьма перспективным следует считать направление по приданию поверхности трения антифрикционных свойств и создания регулярного микрорельефа.

Многочисленными исследованиями доказаны широкие технологические возможности улучшения эксплуатационных качеств деталей и повышения их долговечности путем нанесения регулярного микрорельефа способом вибрационного накатывания. В результате сложного относительного перемещения деформирующего инструмента относительно обрабатываемой поверхности (рис.1) на последней создаются закономерно расположенные, тонко управляемые, аналитически рассчитываемые микрорельефы. За счет одновременного независимого варьирования значений большого числа параметров режима вибрационного накатывания

становится возможным образования регулярных микрорельефов различных видов с повышенной маслоемкостью. Однако высота выдавливаемых выступов ограничена физико-механическими свойствами металла, что ограничивает возможность использования данного способа в ремонтном производстве.

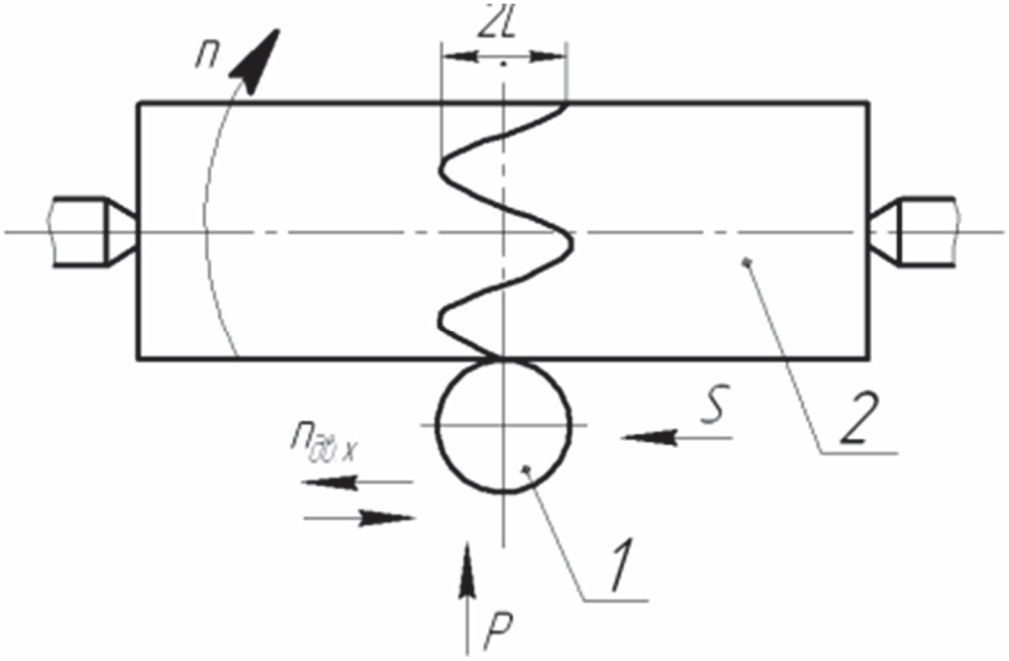


Рис. 1 – Схема вибрационного накатывания
1 – деформирующий элемент (шарик); 2 – деталь; n – частота вращения детали; S – подача шара за один оборот заготовки; nдв.х – число двойных ходов (циклов осцилляций); L – амплитуда осцилляций; P – усилие вдавливания шарика

Открытие избирательного переноса при трении легло в основу разработки методов повышения износостойкости поверхностей трения и долговечности деталей, одним из которых является финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО). Сущность ФАБО состоит в том, что поверхность трения деталей покрывают тонким слоем латуни, меди или бронзы. Покрытия наносят путем трения латунного, медного, бронзового прутка (инструмента) о поверхность детали (рис.2), смазывая при этом поверхность трения технологической жидкостью. При трении материал прутка (инструмента) переноситься на поверхность детали, вследствие чего она приобретает высокие антифрикционные свойства. Реализация метода ФАБО предъявляет определенные требования к шероховатости поверхностей трения.

Предпосылкою к целесообразности заполнения маслоемких поверхностей антифрикционными материалами является способ обработки гильз цилиндров методом антифрикционного плосковершинного хонингования [2]. На поверхности гильзы цилиндров последовательно выполняют черновое и чистовое хонингование. Полученный в результате обработки микрорельеф представляет собой чередование глубоких рисок для размещения смазки и плоских плато, увеличивающих необходимую относительную опорную длину профиля.

Последующей операцией, которая выполняется также на хонинговальном станке, является нанесение фрикционным методом приработочного антифрикционного покрытия.

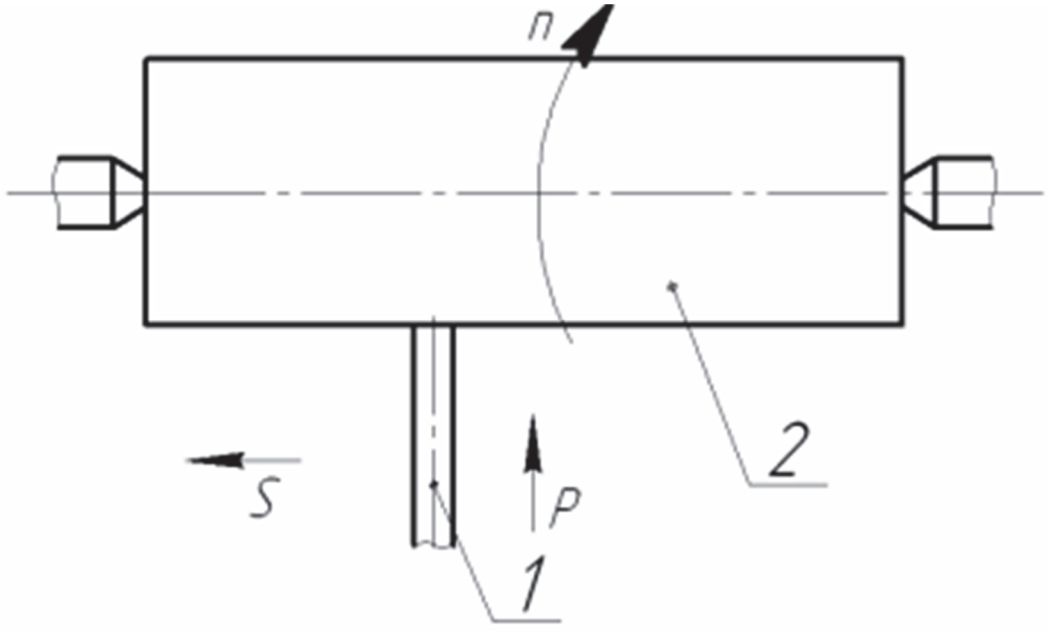


Рис. 2 – Схема ФАБО

1 – инструмент; 2 – деталь; p – усилие прижатия натирающего элемента; n – частота вращения детали; S – продольная подача инструмента

Анализ схем обработки поверхностей деталей (рис. 1, 2) позволяет говорить о возможности и целесообразности использования совмещенной обработки ППД с процессами, протекающими при фрикционно-механическом нанесении покрытий.

На наш взгляд, весьма эффективным методом обработки поверхностей трения может быть комбинированная технология обработки, включающая вибрационное накатывание и нанесение антифрикционного материала фрикционно-механическим способом [3]. На первом этапе наноситься регулярный микрорельеф, увеличивая маслоемкость и снижая силы трения. Вторым этапом технологии, также снижающий силу трения и износ в зоне контакта служит ФАБО, частным случаем которой является фрикционно-механическое латунирование.

Заключение. В результате исследования микрорельефа и субповерхностного слоя деталей, обработанных традиционным и современным хонингованием, было установлено, что применение оптимизированного абразивного инструмента приводит к интенсификации пластического деформирования и формированию регулярной опорной текстуры. Контролируемая геометрия абразивных зерен в связке способствует уменьшению шероховатости обработанной поверхности, увеличению ее несущей способности и формированию устойчивой удерживающей структуры, оптимальной для работы в условиях жидкостного трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.И.Черновол, И.В.Шепеленко.: Комбинированный метод обработки поверхностей трения 2011 выпуск 24 ч.2.

2. Чеповецкий И.Х. Триботехнология формирование поверхностей. К.: Наукова думка, 1989. – 256 с

3. Патент України на корисну модель №52699, C23D 5/00. Спосіб нанесення антифрикційних покрить/ Кропівний В.М., Шепеленко І.В., Чернявський О.В. [та ін.] – Опубл. 10.09.2010, Бюл.№17.

УДК 621.9.048

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

И.В. Жиренок, Е.М. Акулова
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Магнитно-электрическое шлифование (МЭШ) является способом комбинированной обработки токопроводящих материалов, сочетающим процессы абразивного микрорезания с электроконтактными и/или электроэрозионными явлениями при воздействии на зону обработки магнитного поля. Физическая сущность процесса МЭШ заключается в механическом контактировании абразивного токопроводящего инструмента с поверхностью детали, замыкании электродов (инструмент - деталь) продуктами шлифования по локальным пятнам контакта, расплавлении контактных мостиков теплотой электротоков и образовании разрядов с последующими электроэрозионными явлениями, происходящими под воздействием внешнего магнитного поля [1, 2]. Образование поверхности при МЭШ происходит в результате микрорезания и пластического оттеснения металла зернами абразива, электроконтактного расплавления стружки и оплавления поверхности, электрозионных явлений и воздействий магнитного поля на расплав и продукты эрозии. Сочетание этих процессов определяет специфику формирования микрогеометрии поверхности при МЭШ. Микрорельеф обработанной поверхности при МЭШ формируется в результате совместного воздействия зерен шлифовального круга, разрядов технологического тока и магнитного поля. Действие абразивных зерен инструмента обусловливает рельеф поверхности типичный для шлифования. Непосредственное воздействие электрических разрядов формирует на поверхности следы в виде эрозионных лунок и канавок. Под действием сил магнитного поля на расплав тонкого поверхностного слоя происходит его выброс из зоны обработки и/или растекание по обработанной поверхности. В результате микрогеометрия поверхности будет формироваться под влиянием преобладающих для данных условий обработки факторов процесса.

В качестве объекта исследования приняты жаропрочный сплав ХН77ТЮР, жаростойкая сталь 12Х18Н10Т и титановый сплав ВТ1-материалы относящиеся к труднообрабатываемым методами обработки резанием. Эти материалы широко применяются в машиностроении и других областях промышленности для изготовления деталей, работающих в сложных условиях эксплуатации: агрессивные среды, высокие температуры

и нагрузки и т.п., в том числе, при одновременном воздействии этих факторов [3]. Обработка таких материалов сопряжена с определёнными трудностями, связанными с требованиями к инструментальным материалам, рабочим средам, режимам процесса и т.п., что в итоге сказывается на себестоимости обработки. Поэтому эффективная обработка этих материалов, обеспечивающая необходимое качество поверхностного слоя и повышение эксплуатационных характеристик деталей при минимальных затратах средств, требует совершенствования существующих и создания новых технологических процессов.

В качестве инструмента применялся абразивный токопроводящий круг ПП250х 25х32 - 5С25СТ6КАЛ., пропитанный сплавом АЛ4. Съем металла определяли на аналитических весах АДВ-200 с точностью до 10 г после каждого прохода. Перед взвешиванием поверхность обработки промывали уайт-спиритом, ГОСТ 3134-78. Параметры микрогеометрии определяли по профилограммам, снятым на профилографе-профилометре модели 252, подключённом к ЭВМ, что позволило контролировать 12 параметров микрогеометрии поверхности. Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности деталей составляла Ra 6.3…3.2 мкм. Результаты проведенной обработки и исследований, анализ профилограмм и топограмм, показывает, что технологические режимы МЭШ оказывают значительное влияние на производительность процесса и шероховатость обработанных поверхностей труднообрабатываемых материалов.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о сложной зависимости шероховатости поверхности от величины магнитного поля при взаимодействии с технологическим током. Это влияние определяется характером и состоянием образовавшейся среды в зоне обработки. С увеличением силы тока в межэлектродном промежутке реализуется большое количество энергии, в результате расплавляются большие объемы стружки и поверхностного слоя детали. При этом на расплав как проводник с током действует магнитное поле, в результате чего расплавленный металл растягивается по поверхности детали, заполняя неровности поверхностного слоя от зерен абразивного круга. Дальнейшее повышение силы тока приводит к увеличению массы расплава, и часть его под действием магнитодвижущей силы выносится за пределы зоны шлифования. Это приводит к увеличению шероховатости из-за образования лунок и наплывов на поверхности детали.

Заключение. Как свидетельствуют результаты исследований, наложение магнитного поля на зону обработки благоприятно отражается на процессе шлифования, что приводит к улучшению параметров микрогеометрии поверхности. Так, высотные показатели шероховатости поверхности снижаются в среднем в 1,3-1,5 раза. Существенно улучшаются показатели сплошности поверхности. Например, величина опорной поверхности увеличивается на 20 %. Кроме того, при МЭШ достигаются

более стабильные значения параметров микрогеометрии поверхности. Таким образом, магнитно-электрическое шлифование. обеспечивает более качественный и стабильный микрорельеф поверхности по сравнению с электроэрозионным шлифованием. Производительность при МЭШ труднообрабатываемых материалов увеличивается в 1.8...2.6 раз по сравнению с электрообразивной обработкой и составляет 23...27 мм^3/с. Шероховатость обработанной поверхности в среднем составляла Ra 0.2...0.95 мкм в зависимости от марки материала, что значительно ниже (в 1.2...3 раза) по сравнению с другими электрофизическими методами обработки. Результаты исследований свидетельствуют о технологических возможностях процесса магнитно-электрического шлифования с целью обеспечения параметров шероховатости поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов при достижении высокой производительности обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриченко Э. И., Кульгейко М. П., Дмитриченко Е. Э. К вопросу о механизме разрушения обрабатываемой поверхности при магнитно-электрическом шлифовании. Новые технологии в машиностроении и вычислительной технике. Брест: БПИ (1998), 54-57

2. Шулев Г. С., Дмитриченко Э. И. Исследование обрабатываемости упрочненных поверхностей деталей контактным магнитно-электрическим способом II Машиностроение. Мн.: (1984), 114-116

3. Гродзинский Э. Я., Исакова Р. Б., Зубатова Л. С. Шлифование с электрической активацией режущей поверхности кругов // Станки и инструмент (1979), 8-10

УДК 621.941.1

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСТАЧИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ

А.Н. Скороходов, Е.М. Акулова
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Растачивание отверстий — один из ключевых технологических процессов в машиностроении, обеспечивающий точность и качество посадочных поверхностей. Однако при обработке на токарных станках часто возникают вибрации, особенно при использовании длинных державок, что приводит к снижению точности, ухудшению качества поверхности и преждевременному износу инструмента [1]. Актуальной задачей является разработка инструментальной системы, обладающей повышенной виброустойчивостью, способной обеспечить стабильность процесса растачивания.

Целью работы является повышение эффективности растачивания отверстий на токарных станках за счёт создания виброустойчивой инструментальной системы. Для достижения цели решались следующие задачи:

- Анализ причин возникновения вибраций при растачивании [2];
- Разработка конструктивных решений для повышения жёсткости и демпфирования инструментальной системы;
- Проведение экспериментальных исследований с целью оценки эффективности предложенных решений.

В ходе работы использовались методы математического моделирования, спектрального анализа вибраций, а также экспериментальные испытания на токарном оборудовании. Были изготовлены образцы державок с различными конструктивными параметрами, включая наличие демпфирующих вставок, изменение формы хвостовика и применение композитных материалов [3].

Анализ спектров вибраций показал, что применение демпфирующих элементов позволяет снизить амплитуду колебаний в диапазоне рабочих частот на 30–50%. Оптимизация геометрии державки — в частности, переход от цилиндрической к конической форме — способствует перераспределению напряжений и снижению резонансных эффектов. Использование композитных материалов с высоким внутренним трением дополнительно повышает виброустойчивость системы [3].

Экспериментальные испытания подтвердили, что предложенная инструментальная система обеспечивает:

- Снижение шероховатости поверхности на 25%;
- Повышение точности обработки до 30%;

- Увеличение стойкости режущего инструмента на 20% [4].

Разработанная виброустойчивая инструментальная система позволяет существенно повысить эффективность растачивания отверстий на токарных станках. Применение демпфирующих элементов, оптимизация геометрии державки и использование композитных материалов обеспечивают снижение вибраций, улучшение качества обработки и увеличение ресурса инструмента. Полученные результаты могут быть внедрены на машиностроительных предприятиях, включая ОАО «Гомсельмаш», для повышения производительности и качества продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко В.И., Козлов А.Н. Влияние вибраций на точность обработки отверстий // Машиностроение. – 2018. – №4. – С. 45–49.

2. Петров С.А., Иванов И.В. Методы подавления вибраций при точении // Технологии и материалы. – 2020. – №2. – С. 12–17.

3. Ким Е.Ю., Сидоров А.П. Применение композитных державок в токарной обработке // Вестник машиностроения. – 2019. – №6. – С. 33–37.

4. Хорошайло В.В. Повышение эффективности растачивания отверстий на токарных станках путем создания виброустойчивой инструментальной системы: дис. канд. техн. наук. – Гомель, 2025. – 145 с.

УДК 678.674

НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПА6 – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

А.А. Даниленко[1], Ю.М. Кривогуз[2], И.В. Царенко[1]
[1]Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь
[2]Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Республика Беларусь

В настоящее время активно исследуются и разрабатываются важнейшие типы полимерных нанокомпозитов: наноструктурированные полимерные системы, полимер/полимерные наноситемы, полимерсиликатные нанокомпозиты, композиты на основе углеродных наноматериалов и металлосодержащие нанокомпозиты [1, 2]. Отдельный научный и практический интерес представляют полимерные нанокомпозиты, содержащие глинистые наночастицы.

В настоящей работе качестве полимерной матрицы для получения нанокомпозитов использовали ПА6 (полиамид 6 для изделий, контактирующих с пищевыми продуктами, производства ОАО «Гродно Азот», ТУ РБ 500048054.037-2002). Для его модифицирования применяли ФПО производства ИММС НАН Беларуси (ТУ BY 400084698.170-2008), а также Na+-монтмориллонит марки Cloisite 30B (Cl30B) производства Southern Clay Products Inc., США.

Нанокомпозиты на основе ПА6, ФПО и Cl30B получали методом компаундирования в двухшнековом экструдере TSSK-35/40 с однонаправленным вращением шнеков. Рентгеноструктурный анализ (РСА) композитов из наноглин и ПА6 осуществляли на дифрактометре RDA-2000 (фирма «GNR Analytic Instruments», Италия).

В результате проведенных исследований было установлено, что при введении ФПО в ПА6 на рентгенограммах фиксируется два четких узких пика при $2\theta = 21{,}4^{o}$ и $2\theta = 23{,}8^{o}$. Интенсивности обоих пиков при $2\theta = 21{,}4^{o}$ и $23{,}8^{o}$ сильно зависит от фазового состава смесей ПА6/ФПО и от наличия наноглины в их объеме. Следует отметить, что во всех композитах, в которых присутствует наноглина ПА6 образует дисперсную среду (содержание ФПО $\leq$30 мас.%), величины пиков при $2\theta = 21{,}4^{o}$ и $23{,}8^{o}$ выше, чем для исходных ПА 6/ФПО смесей. Видимо, добавка Cl30B повышает кристалличность как полиамидной, так и полиолефиновой фазы в смесях данного состава (Табл.1). Таким образом, рентгеноструктурный анализ подтверждает тот факт, что структура ПА 6/ФПО композиций зависит от присутствия в их составе наноглины Cl30B.

Табл. 1 Интенсивность дифракционных максимумов на рентгенограммах ПА6,ФПО и смесевых композитов

Обозначение состава	Интенсивность пика (имп.) при угле	
	21,3	23,6
ПА6	10981	–
ПА6/ФПО-15%	17922	5881
ПА6/ФПО-30%	23574	9154
ПА6/Cl30B-1,5%	40910	–
ПА6/ФПО-15%/Cl30B-1,5%	28325	10546
ПА6/ФПО-30%/Cl30B-1,5%	31823	15045

Фотографии образцов, полученных из исследованных материалов представлены на Рис. 1

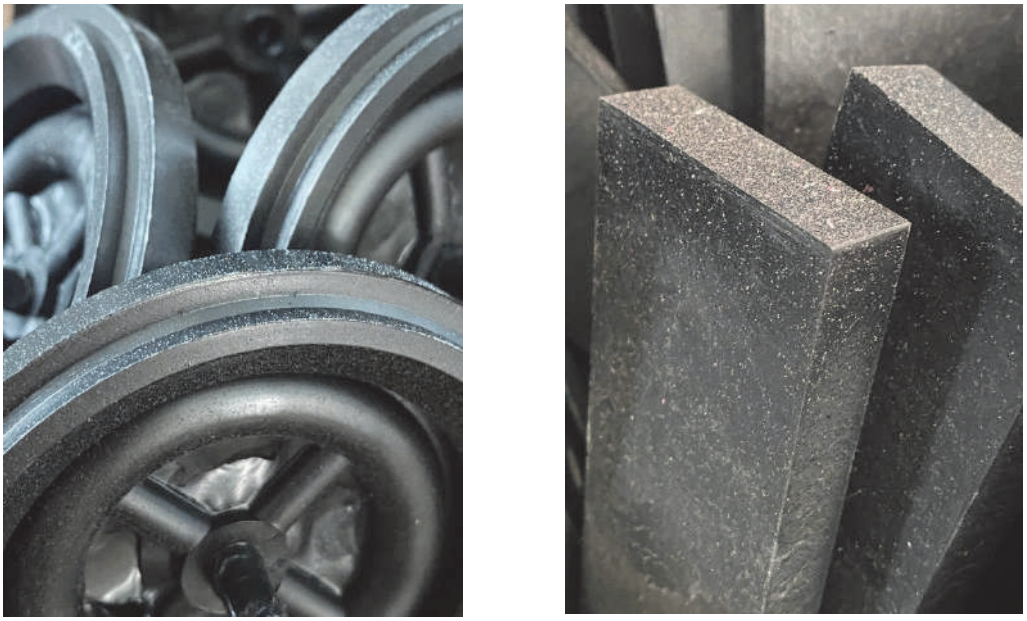


Рис. 1– Образцы нанокомпазитов разных форм

Перспективы применения нанокомпозитных полимерных материалов огромны и охватывают множество сфер, благодаря их уникальным свойствам. В первую очередь, они предлагают значительное улучшение механических характеристик традиционных полимеров, таких как прочность, жесткость и устойчивость к механическим повреждениям. Добавление наночастиц, таких как углеродные нанотрубки или графен, может в несколько раз повысить прочность материала при относительно низкой массе, что открывает возможности для применения этих материалов

в авиационной, автомобильной и космической промышленности, где критично важно сочетание лёгкости и прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Песецкий С. С., Мышкин Н. К. Полимерные композиты многофункционального назначения: перспективы разработок и применения в Беларуси (обзор) // Полимерные материалы и технологии. Т. 2, 2016, № 4. С. 6–29. doi: 10.32864/polymmattech-2016-2-4-6-29.

2. Кривогуз, Ю. М. Влияние функционализированных полиолефинов на структуру и свойства смесевых материалов на основе алифатических полиамидов / Ю. М. Кривогуз, О. А. Макаренко, С. С. Песецкий // Реактив–2018 : тез. докл. XXXI междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2–4 октября 2018 г. / Ин-т химии новых материалов НАН Беларуси; редкол.: В. Е. Агабеков [и др.]. – Минск, 2018. – С. 61.

УДК 621.73.048.5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

М.Н. Фоменок
ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь

Рассмотрены основные операции технологического процесса механической обработки детали с применением вертикального токарного станка с ЧПУ HW 500P.

Введение

Неотъемлемой частью производства является улучшение технологических процессов и внедрение их в производство. Технология токарных работ по металлу заключается в том, что с изделий срезается излишний металлический слой до тех пор, пока деталь не примет необходимую форму, размер и шероховатость поверхности. Для такой обработки используются металлорежущие токарные станки. В основном, при помощи токарных станков выполняют обработку поверхностей, имеющих цилиндрическую, коническую форму, а также фасонные и торцовые поверхности, уступы. В условиях современного обострения конкуренции предприятия вынуждены более интенсивно внедрять инновационные технологии. В области обработки металлов резанием главные усилия направлены на сокращение основного и вспомогательного времени (61% производственных расходов) и экономию средств производства (оборудование, энергетические затраты).

Объект исследования

Деталь типа «Стакан»

Цель исследования

Провести технологический анализ эффективности механической обработки детали типа «Стакан» с применением вертикального токарного станка с ЧПУ HW 500P для усовершенствования технологического процесса, обеспечивающего повышение производительности и точности обработки, возникающие при назначении режимов резания.

Методы исследования – теоретический, метод сравнительного анализа.

Результаты исследования

Проектирование технологического процесса механической обработки детали типа «Стакан» с применением вертикального токарного станка (ВТС) HW 500P заключается в следующих этапах (рис.1)

Рис. 1– Основные этапы проектирования технологического процесса

Технологические процессы так же могут разделятся по своей новизне, на данный момент преимуществом пользуется базовый и проектируемый технологический процесс, который делится на короткие операции и составляет их количество более четырех штук. Современным этапом в машиностроении считается механическая обработка включающая в себя комплексную обработку и имеющая как можно меньше операций.

Рассмотрим базовый технологический процесс механической обработки, применяемый в производстве на примере детали типа «Стакан» (рис.2), который состоит из четырех операций (таблица 1). Стакан изготавливается из серого чугуна маркировки СЧ20 ГОСТ 1412-85 и подвергается термической обработке для повышения твердости и износостойкости детали.

Химический состав данного чугуна: углерод 3,3%, кремний 2,1%, марганец 0,8%, сера 0,12%, фосфор 0,2%. Механические свойства СЧ20 ГОСТ 1412-85: Предел текучести 395Мпа, временное сопротивление 200Мпа, твердость 180НВ.

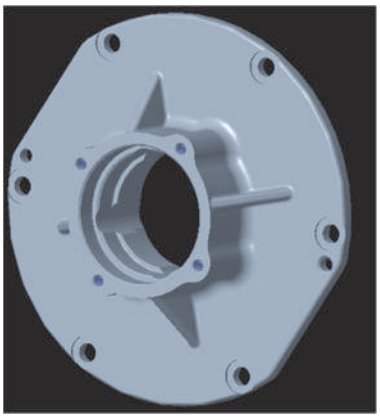


Рис.2 – Стакан редуктора

Анализ базового технологического процесса с операционной точки зрения получения заданного качества продукции, уменьшения металлоемкости, трудоемкости и увеличения производительности позволил установить операционную избыточность применяемого металлорежущего оборудования, которую можно оптимизировать без снижения качества обрабатываемой детали.

Рассмотрим технологический процесс с применением вертикально-токарной станочной системы HW 500 P. Отличительные особенности заключаются в том, что благодаря вертикально расположенному шпинделю и его усиленной конструкции станок позволяет обрабатывать самые сложные, тяжёлые изделия с высокой точностью даже на ускоренном режиме. Имеет литую станину, на которой направляющие разделяет значительное расстояние. Такая конструктивная особенность обеспечивает необходимую жёсткость и устойчивость к вибрации во время работы.

Таким образом, технические параметры данного станка дают возможность технологически изменить процесс механической обработки данной детали с получением экономического и энергетического эффекта. Основываясь на чертеже детали, с учетом припусков и допусков, обоснуем изменение последовательности операций процесса без изменения заданной точности детали.

Табл. 1. Базовый технологический процесс

№	Наименование операции	Оборудование	Содержание операции
010	Токарно-винторезная	16К20	1.Точить торец выдерживая размер 85. 2. Точить Ø285 на длину 148.
020	Токарная с ЧПУ	1А734Ф3	1. Точит торец диаметра Ø230 в размер 83,5-0,5 2. Точить диаметр Ø230h8 (-0,072) с подрезкой торца в размер 18±0,1 с образованием радиуса R1max и образованием фаски 1,6х45˚. 3. Точить канавку 4,7+0,18 выдерживая размеры 6,0 ±0,1; 4. Расточить диаметр Ø89,5H11 (+0,22) с подрезкой торца в размер 16,8 ±0,1 с образованием радиуса R1max и образованием фаски 1,6х45°на Ø90H7.
030	Токарная с ЧПУ	1А734Ф3	1. Точить торец выдерживая размер 80h14 (-0,7). 2. Расточить диаметр Ø89,5H11 (+0,22) с подрезкой торца в размер 25-0,1 с образованием радиуса R_{1max}. 3. Расточить диаметр Ф100H9 (+0,087) с подрезкой торца в размер 20±0,2 с образованием радиуса $R_{1max.}$
040	Внутришлифовальная	3К227В	1. Шлифовать отверстие Ø90H7(+0,035).

Для ВТС HW 500P нет необходимости выполнять механическую обработку для устойчивости заготовки при ее обработке. Данный металлорежущий станок обеспечивает такие параметры как величина отжатий в упругой технологической системе, вызываемых колебаниями нормальной составляющей силы резания, определяемой, в свою очередь, уровнем применяемых режимов резания. Поэтому в проектируемом технологическом процессе, по сравнению с базовым, исключаем выполняемую ранее токарно-винторезную операцию.

Для обоснования данного решения, рассчитаем погрешность измерения при токарной обработке на ВТС HW 500P, под которой понимается отклонение найденного значения от ее действительного значения. Принимаем отклонение δ в пределах 10…30 % поля допуска на контролируемый параметр. Расчет ведем по методике, изложенной в литературе [6, 7]:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2} \leq (0{,}1 \ldots 0{,}3)\delta$$

где Δ_1 – погрешность, свойственная данной системе измерения, мм; определяется системой отсчетных измерительных устройств; $\Delta_1 = 0{,}005$ мм;

Δ_2 – погрешность установки, мм,

$$\Delta_2 = \sqrt{\varepsilon_Б^2 + \varepsilon_З^2 + \varepsilon_И^2} = \sqrt{0^2 + 0{,}003^2 + 0{,}004^2} = 0{,}005 мм,$$

$\varepsilon_Б$ – погрешность базирования, мм; $\varepsilon_Б = 0$, так как базирование осуществляется в центрах;

$\varepsilon_З$ – погрешность закрепления, мм, $\varepsilon_З = 0{,}003$ мм;

$\varepsilon_И$ – погрешность износа, мм

$$\varepsilon_И = U_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot N/N_0 = 0{,}025 \cdot 0{,}97 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2{,}8 \cdot 1500/10^5 = 0{,}004 \text{ мм}$$

U_0 – значение среднего износа, мм;

K_1 – коэффициент, учитывающий материал детали; для стали $K_1 = 0{,}97$;

K_2 – коэффициент, учитывающий тип оборудования;

$K_2 = 1$ для универсального оборудования;

K_3 – коэффициент, учитывающий условия обработки; для измерений $K_3 = 1$;

K_4 – коэффициент, учитывающий число установок, для $N = 6000$ $K_4 = 2{,}8$;

N_0 – базовое число установок, шт., $N_0 = 10^5$;

N – число установок, шт., $N = 1500$;

Δ_3 – погрешность настройки приспособления, мм,

$$\Delta_3 \leq 0{,}05 \cdot \delta = 0{,}05 \cdot 0{,}1 = 0{,}005 \text{ мм};$$

Т.к. 0,005 < 0,03, следовательно, приспособление обеспечивает заданную точность измерения.

Качество изготовление продукции определяется совокупностью свойств процесса ее изготовления, соответствием этого процесса и его

результатов установленным требованиям. При снижении количества операций и совмещение их, так же снижается смещение элементов технологических систем различных тепловых, силовых и иных факторов. Элементарные погрешности обработки характеризуют смещение одного или нескольких факторов таких как:

$\Delta\varepsilon\gamma$ – установка заготовки в приспособление с учетом колебания размеров баз, контактных деформаций установочных баз заготовки и приспособления, точности изготовления и износа приспособления;

Δ_y – колебания упругих деформаций технологической системы под влиянием нестабильности и приспособления;

$\Delta_н$ – наладки технологической системы на выдерживаемый размер с учетом точностной наладки;

$\Sigma\Delta_{ст}$ – станка, влияющие на выдерживаемый параметр, с учётом износа станка за период эксплуатации;

$\Sigma\Delta_т$ – колебания упругих объемных и контактных деформаций элементов технологической системы вследствие и нагрева при резании, трения подвижных элементов системы, изменения температуры в цехе

В таблице 2 приведены значения погрешностей при анализе двух технологических процессов.

Табл. 2. Погрешности обработки

Погрешности обработки	Базовых технологический процесс, мм	Проектируемый технологический процесс, мм
$\Delta\varepsilon\gamma$	0,05	0,03
Δ_y	0,07	0,03
$\Delta_н$	0,09	0,02
$\Sigma\Delta_{ст}$	0,1	0,02
$\Sigma\Delta_т$	0,06	0,02

Анализ полученных данных показал, что погрешность обработки поверхности за счет смены оборудования существенно снизился, тем самым обеспечивается более качественная делать. Тем самым размер Ø90H7(+0,035) в проектируемом технологическом процессе выполняется за счет обеспечения точности оборудования, которая выполнялась ранее на внутришлифовальной операции. При изменении режимов резания и корректировки управляющей программы, вертикально-токарный станок обеспечивает диаметральный размер Ø90,02 мм, обеспечивает эффективность обработки поверхности, уменьшает себестоимость изготовления изделия.

За счет снижения количества механических операций обработки данной детали, вышеперечисленные факторы не оказывают существенного

влияния на качество допусков форм и расположений. Допуска круглости и параллельности за счет уменьшения снятия заготовки составили 0,004 мм. Допуск торцевого биения составил 0,02 Б. При уменьшении количества механических операций изменились режимы резания, глубина снятия поверхностного слоя металла, величина подачи режущего инструмента.

За счет совмещении элементов оперативного времени при выполнении станочных операций изменился состав основного времени. Полученные значения приведены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнительная характеристика показателей

Исследуемые показатели	Технологический процесс	
	Базовый	Проектируемый
Стойкость инструмента, мин	40	70
Основное время, мин	54,54	35,9
Количество оборудования, шт	4	1
Количество операций, ед	4	2

Исходя из этого получаем следующую последовательность обработки детали (табл. 4).

Табл. 4 Проектируемый технологический процесс

№	Наименование операции	Оборудование	Содержание операции
010	Токарная с ЧПУ	HW 500P	1. Точить торец диаметра Ø230 в размер 83,5-0,5 2. Точить диаметр Ø230h8 (-0,072) с подрезкой торца в размер 18 ±0,1 с образованием радиуса R_{1max} и образованием фаски 1,6х45º. 3. Точить канавку 4,7+0,18 выдерживая размеры 6,0±0,1 4. Расточить диаметр Ø90H7 (+0,035) с подрезкой торца в размер 17±0,1 с образованием радиуса R1max.
020	Токарная с ЧПУ	HW 500P	1. Точить торец выдерживая размер 80h14 (-0,7). 2. Расточить диаметр Ф90H7 +0,035) с подрезкой торца в размер 25 -0,1 с образованием радиуса R1max. 3. Расточить диаметр Ф100H9 (+0,087) с подрезкой торца в размер 20±0,2 с образованием радиуса R_{1max}.

Заключение

При выполнении данной работы была рассчитана погрешность и точность контрольного и станочного приспособления, выбраны оптимальные режимы резания, рассчитано техническое нормирование на механическую обработку данной детали. Показатели износостойкости режущего инструмента выросли на 30%. Трудоемкость изготовление детали снизилось на 40%, тем самым получили снижение себестоимости изготовления продукции, в том числе за счет снижения трудоемкости. Так же сократилось количество металлорежущего оборудования, что существенно повлияло на производственные и инструментальные затраты (режущий инструмент, металлорежущая оснастка, конструкторские приспособления). Тем самым проектируемых технологический процесс является оптимальным и замена им базового технологического процесса даст значительный экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах. Т.1 /Под редакцией А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова – 4-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Машиностроение, 1985 – 656 с.

2.Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах. Т.2 /Под редакцией А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова – 4-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Машиностроение, 1985 – 496 с.

3.Филипов Г.В. Режущий инструмент. – Л.: Машиностроение, 1981 – 173 с.

УДК 629.114

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ОТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ И НАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ТРАКТОРА

Ч.И. Жданович[1], Н.В. Калинин[2]
[1]Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
[2]Объединённый институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

Введение. Для физической модели тягового электродвигателя трактора (МТАД), рассматриваемой в [1], необходимо нагрузочное устройство (НУ). В [1, 2] в качестве нагрузочного устройства предложено использовать имеющийся в наличии генератор постоянного тока с независимым возбуждением. В [2] установлено, что для работы МТАД во всём диапазоне частот напряжения (рассматривался диапазон от 5 до 180 Гц) необходимо обеспечить набор передаточных чисел между МТАД и НУ, и выполнены расчёты для передаточных чисел, которые могут дать рассматриваемые в [2] коробки передач автомобилей. В [3] выведены зависимости для определения диапазона передаточных отношений между МТАД и НУ, обеспечивающих нагружение МТАД при допустимых значениях параметров НУ. Задача данной работы — выполнить расчёт передаточных отношений $u_{\text{р}}$ между МТАД и НУ во всём рассматриваемом диапазоне частот напряжения МТАД использованием зависимостей [3].

Определение значений $u_{\text{р}}$. В качестве МТАД возьмём АИР100L6 номинальной мощностью 2,2 кВт и номинальной частотой вращения 940 об/мин [4], а в качестве нагрузочного устройства — коллекторную машину постоянного тока независимого возбуждения 4ПБМ160МГ04 [5]. Расчёт параметров МТАД будем производить по [6].

Согласно [3], при заданных параметрах МТАД, которые должно обеспечить НУ, определяются передаточные отношения $u_{\text{р}}$ ($u_{\text{р}(E,\min)}$ и $u_{\text{р}(E,\max)}$ для минимально возможного и максимально допустимого значений ЭДС соответственно, $u_{\text{р}(I)}$ при допустимом значении силы тока, значение $u_{\text{р}(R=0)}$ при нулевом и $u_{\text{р}(R,\max)}$ при максимальном сопротивлении нагрузки $R_{\text{Ц}}$), выше или ниже значений которых параметры НУ выйдут за допустимые пределы, что приведёт к необеспечению требуемых режимов нагружения МТАД либо выходу из строя НУ. В [3] предлагается $u_{\text{р}}$ выбирать из условия:

$$\max\left(u_{\text{р}(R,\max)}, u_{\text{р}(E,\max)}\right) \le u_{\text{р}} \le \min\left(u_{\text{р}(E,\min)}, u_{\text{р}(I)}, u_{\text{р}(R=0)}\right) \qquad (1)$$

При этом:

1) если не получается выдержать условие $u_р > u_{р(R,\ max)}$, то можно взять большее значение $R_Ц$;
2) рассчитывать $u_{р(I)}$ предлагается для номинального тока генератора, а при невозможности его обеспечения расчёт провести по максимально допустимому току генератора и проводить опыты кратковременно.

Выполним расчёт $u_р$ по [3] для нагружения при номинальном ($s=s_н$) скольжении и при определяемом по [6] для каждого значения частоты $f_{1,i}$ критическом скольжении ($s=s_{кр(f),i}$) МТАД для диапазона частот напряжения $f_{1,i}$ от 5 до 180 Гц. Расчёт проведём при следующих значениях параметров:

- ✓ максимальное сопротивление нагрузки R_{max}, Ом — 7,05;
- ✓ внутреннее сопротивление цепи Σr, Ом — 0,3;
- ✓ КПД редуктора — 0,97;
- ✓ номинальный ток генератора — 39,7 А [5];
- ✓ максимальное значение ЭДС — 220 В, минимальное — 20 В;
- ✓ моментом генератора на холостом ходу M_0 пренебрежём.

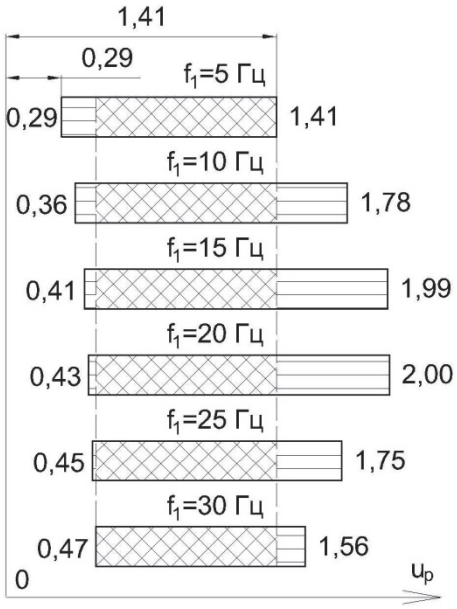


Рисунок — Определение допустимых значений $u_р$

Результаты расчёта для режима нагружения МТАД представим в таблице 1, где $u_{р,min}$ и $u_{р,max}$ — это минимальное и максимальное передаточные отношения, определённые по условию (1).

Рассмотрим участок работы МТАД при $s=s_н$ для $f_{1,i}$ от 5 до 30 Гц. На рисунке отложим значения $u_{р,min}$ и $u_{р,max}$ по горизонтальной оси и значения $u_{р,min}$ и $u_{р,max}$ соединим отрезком — он будет показывать допустимые значения $u_р$ для $f_{1,i}$. Как видно, при работе для f_1 от 5 до 30 Гц можно брать передаточное отношение от $u_р$=0,47 до $u_р$=1,41. А вот, например, для f_1=165 Гц и $s=s_н$ значения $u_{р,min}$=1,79 и $u_{р,max}$=4,14 выйдут за пределы диапазона $u_р$ от 0,47 до 1,41.

Из таблицы 1 очевидно, что одно фиксированное значение $u_р$ можно взять для большего диапазона f_1, чем от 5 до 30 Гц. Если взять $u_р$=1,25, то оно будет в пределах допустимых значений для f_1 от 5 до 115 Гц, а выше 115 Гц уже $u_р$>1,25. То есть если бы откладывали по горизонтальной оси значения от $u_{р,min}$ и $u_{р,max}$ для f_1 от 5 до 115 Гц при $s=s_н$, то для всех отрезков от $u_{р,min}$ до $u_{р,max}$ одинаковым был не диапазон от 0,47 до 1,41, как на рисунке для f_1 от 5 до 30 Гц, а только одно значение 1,25, которое было

бы максимальным для значений f_1, равных 40, 45, 50 Гц, и минимальным для f_1=115 Гц.

Таблица 1 — Значения $u_р$ при $s=s_н$ и при $s=s_{кр(f),i}$

$f_{1,i}$, Гц	$s=s_н$							$s=s_{кр(f),i}$						
	$u_{р(E,max)}$	$u_{р(E,min)}$	$u_{р(f)}$	$u_{р(R,\ max)}$	$u_{р(R=0)}$	$u_{р,min}$	$u_{р,max}$	$u_{р(E,max)}$	$u_{р(E,min)}$	$u_{р(f)}$	$u_{р(R,\ max)}$	$u_{р(R=0)}$	$u_{р,min}$	$u_{р,max}$
5	0,03	0,34	3,50	0,29	1,41	0,29	1,41	0,01	0,09	1,25	0,09	0,43	0,09	0,09
10	0,06	0,67	2,80	0,36	1,78	0,36	1,78	0,02	0,21	0,93	0,12	0,58	0,12	0,21
15	0,09	1,01	2,33	0,41	1,99	0,41	1,99	0,03	0,38	0,78	0,14	0,70	0,14	0,38
20	0,12	1,35	2,00	0,43	2,13	0,43	2,00	0,05	0,57	0,67	0,16	0,80	0,16	0,57
25	0,15	1,68	1,75	0,45	2,22	0,45	1,75	0,08	0,90	0,58	0,19	0,94	0,19	0,58
30	0,18	2,02	1,56	0,47	2,30	0,47	1,56	0,11	1,16	0,52	0,21	1,01	0,21	0,52
35	0,21	2,36	1,40	0,48	2,35	0,48	1,40	0,13	1,45	0,47	0,22	1,07	0,22	0,47
40	0,24	2,69	1,25	0,49	2,38	0,49	1,25	0,16	1,78	0,42	0,23	1,12	0,23	0,42
45	0,28	3,03	1,25	0,52	2,53	0,52	1,25	0,19	2,13	0,42	0,25	1,22	0,25	0,42
50	0,31	3,37	1,25	0,54	2,66	0,54	1,25	0,22	2,47	0,42	0,27	1,32	0,27	0,42
55	0,34	3,70	1,38	0,60	2,93	0,60	1,38	0,25	2,77	0,43	0,29	1,42	0,29	0,43
60	0,37	4,04	1,50	0,65	3,19	0,65	1,50	0,28	3,08	0,45	0,31	1,52	0,31	0,45
65	0,40	4,38	1,63	0,71	3,46	0,71	1,63	0,31	3,40	0,47	0,33	1,63	0,33	0,47
70	0,43	4,72	1,75	0,76	3,73	0,76	1,75	0,34	3,72	0,48	0,35	1,74	0,35	0,48
75	0,46	5,05	1,88	0,82	3,99	0,82	1,88	0,37	4,06	0,50	0,38	1,85	0,38	0,50
80	0,49	5,39	2,01	0,87	4,26	0,87	2,01	0,40	4,40	0,52	0,40	1,97	0,40	0,52
85	0,52	5,73	2,13	0,92	4,53	0,92	2,13	0,43	4,76	0,55	0,43	2,09	0,43	0,55
90	0,55	6,06	2,26	0,98	4,79	0,98	2,26	0,47	5,12	0,57	0,45	2,22	0,47	0,57
95	0,58	6,40	2,38	1,03	5,06	1,03	2,38	0,50	5,49	0,60	0,48	2,36	0,50	0,60
100	0,61	6,74	2,51	1,09	5,32	1,09	2,51	0,53	5,88	0,63	0,51	2,50	0,53	0,63
105	0,64	7,07	2,63	1,14	5,59	1,14	2,63	0,57	6,22	0,67	0,54	2,64	0,57	0,67
110	0,67	7,41	2,76	1,20	5,86	1,20	2,76	0,60	6,56	0,70	0,57	2,78	0,60	0,70
115	0,70	7,75	2,88	1,25	6,12	1,25	2,88	0,63	6,91	0,75	0,60	2,94	0,63	0,75
120	0,73	8,08	3,01	1,30	6,39	1,30	3,01	0,66	7,26	0,79	0,64	3,11	0,66	0,79
125	0,77	8,42	3,13	1,36	6,66	1,36	3,13	0,69	7,61	0,85	0,67	3,30	0,69	0,85
130	0,80	8,76	3,26	1,41	6,92	1,41	3,26	0,72	7,97	0,91	0,71	3,50	0,72	0,91
135	0,83	9,09	3,38	1,47	7,19	1,47	3,38	0,76	8,34	0,99	0,76	3,71	0,76	0,99
140	0,86	9,43	3,51	1,52	7,45	1,52	3,51	0,79	8,71	1,07	0,81	3,96	0,81	1,07
145	0,89	9,77	3,63	1,58	7,72	1,58	3,63	0,83	9,08	1,17	0,86	4,23	0,86	1,17
150	0,92	10,10	3,76	1,63	7,99	1,63	3,76	0,86	9,46	1,30	0,93	4,54	0,93	1,30
155	0,95	10,44	3,88	1,68	8,25	1,68	3,88	0,89	9,81	1,45	1,00	4,88	1,00	1,45
160	0,98	10,78	4,01	1,74	8,52	1,74	4,01	0,92	10,17	1,64	1,08	5,29	1,08	1,64
165	1,01	11,11	4,14	1,79	8,79	1,79	4,14	0,96	10,52	1,89	1,18	5,78	1,18	1,89
170	1,04	11,45	4,26	1,85	9,05	1,85	4,26	0,99	10,88	2,23	1,30	6,39	1,30	2,23
175	1,07	11,79	4,39	1,90	9,32	1,90	4,39	1,02	11,25	2,73	1,46	7,18	1,46	2,73
180	1,10	12,13	4,51	1,96	9,58	1,96	4,51	1,06	11,61	3,50	1,69	8,26	1,69	3,50

Чем для большего количества $f_{1,i}$ можно использовать одно и то же значение $u_р$ — тем меньшее количество передач потребуется для обеспечения работы физической модели электромеханической трансмиссии трактора. Руководствуясь этим, по данным таблицы 1 определим диапазоны частот $f_{1,i}$ для $s=s_н$ и $s=s_{кр(f),i}$ так, чтобы использовать как можно меньшее количество $u_р$, результаты представим в таблице 2.

Таблица 2 — значения $u_р$ для $f_{1,i}$

$f_{1,i}$, Гц	Режим нагружения	$u_р$	$1/u_р$
5–115	$s=s_н$	1,25	0,8
150–165	$s=s_{кр(f),i}$		
120–180	$s=s_н$	1,96–2,23	0,45–0,51
130–145	$s=s_{кр(f),i}$		
110–125	$s=s_{кр(f),i}$	0,69–0,70	1,43–1,45
90–105	$s=s_{кр(f),i}$.	0,57	1,75
55–85	$s=s_{кр(f),i}$	0,43	2,33
15–50	$s=s_{кр(f),i}$	0,27–0,38	2,63–3,70
10	$s=s_{кр(f),i}$	0,12–0,21	4,76–8,33
5	$s=s_{кр(f),i}$	0,09	11,16–11,28

Можно определить значения $u_р$ не совсем так, как в таблице 2, а несколько по-другому: например, для предельного режима от 10 до 30 Гц можно взять $u_р$=0,21.

Если взять значения $u_р$ по таблице 2, то получится, что при одной и той же частоте f_1 для нагружения МТАД моментом, соответствующим критическому скольжению, и для нагружения моментом, соответствующим номинальному скольжению МТАД, требуются разные значения $u_р$. Это может быть не очень удобно, если нужно МТАД нагружать моментом от минимального до максимального значения при фиксированной частоте f_1. Посмотрим по таблицам 1 и 2, можно ли использовать одно и то же значение $u_р$ для нагружения МТАД моментом для достижения номинального и критического скольжения МТАД. Для частоты 30 Гц при $u_р$ в диапазоне 0,47–0,52 это можно, а при частоте 50 Гц — нет, потому что для достижения номинального скольжения МТАД требуется $u_р$ в диапазоне 0,54–1,25, в то время как для достижения критического скольжения требуется $u_р$ в диапазоне 0,27–0,42.

Выводы. По методике [3] были определены передаточные отношения $u_р$ между МТАД и НУ, которые бы позволили обеспечить требуемый режим нагружения МТАД при нахождении параметров НУ в допустимых пределах. В качестве МТАД был взят АИР100L6, в качестве НУ — коллекторная машина постоянного тока с независимым возбуждением 4ПБМ160МГ04. Рассматривался диапазон частот

напряжения $f_{1,i}$ МТАД от 5 до 180 Гц с шагом 5 Гц; НУ должно было обеспечить два режима работы МТАД в таком диапазоне: при $s=s_н$ и при $s=s_{кр(f),i}$. Согласно полученным результатам, для обеспечения нагружения МТАД с целью достижения им $s=s_н$ при всех $f_{1,i}$ достаточно двух значений $u_р$; для обеспечения всех рассматриваемых режимов нагружения МТАД ($s=s_н$ и $s=s_{кр(f),i}$) требуется 8 различных значений $u_р$. Кроме того, для достаточно большого количества частот $f_{1,i}$ невозможно обеспечить оба рассматриваемых ($s=s_н$ и $s=s_{кр(f),i}$) режима нагружения при одном значении $u_р$, если взяты те исходные данные, при которых проводился расчёт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданович, Ч. И. Обоснование параметров физической модели электромеханической трансмиссии трактора / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. научн. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С. Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2023. – Вып. 12. – С. 121–126.

2. Жданович, Ч. И. Определение параметров нагрузочного устройства физической модели трактора с электромеханической трансмиссией / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Научные решения проблем развития тракторной техники, многоцелевых колесных и гусеничных машин, электрического транспорта [Электронный ресурс] : сборник научных трудов научно-практической конференции, посвященной 70-летию кафедры "Тракторы", 22-23 января 2024 / редкол.: В. П. Бойков (отв. ред.), Ч. И. Жданович, А. С. Поварехо ; сост.: В. П. Бойков, Ч. И. Жданович, А. С. Поварехо. – Минск : БНТУ, 2024. – С. 37-53.

3. Жданович, Ч. И. Методика определения передаточных отношений между электродвигателем и нагрузочным устройством физической модели электромеханической трансмиссии трактора / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 томах / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет ; редкол.: Д. В. Капский, А. С. Поварехо (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – Т. 1. – С. 273-279.

4. Трёхфазные двигатели серии АИР : [электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mez.by/ catalog/asinkhronnye-dvigateli-serii-air-aire/ trekhfaznye-dvigateli-serii-air/. — Дата доступа: 10.09.2025.

5. Электродвигатель 4ПБМ160МГ 8 кВт 3070/4000 об. 220/110В IM3001 : [электронный ресурс]. – Режим доступа: https://energo1.com/ catalog/elektrodvigateli_postoyannogo_toka/elektrodvigateli_postoyannogo_toka_serii_4p/elektrodvigateli_serii_4pbm/14703/. — Дата доступа: 10.09.2025.

6. Жданович, Ч. И. Выбор способа регулирования тягового асинхронного электродвигателя трактора и построение механической характеристики / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Наука и техника. Серия 1. Машиностроение. – 2015. – № 3. – С. 60 - 64.

УДК 620.178

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТОВАННЫХ СЛОЕВ СТАЛЕЙ 18ХГТ, 20ХН3А И 16CRMNS5

Е.П. Поздняков[1], И.Н. Степанкин[2], А.Д. Левкина[1], Д.В. Куис[3], С.Н.Лежнев[4]
[1]Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П.О.Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь
[2]ООО «ЭлитПартнер», г. Минск, Республика Беларусь
[3] Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Республика Беларусь
[4] НАО «Рудненский индустриальный институт», г. Рудный, Казахстан

Определяющим свойством машиностроительных изделий, влияющим на их долговечность, является не только твердость сплава, но и параметры структурных составляющих [1, 2]. Управление структурными параметрами сталей можно осуществлять в процессе цементации. Наиболее распространенными среди являются традиционно цементуемые стали 15Х, 18ХГТ, 12ХН3А, 20ХН3А, 20ХГР и др. В нашей стране изготавливается сталь 16CrMnS5 в соответствии с Европейским стандартом, однако на территории Республики Беларусь и стран ближнего зарубежья она не получила широкого распространения вследствие недостаточной информативности о ее свойствах.

Целью работы являлось сравнение влияния длительности цементации на контактную усталость конструкционных низкоуглеродистых сталей 18ХГТ, 20ХН3А и 16CrMnS5, химический состав которых приведен в табл. 1. Упрочнение поверхностного слоя сталей осуществлялось путем проведения цементации при температуре 920ºС с длительностью активного насыщения 8 и 12 часов с последующей закалкой в масле с температуры 860 ºС и низким отпуском при температуре 200 ºС в течение 1 часа. Исследование микроструктуры осуществлялось на оптическом микроскопе Метам РВ-22 по стандартной методике. Величину микротвердости диффузионных слоев определяли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 1,962Н. Зависимости изнашивания определяли на оригинальной установке для испытаний на контактную усталость и износ [3] при напряжениях 1100±55 МПа.

Табл. 1. Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	P	S
18ХГТ	0,22	0,21	1,15	1,29	0,12	0,070	0,015	0,028
20ХН3А	0,18	0,20	0,48	0,69	2,85	0,002	0,012	0,012
16CrMnS5	0,20	0,25	1,20	1,22	0,11	0,003	0,014	0,031

Металлическая матрица термодиффузионно-упрочненных слоев состоит из мартенсита и остаточного аустенита с включениями карбидов (рис. 1). Карбидная фаза в науглероженных слоях стали 18ХГТ имеют более развитое строение. Содержание объемной доли включений у слоев стали 20ХН3А значительно меньше, чем у аналогичных слоев сталей 18ХГТ и 16CrMnS5 (табл. 2). Немаловажным является размер карбидов, которые являются мелкодисперсными. Такая особенность карбидов в науглероженных слоях конструкционных сталей способствует повышению стойкости к усталостному износу в условиях воздействия пульсирующих напряжений [2]. При этом стоит отметить высокую микротвердость диффузионно-упрочненных слоев – микротвердсоть поверхности и сердцевины при увеличении длительности цементации с 8 до 12 часов оказалась на уровне 8,0 ГПа и 4,3 ГПа соответственно, а эффективная толщины слоя оказалась равной с остальными сталями.

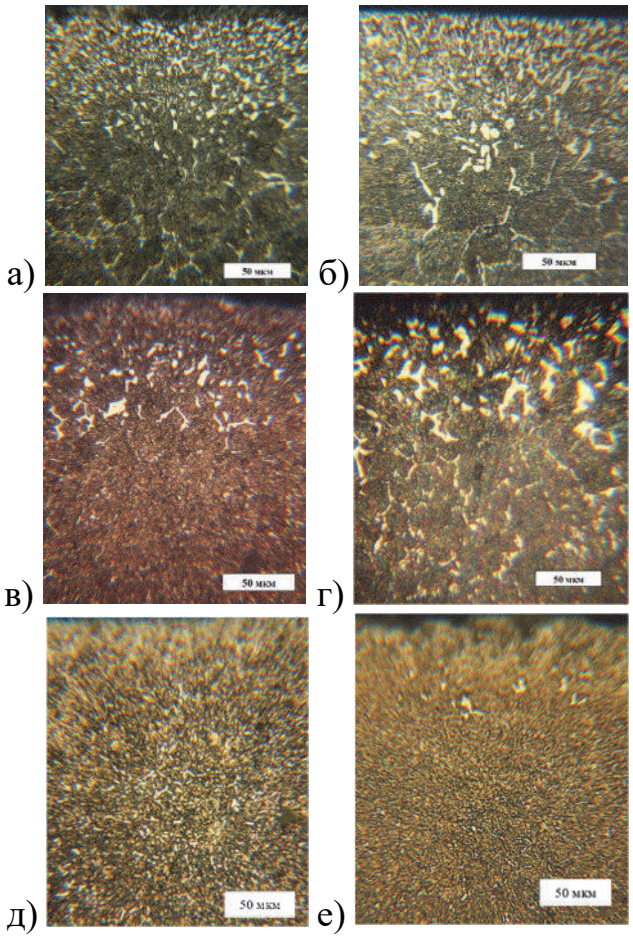


Рис. 1 – Микроструктура поверхностных слоев стали 18ХГТ (а, б), 16CrMnS5 (в, г) и 20ХН3А (д, е):
а, в, д – 8-часовая цементация; б, г, е – 12-часовая цементация;

Табл. 2. Показатели цементованных слоев исследуемых сталей

Марка стали	Длительность активного насыщения	Показатель			
		Микротвердость поверхности / сердцевины, ГПа	Эффективная толщина слоя, мм	Объемная доля включений, об.%	Максимальный размер включений, мкм
18ХГТ	8	8,0 / 4,5	1,4	35	20
	12	8,4 / 4,5	1,6	50	30
20ХН3А	8	8,0 / 4,3	1,3	5	3
	12	8,0 / 4,3	1,5	5	10
16CrMnS5	8	7,1 / 3,8	1,3	18	40
	12	7,5 / 4,2	1,5	26	50

Экспериментальные испытания образцов на контактную усталость при величине контактных напряжений 1100 МПа показали, что интенсивность износа слоев стали 16CrMnS5 значительно меньше интенсивности износа слоев сталей 18ХГТ и 20ХН3А (рис. 2).

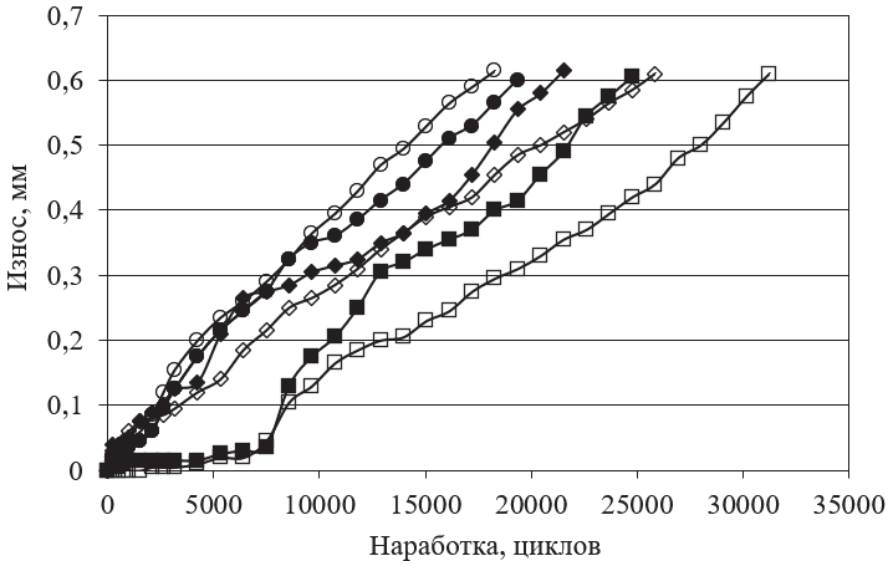
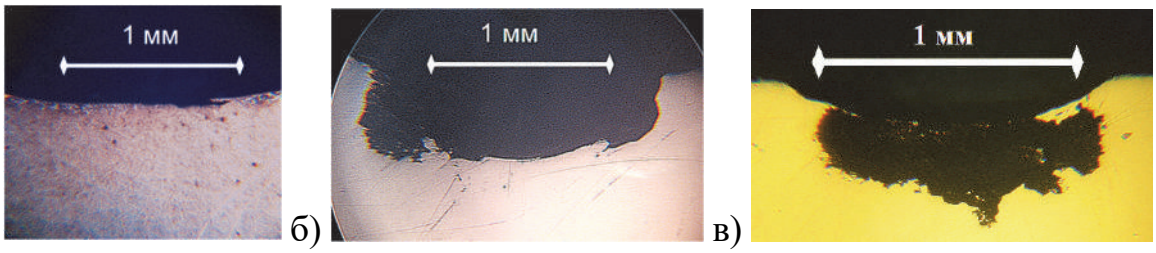


Рис. 2 – Зависимости износа от числа циклов нагружения цементованных слоёв стали 18ХГТ (●, ○), 16CrMnS5 (■, □) и 20ХН3А (♦, ◊) при амплитуде напряжений 1100 МПа:
(●, ■, ♦) – 8-часовая цементация; (○, □, ◊) – 12-часовая цементация

У слоев стали 16CrMnS5 на кривых износа имеется этап, характеризующийся минимальным износом, который длится порядка 7500 циклов нагружения до достижения глубины лунки износа 0,05 мм. Изнашивание происходит за счет удаления мелких элементов деформированного сплава с контактной поверхности образцов (рис. 3 а). По мере увеличения числа циклов нагружения в подповерхностных слоях происходит накопление трещин контактной усталости, их объединение и формирование питтингов (рис. 3 б). Их образование приводит к

уменьшению контактной поверхности и, соответственно, увеличению действующих напряжений. Этот процесс провоцирует увеличение интенсивности износа. Наибольшая стойкость, зарегистрированная при достижении глубины лунки износа 0,6 мм, отмечена у образцов после 12-часовой цементации. Наработка составила более 31 тысячи циклов нагружения.

Для слоев сталей 18ХГТ и 20ХН3А этап высокой износостойкости отсутствует, а зависимости износа имеют линейную характеристику. При первых воздействиях контртела на поверхность упрочненных образцов в диффузионном слое активно образуются трещины контактной усталости, которые по мере их накопления и роста приводят к формированию крупных питтингов (рис. 3 в). Их износостойкость оказалась ниже в 1,17…1,41 раза по отношению к слою стали 16CrMnS5 после 12-часового диффузионного упрочнения.



а) 1000 циклов б) более 31000 циклов в) 1000 циклов

Рис. 3– Особенности разрушения термоупрочненных цементованных слоев сталей: а, б – 16CrMnS5; в – 18ХГТ, 20ХН3А

Анализ полученных результатов исследований термоупрочненных цементованных слоев сталей 18ХГТ, 20ХН3А и 16CrMnS5, сформированных в течение 8 и 12 часов, позволяет сделать следующие выводы:

- наиболее оптимальная структура, состоящая из мартенсита, остаточного аустенита с наличием наиболее мелких карбидов (до 10 мкм) и их минимальным содержанием (до 5 %) сформированы в слоях стали 20ХН3А. При этом микротвердость поверхности данных слоев имеет высокое значение – 8,0 ГПа.

- несмотря на меньшую твердость поверхностного слоя (7,1…7,5 ГПа) и сердцевины (3,8…4,2 ГПа), а так же высокое содержание (18…26 %) более крупных включений, размером 40…50 мкм, цементованные слои стали 16CrMnS5 показали повышенную износостойкость по отношению к аналогичным слоям сталей 18ХГТ и 20ХН3А. Эти слои отличаются наличием этапа минимального износа на уровне 7500 циклов нагружения контактными напряжениями 1100 МПа.

- максимальной износостойкостью в условиях малоцикловой усталости обладает термоупрочненный науглероженный слой стали

16CrMnS5, сформированный в процессе 12-часового диффузионного насыщения. Его стойкость, при достижении глубины лунки износа 0,6 мм, составила более 31 тыс. циклов нагружения. Его стойкость в 1,17…1,41 разы выше, чем стойкость остальных слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанкин, И.Н. Контактное изнашивание инструментальных сталей Х12М, 9ХС и У8А / И.Н. Степанкин, Е.П. Поздняков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2015. – № 3. – С. 19-24.

2. Поздняков, Е.П. Влияние длительности цементации на структуру и свойства конструкционных среднеуглеродистых сталей 40Х, 35ХГСА и 42CrMoS4 / Е.П. Поздняков, И.Н. Степанкин // Литье и металлургия. – 2024. - №1, - С. 69-77

3. Устройство для испытания на контактную усталость и износ: полез. модель BY 8260 / И.Н.Степанкин, И.А. Панкратов, В.М.Кенько, Е.П. Поздняков, Степанкина Л.В. – Опубл. 30.06.2012

УДК 62-82-112.6(083.13)

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОВ ОБОРУДОВАНИЯ

О.К. Гурбан, В.В. Пинчук
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П.О.Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация

Повышение эффективности проектирования монтажных корпусов гидроблоков через внедрение декомпозиционных методов анализа задач. Предлагаемый подход включает три этапа: формулирование потребностей и целей нового объекта, декомпозиция задач на более простые компоненты, а также выбор оптимальных решений из множества альтернатив. Исследование также акцентирует внимание на важности системного подхода и применения научных принципов в процессе проектирования. Реализация разработанных методов на конкретных примерах гидроблоков позволит проверить их эффективность и обеспечить постоянное совершенствование проектных процессов. Установлено, что показатели качества с учётом гидравлических потерь давления зависят от конструктивной схемы присоединительных плоскостей гидроаппаратов. По результатам проведенных численных исследований получена зависимость общего критерия оптимальности гидроблока управления (ГУ) от показателей качества монтажного корпуса.

Проведя анализ различных вариантов формы корпуса и их влияния на гидравлические потери давления, можно определить оптимальную форму корпуса, которая обеспечит минимальные потери давления при работе монтажного корпуса ГУ. Такой подход позволяет сократить энергопотребление и повысить эффективность работы системы в целом.

Ключевые слова: приводы технологического оборудования, гидроблоки управления, технологические машины, гидроаппараты, критерий оптимальности.

Введение. В процессе создания гидроприводов технологических машин разрабатывают гидроблоки управления (ГУ), состоящие из соединенных между собой гидроаппаратов согласно принципиальным гидросхемам. ГУ, которые являются сложной и дорогостоящей подсистемой гидроприводов технологического оборудования, а затраты на их создание, как правило, многократно превышают стоимость используемых при разработке гидроаппаратов.

Поэтому задача повышения качества функционирования ГУ является актуальной для любого машиностроительного предприятия

Организация процесса разработки нового объекта, которая в рамках условий поставленной задачи наилучшим образом позволяет получить эффективное решение в виде соответствующего комплекта документации. Управление проектированием является составной частью менеджмента. Большое количество требований при постановке задачи, а также многочисленные граничные условия и воздействующие факторы при проектировании гидроблоков управления возникают многочисленные варианты технических решений, которые должны быть проанализированы с целью выбора оптимального.

Постановка задачи и методы исследований

Целью предлагаемых исследований является повышение эффективности проектирования путем интеграции автономных модулей, которые будут формировать структуру создаваемых объектов и процессов на уровне инновационных результатов (изобретений) на ранних стадиях проектирования гидроблоков управления приводов технологического оборудования.

Анализ гидравлической системы управления имеет теоретическое и практическое значение для улучшения характеристик гидроблоков управления (ГУ) приводов технологического оборудования и его структурной конструкции. Процесс получения инновационного результата при проектировании нового гидроблока управления представим в виде последовательного решения задачи, разбив на три этапа.

Формирование потребности в новом объекте позволяет установить цели и критерии для дальнейшей работы. На втором этапе задача разделяется на более мелкие, относительно независимые части, которые характеризуются определенными свойствами (признаками) создаваемого объекта. Важно указать множество альтернатив реализации каждого признака, что формирует многомерное поисковое пространство. Третий этап включает в себя «свертку поискового пространства», образованного в результате декомпозиции. На этом этапе осуществляется выбор для каждого свойства варианта реализации из множества альтернатив [1].

Обобщённая схема инвариантности в проектировании гидроблоков управления (рисунок 1) предполагает использование принципа инвариантности для создания систем, нечувствительных к внешним возмущениям и изменениям параметров. Это достигается путём применения обратной связи для компенсации нежелательных эффектов, например, перепадов давления или температуры, обеспечивая тем самым стабильность и точность выполнения технологических операций в гидравлической системе.

Рис. 1 – Обобщённая схема инвариантности в проектировании гидроблоков управления технологического оборудования

При проектировании решаются также вопросы техники безопасности, в том числе при различных нарушениях в работе гидрооборудования (случайные падения давления, сгорание обмотки электромагнита, засорение малых отверстий и т.п.); вводятся блокировки, исключающие возможность несовместимых движений, падения вертикально расположенных рабочих органов, включения движений при отсутствии смазки и т.п.; обеспечивается необходимый минимум регулировок.

После составления принципиальной схемы приступают к подбору гидроаппаратов и других узлов гидропривода по их функциональному назначению и величине условного прохода, рассчитывают проходные сечения трубопроводов в зависимости от расхода масла, проходящего по тому или иному участку гидросистемы, и рекомендуемой скорости потока рабочей жидкости.

Задача оптимизации гидроблоков управления состоит в определении значения *X*- функционал цели, описывающий эффект от выбора того или иного варианта, проектируемых гидроблоков управления, удовлетворяющих условию: $X \rightarrow extr$

Однако, ГУ является сложной технической системой, включающей гидроаппараты и монтажные корпуса, каждый из которых характеризуется своими признаками, которые могут быть как качественными, так и количественными.

Отработка конструкции гидроблоков управления на технологичность связана со снижением трудоемкости и себестоимости его изготовления, технического обслуживания и ремонта. Некоторые из приведенных показателей могут иметь абсолютные значения, другие относительные и удельные.

Оптимизацию гидроблоков управления мы рассматриваем на уровнях структуры и параметров. Так как элементная база гидроблоков управления еще не определена и сведения о ее возможностях и свойствах носят пока предположительный характер, то на этапе разработки структуры гидроблоков управления первый показатель в приведенном перечне мы можем, используя подход нисходящего проектирования, оценивать таким параметром, как объем V монтажных корпусов (учитывая конструктивное устройство гидроблоков управления, которое других элементов кроме гидроаппаратов и монтажных корпусов не содержит). В этом случае оптимальным параметрам гидроблоков управления будет отвечать минимальное значение V. Трудоемкость же изготовления гидроблоков управления, которую мы можем учитывать на этом этапе разработки, зависит от размеров поверхностей S монтажных корпусов, обрабатываемых в процессе их изготовления. От размера поверхностей S зависит и шумоизлучение. То есть, для удовлетворения требованиям минимальных значений стоимости и шумоизлучения размеры поверхностей монтажных корпусов также должны быть минимальны.

Для оптимизации параметров монтажных корпусов получена математическая модель общего критерия оптимальности[2].

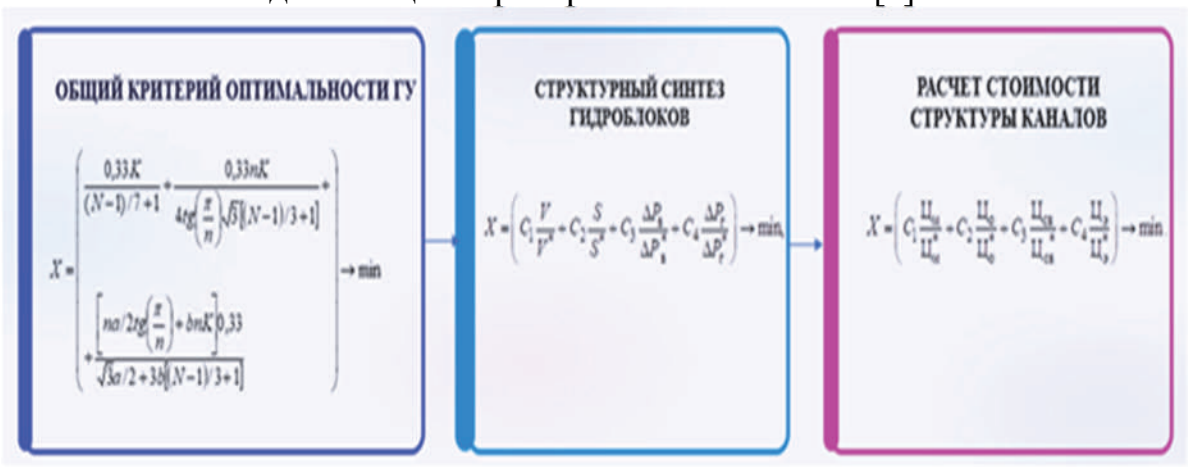


Рис. 2 – Модель расчета функциональных показателей ГУ приводов ТО при их проектировании

Анализ математической модели расчета показателей гидроблока управления показывает, что определение первых двух слагаемых затруднений не вызывает, т.к. стоимость материла, из которого предполагается изготавливать СММ и трудоемкость, а следовательно стоимость обработки его поверхностей, яляется широко распространенной информацией, которую можно легко получить, например из общедоступных справочников. В тоже

время, оптимизация стоимости структуры каналов вызывает определенные затруднения из-за ее вариативности. Оценка работы математической модели проведена на основе схематичного конструктивного устройства (рисунок 2), где: С1 – С4 – коэффициенты взаимной важности критериев, назначаемые экспертным путем, ΔP_B - потери давления в вертикальных каналах СММ; ΔP_Γ - потери давления в горизонтальных каналах СММ, V и S – соответственно объем и полная поверхность монтажных корпусов, $\Delta P *_B, \Delta P_\Gamma^*,\ V^*,\ S^*$ - нормирующие множители[3].

В общем случае монтажный корпус можно представить, как совокупность элементов, обеспечивающих надежное крепление и герметизацию гидравлических компонентов, а также оптимальное распределение потоков рабочей жидкости для эффективного функционирования всей системы. Для расчета таких корпусов учитываются механические нагрузки, давление рабочей жидкости, что позволяет определить необходимые размеры, конструктивные особенности корпуса. Исследования его распространить на анализ и оптимизацию гидродинамических характеристик, что обеспечивает повышение надежности и долговечности гидравлического оборудования.

Для решения поставленной задачи необходимо провести анализ общего критерия оптимальности. Эвристический характер построения иерархической структуры проявляется, прежде всего, в выборе числа уровней и перечня составляющих их подсистем. Наиболее сильна субъективность в ИЛИ-деревьях, когда вид системы еще не известен и возможно различное их представление.

Выводы и рекомендации. Таким образом, на начальных этапах проектирования необходимо проводить функционально-стоимостный анализ с целью добиться максимального снижения стоимости изделия за счет совершенствования его конструкции и технологии изготовления.

Использование математической модели монтажного корпуса представленной в работе позволяет выполнить расчет ГУ, обеспечив при этом повышение качества их функционирования уже на стадии проектирования.

Для этого необходимо: внедрить результаты расчетов в процессы проектирования и производства с целью повышения надежности и долговечности гидравлического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bhalchandra V. Khode, Nalini Vaidya, Sujesh D. Ghodmare, Prafull Wadhai; Mathematical model & methodology for optimal hydraulic design of labyrinth spillway. AIP Conf. Proc. 6 August 2024;

2. Гурбан О.К. Выбор критериев оптимальности гидроблоков управления технологического оборудования / Гурбан О.К., В.В. Пинчук, А.А.

Гинзбург //Актуальные вопросы машиноведения: сб.науч.тр. /Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси- Минск, 2023

3. Оптимизация критериев при расчете и проектировании монтажных корпусов гидроблоков управления/ О.К. Гурбан, В.В. Пинчук, А.А. Гинзбург //Актуальные вопросы машиноведения: сб.науч.тр. /Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси».- Минск, 2024, с.

УДК 631.674.6

МОДЕРНИЗАЦИЯ МАШИНЫ ПЕРЕДВИЖНОЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МПД-500 В РЕЗУЛЬТАТЕ ВНЕДРЕНИЯ ЦЕПНОГО МЕХАНИЗМА ПРИВОДА БАРАБАНА

А.А. Алагинский, А.С. Хоронжина, А.А. Белозор
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены изменения, внесённые в конструкцию машины передвижной дождевальной МПД-500 (рис.1). Изначально в конструкции использовался редуктор, на валу которого располагалась ведущая шестерня, приводящая в движение барабан для сматывания трубы. В ходе модернизации данный привод был заменен на упрощенную конструкцию с использованием цепного механизма привода барабана.

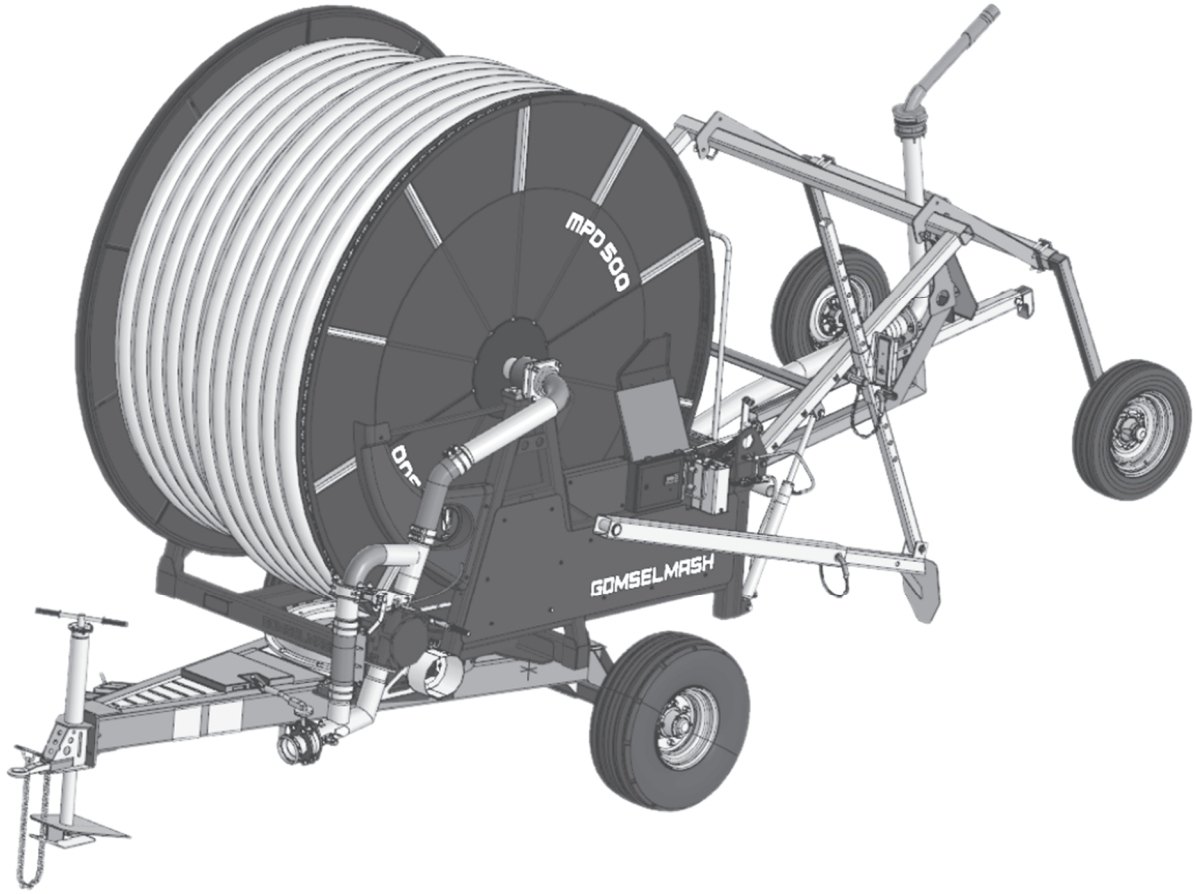


Рис. 1 – Машина передвижная дождевальная МПД-500

Принцип действия устройства остался прежним, однако модернизация позволила значительно снизить себестоимость и упростить производство благодаря использованию более чем на 85 % серийных узлов. Внесенные изменения не окажут отрицательного влияния на эксплуатационные параметры машины, а также, обеспечили модульную замену узлов, подверженных износу.

Введение: В современных условиях сельского хозяйства особое значение приобретает повышение эффективности и надёжности техники. Одним из таких направлений является модернизация существующих моделей дождевальных машин. Машина передвижная дождевальная МПД-500, активно применяемая в различных аграрных регионах, обладает потенциалом для конструктивных улучшений, направленных на снижение себестоимости и повышение ремонтопригодности.

Объект исследования: В качестве объекта исследования рассматривается механизм сматывания ПЭТ трубы машины МПД-500, представляющий собой привод барабана с редуктором и установленной на его валу шестерней, которая передает вращение через зацепление с зубчатым колесом закрепленным на барабане.

Цель исследования: Целью исследования является разработка и внедрение технического решения, позволяющего: снизить себестоимость машины, упростить ее конструкцию, повысить уровень унификации за счет использования серийных ДСЕ, сохранить функциональность и повысить ремонтопригодность базовой модели.

Методология исследования: Исследование проводилось на базе сравнительного анализа конструкций, экспериментального внедрения нового узла цепного механизма привода барабана, а также оценки влияния изменений на себестоимость, технологичность и ремонтопригодность. Были выполнены чертежи, произведён графический монтаж.

Результаты исследования: В базовой конструкции МПД-500 вращение барабана, предназначенного для сматывания поливочной трубы, обеспечивалось посредством механического привода от редуктора. На выходном валу редуктора была установлена ведущая шестерня (Рис. 2), которая находилась в постоянном зацеплении с крупногабаритным зубчатым колесом, жестко приваренным к боковой поверхности барабана. При передаче крутящего момента от редуктора на шестерню происходит вращение зубчатого колеса, вследствие чего вращает сам барабан, осуществляя сматывание ПЭТ трубы. Данная схема включает в себя массивные элементы зубчатого зацепления весом 80,1 кг, что приводит к дополнительной нагрузке на вал, ведущую шестерню редуктора.

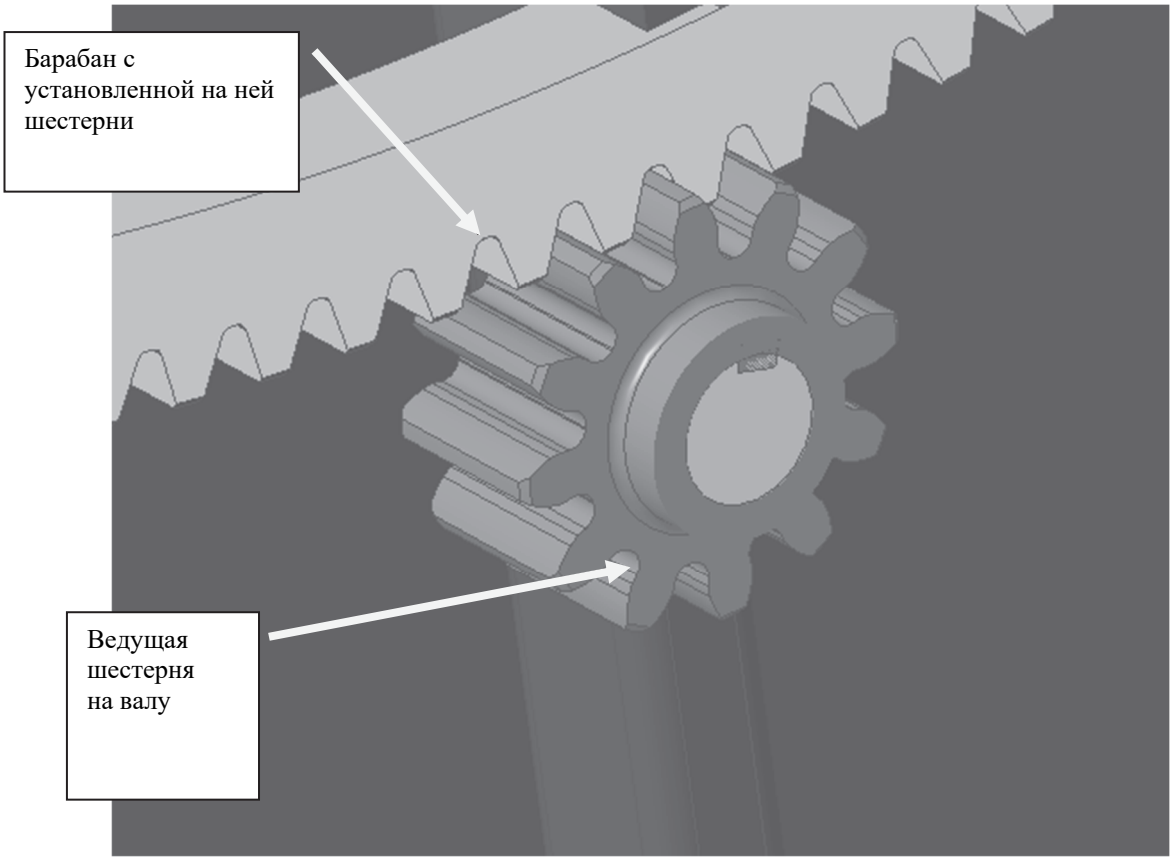


Рис. 2 – Исходный механизм сматывания барабана

В результате модернизации данное решение было заменено на цепной механизм привода барабана. Данный узел (рис. 3) состоит из:

1. Редуктора
2. Натяжника пружинного типа
3. Звездочки
4. Цепи
5. Вал ведущей звездочки

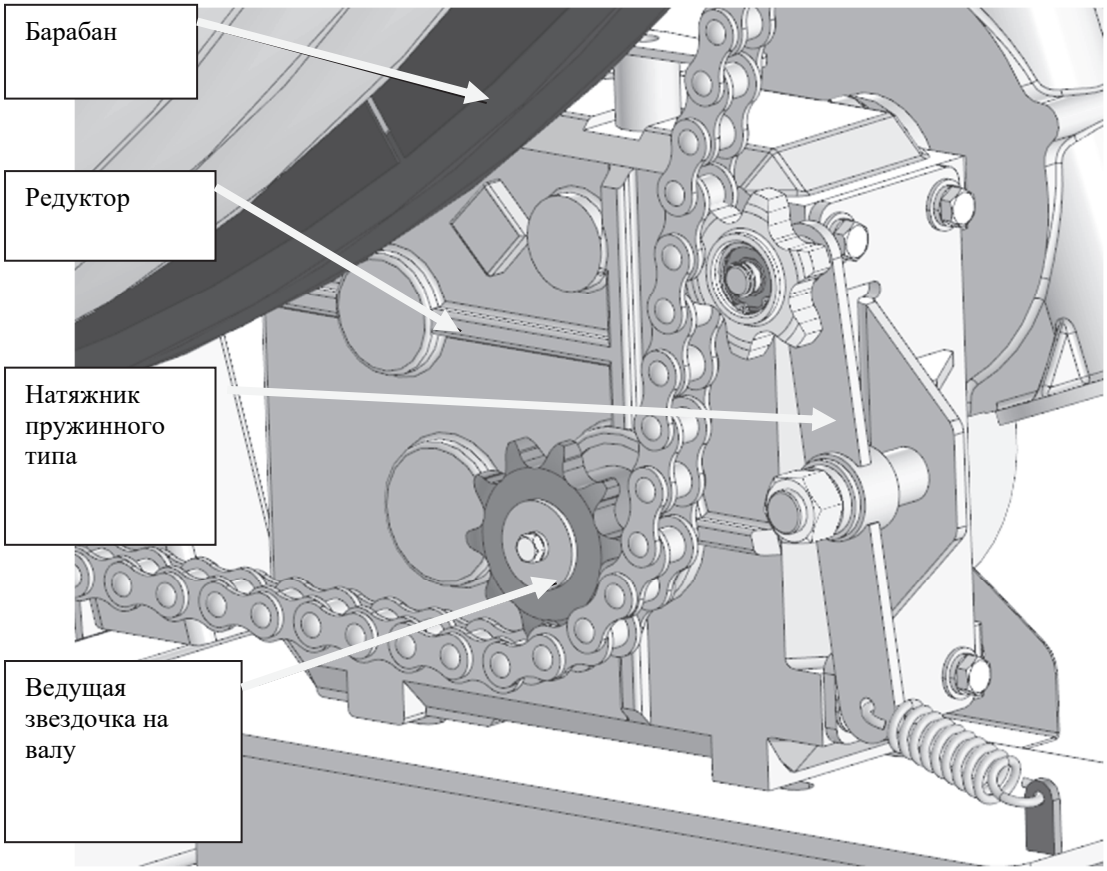


Рис. 3 – Модернизированный механизм сматывания ПЭТ трубы

Принцип работы не изменился, на валу редуктора установлена ведущая звёздочка, передающая вращение цепи. Цепь охватывает барабан по внешнему диаметру, взаимодействует с установленными на его поверхности съемными зубьями (Рис. 4), и передает крутящий момент.

Для компенсации провисания цепи при эксплуатации предусмотрен пружиный натяжной механизм, включающий звёздочку, установленную на рычаге, что позволяет поддерживать оптимальное натяжение.

Вместо цельной зубчатой шестерни большого диаметра применены сменные зубья (8 шт) (Рис. 4), взаимодействующие с цепью в процессе вращения, обеспечивающие необходимую траекторию движения и сцепление с барабаном. Данная конструкция ремонтопригодна и в полевых условиях позволяет легко заменить деформируемый элемент, в отличии от зубчатого колеса, где приходится менять весь узел.

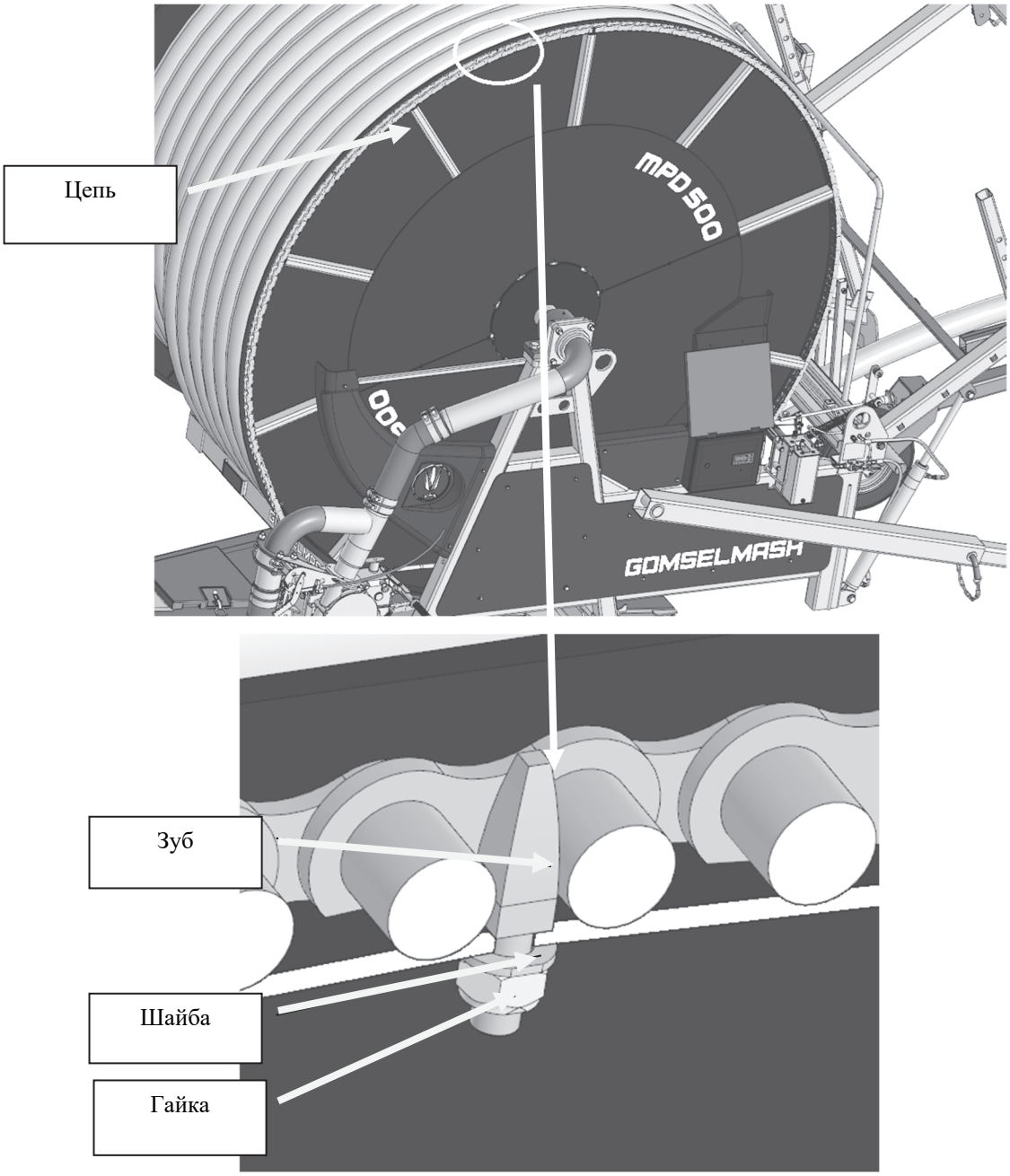


Рис. 4 – Модернизированные съемные зубья

Данный узел обеспечивает надежную, равномерную и эффективную передачу вращения с минимальными механическими потерями.

Заключение: Изначальная конструкция передвижной дождевальной машины МПД-500 предусматривала использование зубчатого зацепления на барабане располагалось массивное зубчатое колесо, взаимодействующее с шестерней редуктора. Масса этого узла составляла 80,1 кг, что увеличивало нагрузку на вал с ведущей шестерней редуктора, а также на раму барабана, усложняло сборку и имело высокую себестоимость изготовления.

Вес модернизированного привода составил всего 39 кг, что позволило:

- снизить массу конструкции более чем на 60 %,
- обеспечить ремонтопригодность без необходимости полной разборки узла,
- использовать серийные компоненты (цепь, звёздочки, механизм натяжение цепи),
- снизить себестоимость производства без ухудшения эксплуатационных характеристик.

Предложенное конструктивное решение может быть рекомендовано к модернизации других дождевальных машин барабанного типа. Полученные результаты подтверждают эффективность замены дорогостоящих, трудноизготавливаемых узлов на более простые и доступные, при сохранении функциональности и надёжности дождевальной машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сельскохозяйственные машины. Часть 1. Устройство и работа. Учебное пособие. Сабликов М. В. 1968 г.

2. Официальный пресс-центр «Гомсельмаш». «Выставка Белагро 2024»

УДК 62-235

АДАПТАЦИЯ МНОГОДИСКОВЫХ МАСЛООХЛАЖДАЕМЫХ ТОРМОЗОВ В СОСТАВЕ БОРТОВОГО РЕДУКТОРА СРЕДСТВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО

К.А. Грабок, Ю.Ю. Наливайко
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация. В работе представлены результаты разработки бортового редуктора для средства энергетического универсального самоходного с целью адаптации многодисковых маслоохлаждаемых тормозов. Рассмотрены этапы проектирования и намечены направления дальнейшего развития.

Введение. Современное сельское хозяйство предъявляет высокие требования к используемой технике, акцентируя внимание на таких ключевых характеристиках, как эффективность, надёжность и оптимизация затрат. В ответ на эти требования сельскохозяйственное машиностроение предлагает агропромышленному комплексу расширенную номенклатуру самоходных специализированных машин различного назначения. Эти машины, предназначенные для выполнения специфических работ или обработки отдельных сельскохозяйственных культур, как правило, характеризуются высоким техническим уровнем и соответствуют современным стандартам агротехнологий. Однако внедрение такой техники сопряжено с существенными капитальными затратами как на приобретение, так и на сервисное обслуживание. При этом указанные машины характеризуются низкой годовой загрузкой [1], что приводит к увеличению себестоимости выполняемых работ и конечной продукции.

Перспективным направлением выхода из сложившейся ситуации является разработка и создание универсальных энергетических средств (УЭС), максимально адаптированных для эффективного агрегатирования с широким спектром специализированных технологических модулей, предназначенных для выполнения всего комплекса механизированных работ при производстве сельскохозяйственной продукции. Для эффективного функционирования УЭС необходимо учитывать специфические условия их эксплуатации. В частности, такие машины подвергаются значительным нагрузкам и должны обеспечивать стабильную работу в различных климатических и производственных условиях. Надёжность и безопасность эксплуатации УЭС зависят от эффективности торможения в разных режимах работы, а также от устойчивости тормозной системы к влаге и запылённости, эффективного теплоотвода и защиты от

загрязнений и абразивного износа. Для реализации указанных факторов целесообразно применять закрытые маслоохлаждаемые многодисковые тормоза.

Объект исследования. Бортовой редуктор средства энергетического универсального самоходного.

Цель исследования. Разработка конструкции бортового редуктора для адаптации многодисковых маслоохлаждаемых тормозов.

Методология исследования. Теоретический, расчетно-конструктивный метод, метод сравнительного анализа, экспериментальные исследования.

Результаты исследования. Многодисковые маслоохлаждаемые тормоза (ММОТ) представляют собой систему, в которой используется большое количество относительно тонких дисков, фрикционных и стальных, работающих в масляной ванне. Принцип работы основан на замене сухого трения жидкостным и полужидкостным, что существенно снижает износ трущихся поверхностей. Применение ММОТ на УЭС обеспечивает комплексное решение проблем износа тормозной системы в тяжёлых условиях эксплуатации, существенно снижая интенсивность износа элементов за счёт работы в масляной ванне, уменьшая влияние внешних факторов благодаря закрытой конструкции и значительно увеличивая ресурс тормозных дисков в герметичном корпусе с масляным охлаждением. При этом ММОТ имеют и ряд недостатков, такие как усложнение конструкции, требующее более сложной системы смазки и охлаждения, необходимость поиска и реализации эффективных решений для теплоотвода и циркуляции масла, а также обеспечение герметичности системы для предотвращения утечек масла. Также важно правильно выбрать конструктивные параметры фрикционных дисков, так как это существенно влияет на все характеристики передачи, включая передаваемую мощность, потери холостого хода, долговечность и надежность [2].

Для адаптации было принято решение использовать в конструкции бортовых редукторов энергосредства MS450 комплекты тормозных дисков производства ОАО «БЕЛАЗ», используемых в конструкции ходовой системы карьерных самосвалов. Оценка необходимого тормозного пути производилась в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.019-2005 «Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные». Результаты расчета требуемого тормозного пути и потребного момента для обеспечения заданного пути при начальной скорости 20 и 40 км/ч представлены в таблице 1.

Таблица 1 – **Результаты расчета требуемых тормозных характеристик**

Передача	Скорость, км/ч	Тормозной путь, м	Момент потребный, Н·м
1 передача	20	8,04	**19 903**
2 передача	40	24,98	**25 640**

За основу разрабатываемого бортового редуктора был взят двухступенчатый планетарный бортовой редуктор энергосредства MS450. На рисунке 1 представлены кинематические схемы базового и вновь разрабатываемого бортовых редукторов.

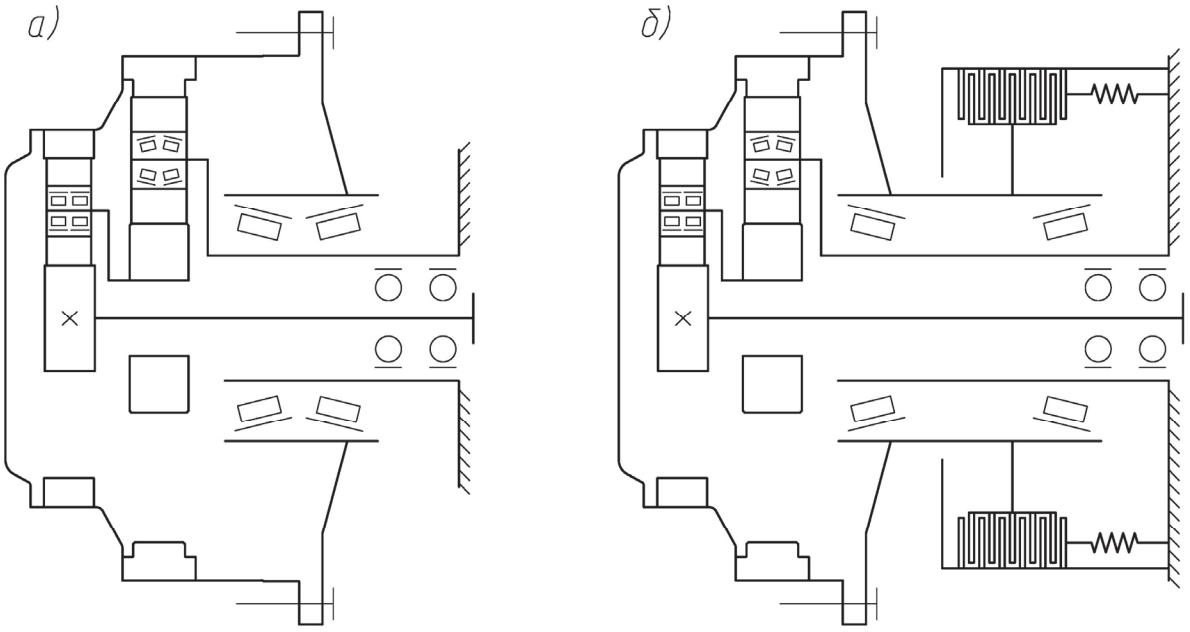


Рис. 1 – Схемы кинематические бортовых редукторов: а – базового бортового редуктора; б – вновь разрабатываемого

Для обеспечения потребного момента, с учетом рекомендаций [2], в конструкции бортового редуктора для одного тормозного фрикционного узла было принято 5 пар трения.

Конструктивная схема тормозного узла бортового редуктора представлена на рисунке 2 и представляет собой набор неподвижных стальных дисков 1 и установленных в промежутках между ними фрикционных дисков 2. При подаче рабочей жидкости под давлением происходит смещение поршня 3 и сдавливание пакета гладких стальных и фрикционных дисков, за счет чего происходит процесс торможения и остановка энергосредства. Для возврата поршня 3 в исходное положение и снятия давления с пакета дисков используется набор возвратных пружин 4.

Для уплотнения поршня 3 используются уплотнительные кольца 5 по ГОСТ 9833-73.

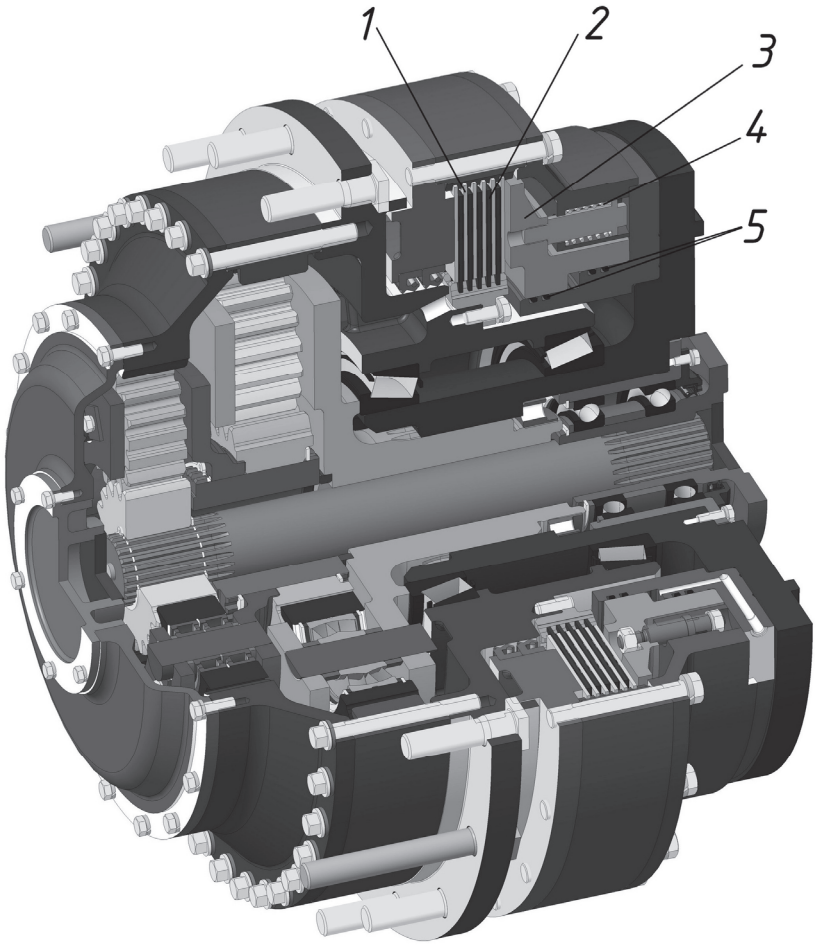


Рис. 2 – Схема тормозного узла бортового редуктора: 1 – диски стальные гладкие; 2 – диски фрикционные; 3 – поршень; 4 – пружина возвратная; 5 – кольца уплотнительные

При проектировании тормозного узла важно обеспечить отвод поршня после процесса торможения для предотвращения постоянного подтормаживания дисков, которое приводит как к значительному росту потребного крутящего момента на входном валу бортового редуктора, так и к критическому росту температуры внутри редуктора. Значительное повышение температуры, совместно с колебательными процессами при включении и выключении тормоза, может привести к релаксации остаточных напряжений в дисках и их короблению в виде «тарельчатости» [2], что в конечном итоге приводит к выходу из строя всего тормоза.

Для возврата поршня тормоза в исходное положение необходимо преодолеть ряд сопротивлений и учесть вес перемещающихся частей, материалы трущихся деталей и т.д. Узел тормозного механизма можно

представить как гидроцилиндр и вести расчет усилий сопротивлений по методике расчета механических потерь в цилиндропоршневой группе [3].

Расчет сопротивления F перемещения поршня в исходное положение можно разделить на составляющие и представить в следующим виде:

$$F = F_{\text{н}} + F_{\text{у}} + F_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{н}}$– сопротивление от сил трения в направляющих, Н;

$F_{\text{у}}$ – сила трения в уплотнениях, Н;

$F_{\text{пр}}$ – сила противодавления выталкиваемого поршнем объема жидкости, Н.

Сила трения $F_{\text{н}}$ в направляющих цилиндропоршневой группы может быть рассчитана по формуле (2).

$$F_{\text{н}} = f \cdot m \cdot g, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения в направляющих, с учетом шероховатости поверхности, вида трения, материалов и скорости перемещения принимаем f = 0,1 [3];

m – масса перемещающихся деталей, кг.

Сила трения, создаваемая уплотнительными элементами, будет состоять из суммы сил трения создаваемых каждым из уплотнительных колец:

$$F_{\text{у}} = F_{\text{у1}} + F_{\text{у2}}, \quad (3)$$

Сила трения, создаваемая i-м кольцом с поверхностью трения поршня тормоза, может быть вычислена по формуле (4).

$$F_{\text{у}i} = \pi \cdot d \cdot b \cdot p_0 \cdot f \cdot z, \quad (4)$$

где d – диаметр уплотняемой поверхности, мм;

b – ширина контакта резинового кольца с поверхностью поршня, мм;

p_0 – удельное давление в зоне уплотнения, МПа;

f – коэффициент трения между резиновым кольцом и стальным поршнем, с учетом шероховатости поверхности, вида и характера трения, материалов и скорости перемещения, f = 0,3;

z – количество уплотнительных элементов, $z = 1$.

Удельное давление в зоне контакта резинового кольца с поршнем, формирующееся вследствие предварительного сжатия кольца при монтаже, описывается решением задачи Ламе [5] и представляется в виде формулы (5).

$$p_0 = \frac{E \cdot (r_{\text{Н}}^2 - r_{\text{В}}^2) \cdot [-\varepsilon_{t\text{Н}}(2r_{\text{Н}}^2 + r_{\text{В}}^2)]}{2 \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot (2r_{\text{Н}}^2 + r_{\text{В}}^2) \cdot (r_{\text{Н}}^2 + 2r_{\text{В}}^2) - 3r_{\text{Н}}^2 \cdot r_{\text{В}}^2\right]}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости, для резиновых уплотнительных колец зависит от конкретного типа резины, ее твердости и обычно лежит в диапазоне E = 7…12 МПа [4];

$r_{\text{Н}}, r_{\text{В}}$ – наружный и внутренний радиусы резинового кольца соответственно, мм;

$\varepsilon_{t\text{Н}}$ – относительная тангенциальная деформация кольца от наружной запирающей поверхности;

$$\varepsilon_{t\text{Н}} = \frac{r_{\text{уст}} - r_{\text{Н}}}{r_{\text{Н}}}, \quad (6)$$

где $r_{\text{уст}}$ – наружный радиус кольца после установки и сжатия цилиндром, мм.

Ширину контакта резинового кольца с поверхностью поршня можно определить по формуле (7), воспользовавшись методами теории упругости при сжатии цилиндра с плоскостью [6].

$$b = 2{,}15 \cdot \sqrt{\frac{F_{\text{к}}}{L_{\text{к}}} \cdot \frac{d_{\text{к}}}{2 \cdot E}}, \quad (7)$$

где $F_{\text{к}}$ – сила, сжимающая кольцо, Н;

$L_{\text{к}}$ – длина уплотняемой поверхности, м;

$d_{\text{к}}$ – диаметр кольца, м.

Результаты расчета параметров сопротивления по приведенной выше методике сведены в таблицу 2 для различных вариантов модуля упругости уплотнительных резиновых колец, так как указанные выше значения модуля ориентировочные, а точные данные зависят от конкретного состава и твердости резины.

Таблица 2 – **Результаты расчета параметров сопротивления перемещению поршня**

Параметр	Размерность	Значение	
Модуль упругости	МПа	7	12
Удельное давление резинового кольца на стенку цилиндра	МПа	1,08	1,85
Ширина контакта резинового кольца с уплотняемой поверхностью поршня	мм	2,07	
Сопротивление сил трения в направляющих	Н	46	
Сопротивление сил трения в уплотнениях	Н	1582	2712
Сила противодавления выталкиваемого поршнем объема жидкости	Н	3108	
Суммарная сила сопротивления перемещению поршня	Н	4736	5866

Полученные расчетные данные сравним с проведенными опытными работами по определению необходимого усилия пакета пружин для возврата поршня в исходное положение. Схема испытаний тормозного узла при определении эффективности пакета пружин для отвода поршня представлена на рисунке 3.

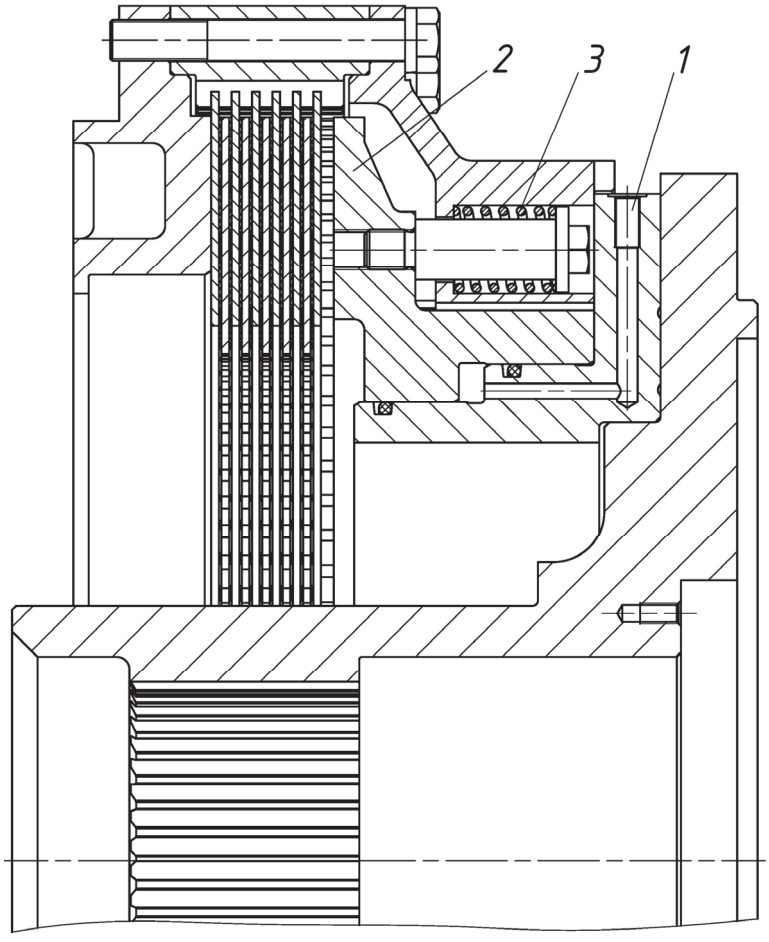


Рис. 3 – Схема испытаний тормозного узла: 1 – отверстие для подвода рабочей жидкости; 2 – поршень; 3 – пружина возвратная

В рамках экспериментальных работ была проведена серия испытаний базовых комплектов пружин, пронумерованы от 1 до 4 (рис. 4), и их модификация с увеличенным усилием за счет принудительного поджатия (1а, 2а, 3а). В ходе испытаний к отверстию 1 подавалось масло МГЕ-46В ТУ 38.001347-00 под давлением 6,3 МПа до момента сдавливания поршнем 3 пакета стальных и фрикционных дисков и выдерживалось в данном состоянии 0,5 мин с последующим полным сбросом давления. После снятия давления фиксировался факт возврата или невозврата поршня в исходное положение. В случае невозврата поршня производилась полная разгерметизация системы и повторно фиксировался факт возврата или невозврата поршня в исходное положение. Результаты экспериментальных исследований и расчетные данные представлены в виде диаграммы на рисунке 4.

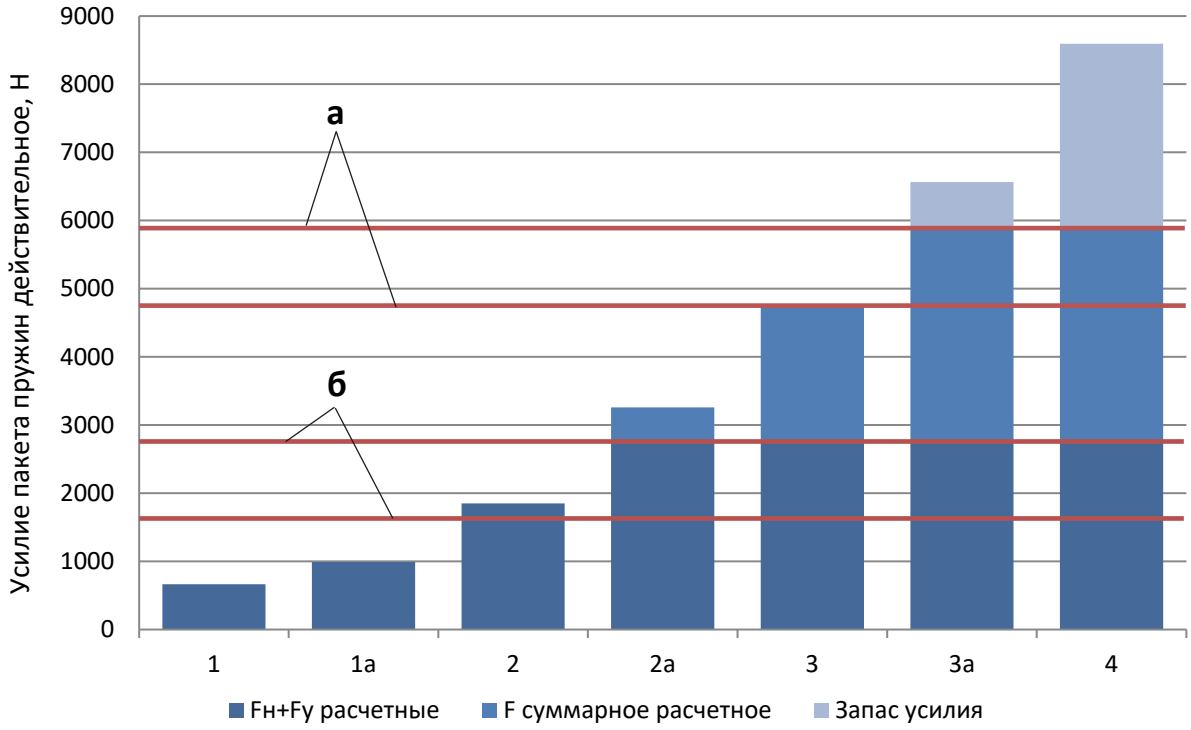


Рис. 4 – Результаты исследований: а – расчетные значения суммарной силы сопротивления перемещению штока; б – расчетные значения силы сопротивления в направляющих и уплотнениях

В результате опытных работ установлено: комплекты пружин 1, 1а, 2 и 2а не обеспечили возврат поршня в исходное положение ни в одном из случаев. Комплекты пружин 3 и 3а обеспечили возврат поршня в исходное положение только при полной разгерметизации системы. Комплект пружин 4 обеспечил стабильный возврат поршня в исходное положение при сбросе давления.

Анализ расчетных данных демонстрирует существенно влияние модуля Юнга материала резиновых колец на сопротивление перемещению уплотнений, зависящий от конкретного состава резиновой смеси, коэффициента трения, зависящего от шероховатости контактирующих поверхностей, толщины смазочного слоя и режима трения (граничное, жидкостное, смешанное). Сопоставление расчетных и экспериментальных данных подтверждает их удовлетворительную сходимость, однако для повышения точности модели необходимо учитывать влияние перечисленных выше параметров. Рекомендуется разрабатывать пакет пружин с достаточным запасом усилия для компенсации возможных отклонений.

Разработанный бортовой редуктор с многодисковыми тормозами успешно завершил стендовые испытания, подтвердив соответствие заданным техническим требованиям. В настоящее время проводится верификация принятых конструктивных решений в составе энергосредств MS450 с целью оценки работоспособности узла в реальных эксплуатационных условиях. Тем не менее, уже на данном этапе можно выделить ряд направлений модернизации бортового редуктора:

– перенос пакета пружин с целью обеспечения возможности регулировки суммарного усилия пакета и регулировки зазора между поршнем и пакетом дисков;

– проработка замены уплотнительных колец по ГОСТ 9833-73 на специализированные штоковые уплотнения, состоящие из ПТФЭ кольца и кольца круглого сечения, что позволит снизить сопротивление трения в уплотнениях.

Заключение. Предложенная в работе методика расчета позволяет на начальном этапе проектирования оценить сопротивление сил перемещению поршня, создаваемых резиновыми уплотнения круглого сечения.

Проведенная проверка адекватности методики расчета показала удовлетворительную сходимость, но при этом необходимо учитывать возможные отклонения при производстве и разрабатывать узел с достаточными запасами для их компенсации.

Применение разработанного бортового редуктора с многодисковыми маслоохлаждаемыми тормозами обеспечит стабильную работу энергосредства MS450 в условиях повышенной влажности и запыленности, эффективно решая проблему поддержания тормозных характеристик в сложных эксплуатационных условиях. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенных технических решений и обосновывают необходимость дальнейших исследований по оценке ресурса узла при длительных циклических нагрузках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуринов, В. А. Концепция создания мобильных сельскохозяйственных машин на базе энергетических средств / В. А. Шуринов, А. А. Дюжев // Современные методы проектирования машин: республиканский межведомственый сборник научных трудов: в 7 т. / под общ. ред. П. А. Витязя; редкол.: П. А. Витязь (пред.) [и др.]. – Минск: Технопринт, 2004. – Вып. 2, т. 1: Перспективные направления создания машин. – С. 101-109.

2. Антонюк, В. Е. Динамическая стабилизация в производстве маложестких деталей / В. Е. Антонюк. – Минск: Белорусская наука, 2017. – 190 с.

3. Металлорежущие станки. Учеб. Пособие для втузов Н.С. Колев, Л.В. Красниченко, Н.С. Никулин и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 500 с., ил.

4. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник/ Л.А.Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с., ил.

5. Макаров, Г. В. Уплотнительные устройства [Текст]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1973. – 232 с.: черт.; 22 см.

6. Справочник по сопротивлению материалов/ Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.

УДК 620.178.4/.6

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ ПРИВОДНЫХ ЦЕПЕЙ

Р.В. Попков
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В данной работе предлагается способ повышения качества испытания цепей различного типа на примере приводной роликовой цепи путём автоматизации испытаний, что позволит исключить неточности в ходе проведения испытаний.

Введение

Испытания машин, а следовательно их узлов и деталей – одно из важнейших направлений технического прогресса [1] в машиностроении.

Испытания являются основным источником абсолютного большинства достоверных сведений о свойствах и качестве объектов испытаний.

Данная работа посвящена испытаниям цепной передачи и ее элементов. Цепная передача – одно из величайших изобретений человечества, т.к. она многофункциональна и эффективна. Она служит для передачи механической энергии при помощи гибкого элемента – цепи, за счет сил зацепления. Может иметь как постоянное, так и переменное передаточное число. Основными категориями цепных передач являются: грузоподъемные, тяговые, приводные.

Данная передача состоит из бесконечной замкнутой цепи с подвижными звеньями, одной ведущей и одной или несколькими ведомыми звездочками с зубьями. Диаметр ведущей звездочки будет меньше ведомой, если передача понижающая, и наоборот, при повышающей передаче диаметр ведущей звездочки будет больше ведомой. Зубья зацепляют отверстия в звеньях цепи, которая передает вращательное движение.

При работе цепной передачи цепь изнашивается, провисание цепи увеличивается, а натяжение [3] ветви уменьшается; в результате условия работы изменяются, а в цепном контуре возникают вибрации и резко увеличивается шум передачи. При стреле провисания, превышающей 10-12% межцентрового расстояния, цепь пробуксовывает, захлестывает и соскакивает со звездочки.

Для обеспечения работоспособности цепной передачи необходимо периодически проводить ее регулировку для обеспечения оптимального предварительного натяжения.

Актуальность данной работы заключается в получении достоверных результатов при стендовых испытаниях приводных цепей, что в перспективе обеспечит стабильную и надежную работу цепей на протяжении их срока службы.

Объект исследования

Объектом исследования является приводная роликовая цепь 80-1 "PROCHAIN".

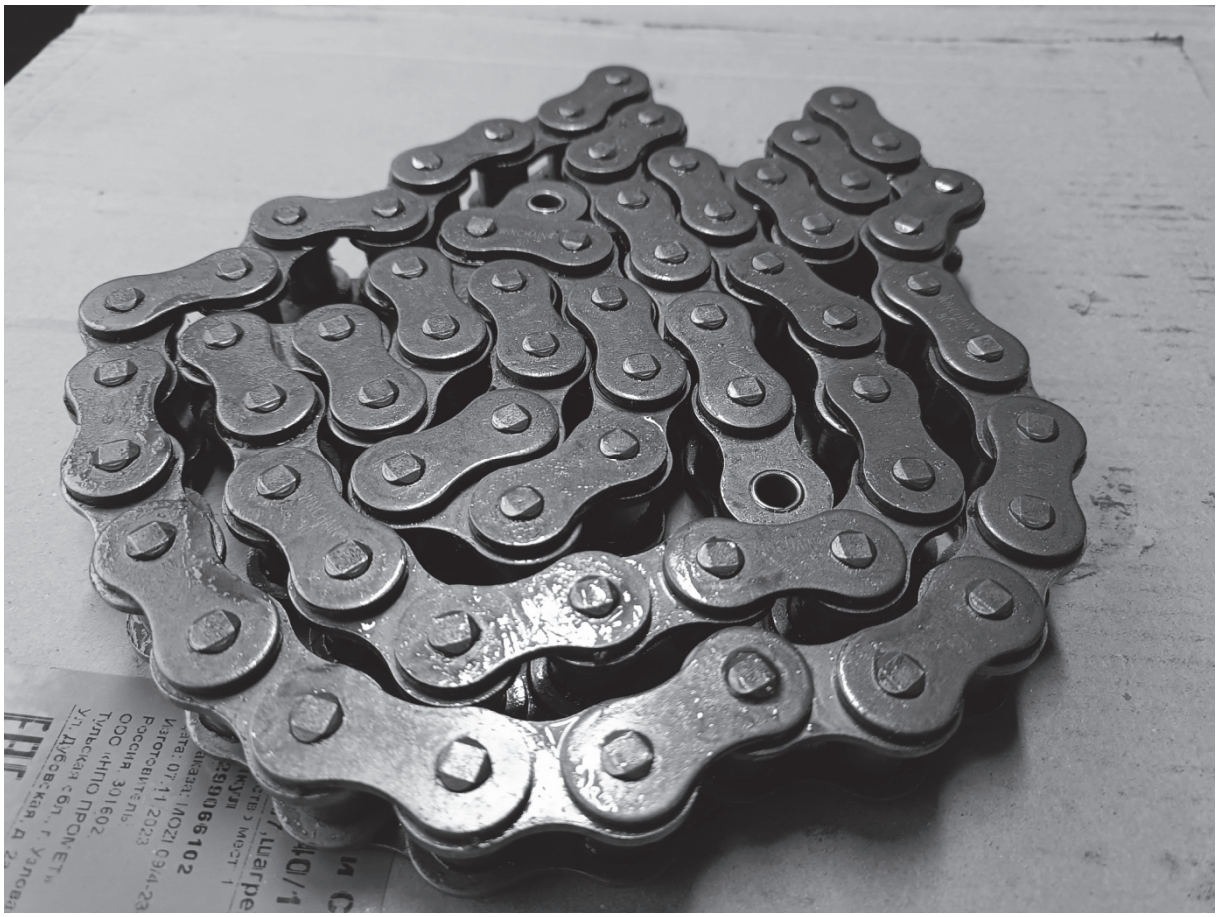


Рис. 1 – Приводная однорядная роликовая цепь

Цель исследования

Целью данного исследования является повышение качества ускоренных сравнительных стендовых испытаний цепей, достоверности и сопоставимости результатов за счёт автоматизации процесса испытаний.

Методология исследования

В данном разделе рассматривается способ и результаты, используемые при испытаниях цепей.

Испытания приводных цепей проводятся на стенде испытаний цепей, который состоит из следующих частей:

– силовой части стенда 1 с установленной на ней испытываемой приводной цепи, приводного гидромотора, смонтированного на коробке передач 012-7870-0118;

– силовая часть стенда смонтирована на двух плитах размерами 1080×2400×150 и 1080×2690×120;

– станции приводной 2, состоящей из насосного агрегата, масляного бака с фильтром, масляного радиатора и гидропанели с аппаратурой управления;

– нагружателя гидравлического 3, состоящего из гидронасоса нагружения, масляного бака, масляного радиатора и панели нагружения с клапаном нагрузки;

– электрошкафа 4 с силовой аппаратурой, аппаратурой управления и сигнализации.

Стенд испытаний цепей представлен на рисунке 2, а его кинематическая схема – на рисунке 3.

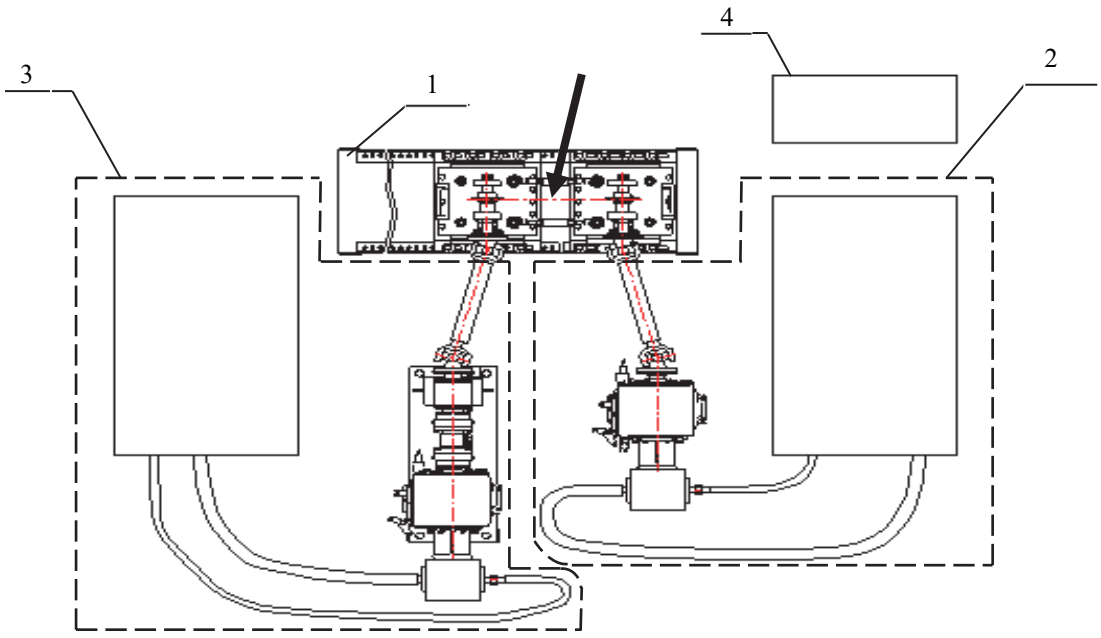


Рис. 2 – Стенд испытаний приводных цепей

1–модуль испытательный с испытываемой цепью (указана стрелкой); 2 – станция приводная; 3 – модуль нагружения; 4 – электрошкаф.

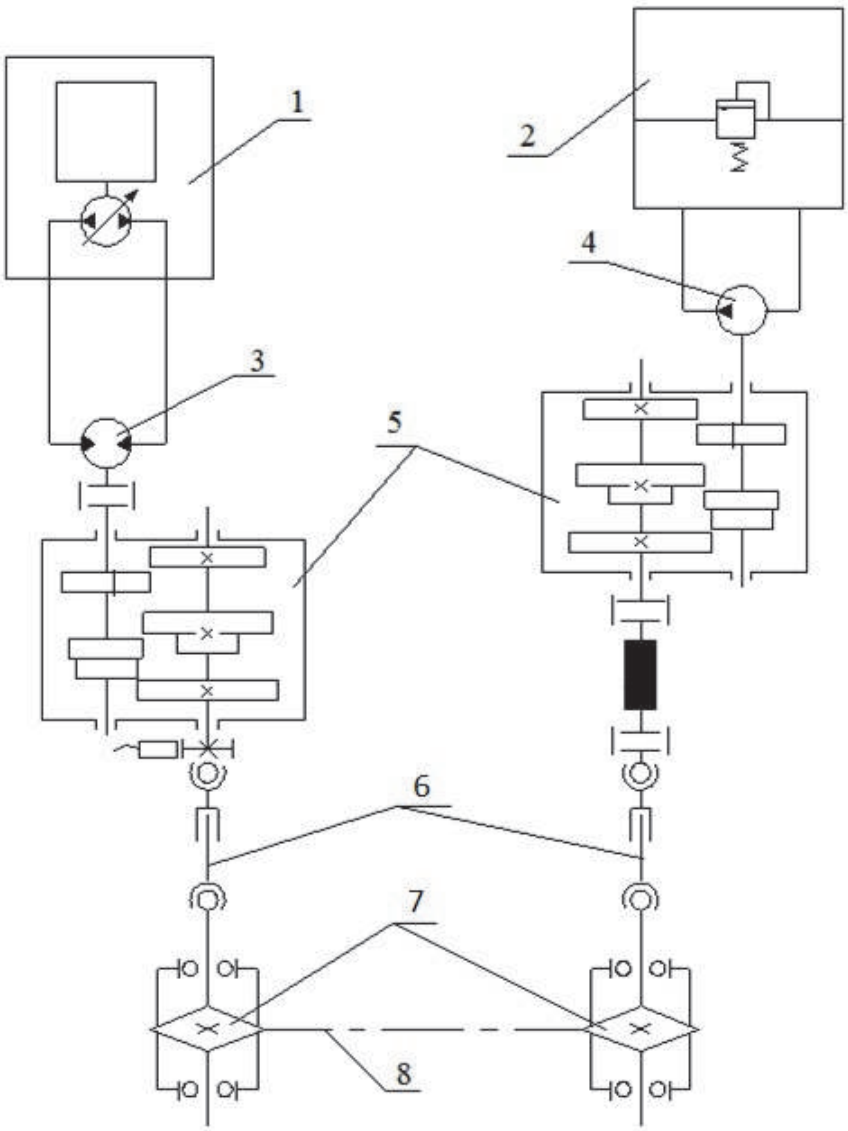


Рис. 3 – Кинематическая схема стенда испытаний цепей
1 – гидростанция приводная; 2 – гидронагружатель 09-7871-0117;
3 – регулируемый гидромотор SMV-23 гидростанции приводной;
4 – насос шестеренный НШ100Л гидронагружателя 09-7871-0117;
5 – коробка передач трехскоростная 012-7870-0118;
6 – карданный вал; 7 – звёздочки; 8 – испытываемая цепь;

Во время испытаний цепи устанавливаются на звёздочках [2], которые должны быть установлены на валах стенда со следующей точностью:

– допуск параллельности осей валов не должен быть более 0,2 мм на каждые 100 мм длины вала;

– смещение венцов звёздочек (отклонение от плоскостности) для передач с межцентровым расстоянием до 1000 мм не должно быть более

2 мм, допуск увеличивается на 0,2 мм на каждые 100 мм межцентрового расстояния свыше 1000 мм.

Цепь, устанавливаемая на звёздочках, должна быть отрегулирована на натяжение.

Натяжение считается нормальным, если при межцентровом расстоянии звёздочек 1000 мм стрела провисания ведомой ветви цепи составляет (40±10) мм при приложении усилия (160±10) Н.

Регулировка натяжения цепи проводится при помощи двух тяг, показанных на рисунке 4. При этом должно быть обеспечено сохранение вышеприведенных параметров, что является трудоемким процессом. С целью снижения трудоемкости, обеспечения и поддержания оптимального натяжения цепи в автоматическом режиме предлагается использовать гидроцилиндры, в которых будет поддерживаться требуемое давление.

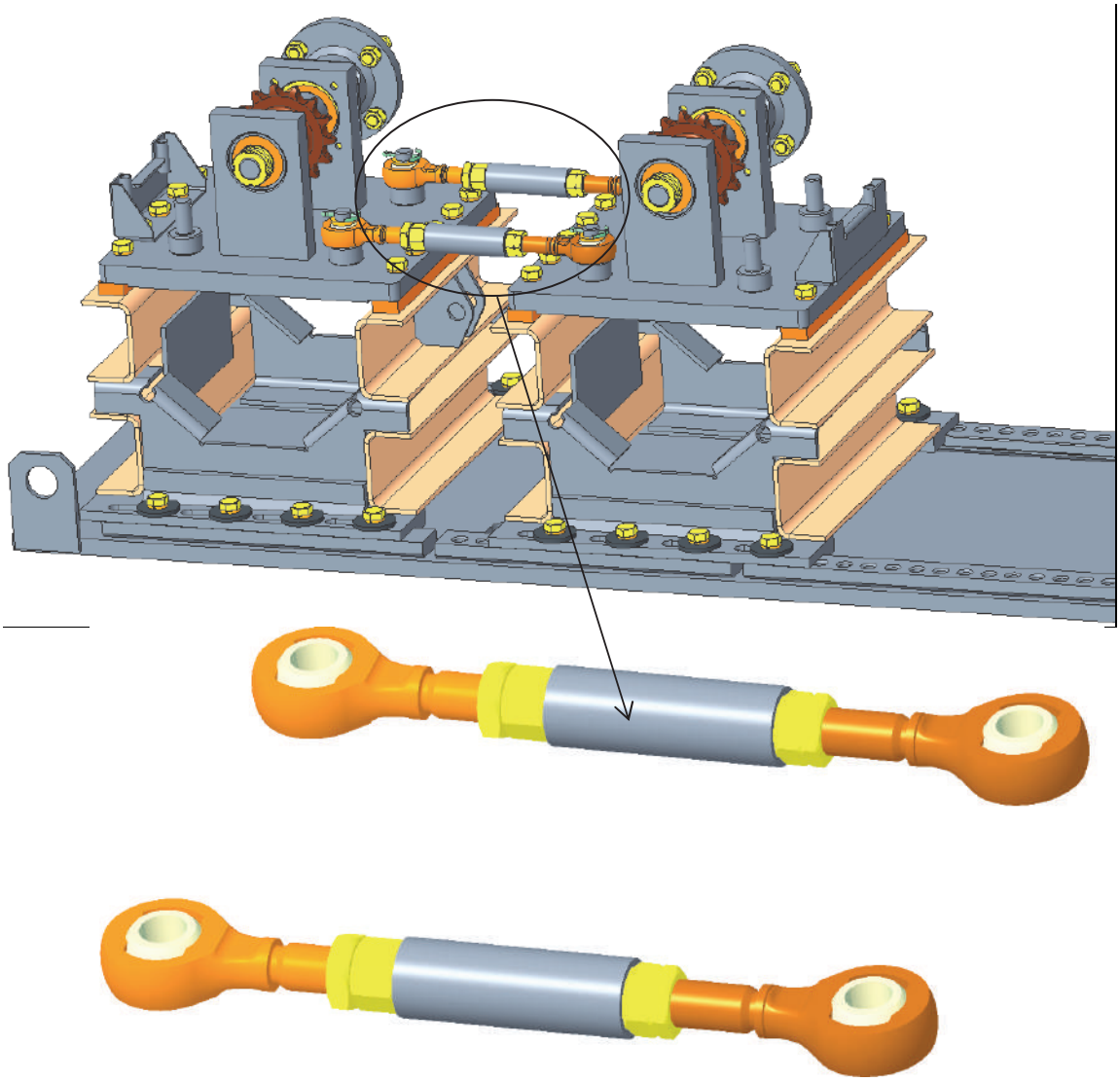


Рис. 4 – Тяги для регулировки

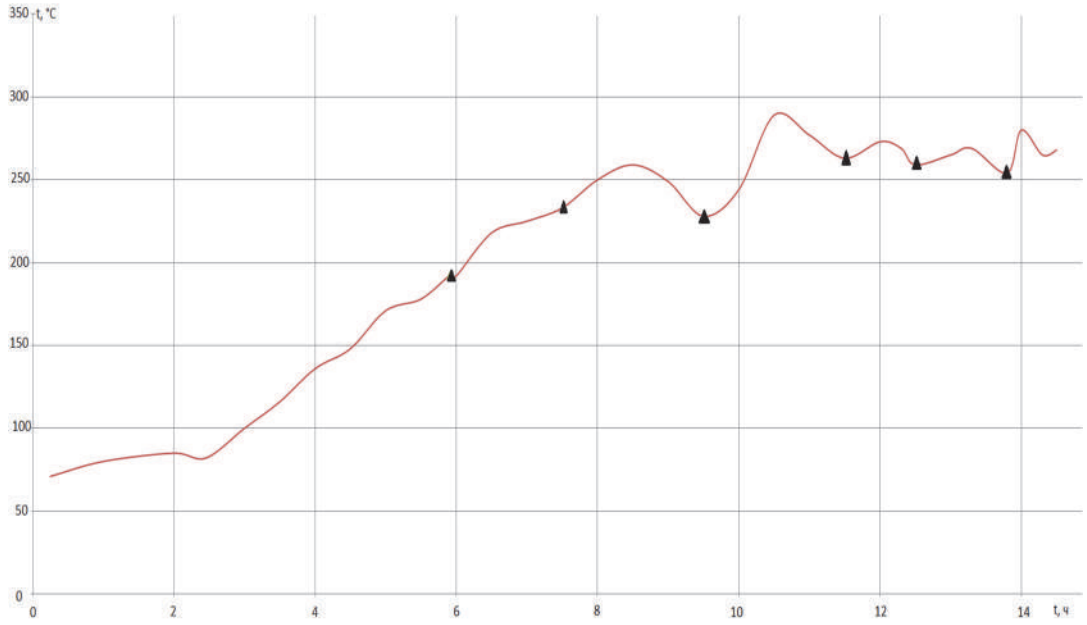


Рис. 5 – График зависимости температуры от наработки

На рисунке 5 представлен график зависимости температуры цепи от наработки. Точками указаны регулировки натяжения цепи.

При проведении ускоренных сравнительных стендовых испытаний натяжение цепи снижается вследствие износа ее элементов. Это приводит к ухудшению контакта роликов с профилем зубьев и возникновению динамических ударов, что в свою очередь ускоряет износ звездочек и цепи.

В случае перенатяжения цепи в цепном контуре возникают дополнительные нагрузки, которые могут превышать в несколько раз рабочее натяжение. Это приводит к прокручиванию валиков и втулок в проушинах пластин цепи, увеличению износа шарниров цепи и зубьев звездочек, повышению температуры, что резко снижает срок службы/наработки цепной передачи в целом.

Оптимальное натяжение позволяет равномерно распределить нагрузку, снизить износ шарниров цепи и зубьев звездочек, избежать ударных нагрузок.

Для достижения более точного и постоянного натяжения цепи, спроектирован специальный исследовательский стенд.

Результаты исследования

В процессе исследования было выявлено, что для наиболее точного и постоянного поддержания натяжения, а также автоматизации процесса испытаний требуются гидроцилиндры, которые позволят обеспечить оптимальное натяжение цепи.

Для достижения данной цели и было принято решения о применении в конструкции стенда гидроцилиндров (см. рисунок 6). Это повысит точность проведения испытаний, а также исключит «человеческий фактор».

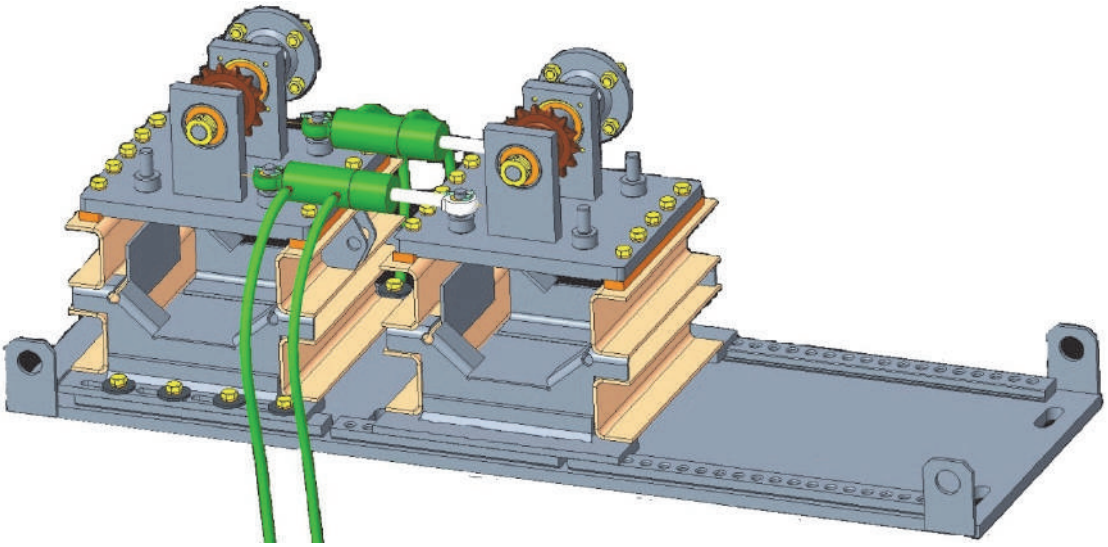


Рис. 6 – Стенд испытаний цепей с гидроцилиндрами

Заключение

В процессе исследований было выявлена одна из наиболее важных задач по организации проведения ускоренных сравнительных стендовых испытаний цепей – обеспечение и поддержание оптимального натяжения цепи в процессе испытаний, которая, с одной стороны, должна дать равномерное распределение нагрузки, с другой, – обеспечить идентичные условия и сопоставимость результатов испытаний различного типа цепей.

Спроектированный стенд позволит решить задачи по проведению ускоренных стендовых испытаний цепей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Машины и стенды для испытания деталей / Под ред. Д.Н. Решетова. - М.: Машиностраение, 1979. - 343 с.ил.

2. Паспорт стенда испытания приводных цепей Уткин С.А.

3. Проектирование цепных передач: Справочник – 2-е изд. / Готовцев А.А., Котенок И.П. 1982 – 336 с.

УДК 621.793.7

НОВЫЕ БОРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

С.И.Чернецкий[1], Г.В. Петришин[2]
[1]Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь
[2]Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет им. П.О.Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация: *В статье предложены диффузионно-борированные стальные проволоки в качестве нового электродного материала для электроискрового легирования. Покрытия на основе боридов железа (FeB и Fe_2B) обеспечивают микротвёрдость до 1800 HV и в 3–4 раза повышают износостойкость по сравнению с неупрочнённой сталью 65Г. Технология сочетает высокую адгезию, низкую стоимость и энергоэффективность, что делает её перспективной для упрочнения режущих элементов сельхозтехники, подверженных абразивному износу.*

Ключевые слова: *электроискровое легирование, износостойкость, микротвёрдость, борированные материалы, сельскохозяйственная техника, упрочнение поверхности, абразивный износ.*

Abstract: *The article proposes diffusion-borated steel wires as a new electrode material for electric spark alloying. Coatings based on iron borides (FeB and Fe_2B) provide microhardness up to 1800 HV and increase wear resistance by 3-4 times compared to non-hardened steel 65G. The technology combines high adhesion, low cost and energy efficiency, which makes it promising for strengthening cutting elements of agricultural machinery subject to abrasive wear.*

Key words: *electric spark alloying, wear resistance, microhardness, borated materials, agricultural machinery, surface hardening, abrasive wear.*

Технология электроискрового легирования (ЭИЛ) является эффективным и экономичным методом повышения износостойкости, твердости и коррозионной стойкости поверхности металлических деталей [1]. Метод основан на использовании кратковременных импульсных электрических разрядов между анодом (электрод-покрытие) и катодом (обрабатываемая деталь), приводящих к переносу материала анода на поверхность катода и формированию прочного поверхностного слоя [2]. К достоинствам технологии ЭИЛ можно отнести: высокая адгезия покрытия к основному материалу (достигается за счет диффузионного и химического

взаимодействия); локальность нанесения (возможность упрочнения только критических участков детали); низкая температура процесса (деталь не подвергается объемному нагреву, что исключает коробление и изменение структуры основы); энерго- и ресурсоэффективность; простота оборудования и возможность нанесения покрытий в полевых условиях. Недостатками технологии ЭИЛ являются невысокая производительность процесса, относительно малая толщина формируемого слоя (обычно 20-100 мкм), высокая шероховатость поверхности после обработки, ограниченный перечень традиционных электродных материалов (Т15К6, ВК8, нихром, алюминий и др.), не всегда обеспечивающих требуемые свойства покрытий.

Область применения покрытий, наносимых электроискровым способом, чрезвычайно широка: упрочнение режущего инструмента, деталей штампов и пресс-форм, узлов трения в машиностроении, восстановление размеров изношенных деталей [3]. Особое значение технология имеет для сельскохозяйственного машиностроения. Режущие элементы почвообрабатывающих машин (лопатки культиваторов, ножи соломоизмельчителей, окучников, элементы косилок) работают в условиях абразивного износа и агрессивных сред, что приводит к их интенсивному износу и, как следствие, снижению качества обработки почвы и росту затрат на замену.

Традиционно для упрочнения режущих элементов сельхозтехники используются твердые сплавы или стали, упрочненные наплавкой. Однако эти методы зачастую дороги, энергоемки и приводят к деформациям деталей. ЭИЛ представляет собой альтернативу, но существующие электродные материалы (например, твердые сплавы) делают процесс дорогостоящим, а покрытия на основе карбидов вольфрама — хрупкими [4].

Использование в качестве электродного материала диффузионно-борированных проволок на основе железа позволит получать износостойкие покрытия, отличающиеся низкой себестоимостью [5]. Предполагается, что высокодисперсные и равномерно распределенные в матрице покрытия бориды железа (FeB и Fe_2B), обладающие исключительно высокой микротвёрдостью (HV 1600-2200), обеспечат высокие эксплуатационные характеристики наносимых электроискровых покрытий.

Для проверки были проведены следующие исследования.

1. Получение электродного материала: Проволока из низкоуглеродистой стали подвергалась диффузионному борированию в твердой насыщающей смеси при температуре 900-1000°С с выдержкой 2-6 часов для формирования на поверхности слоя боридов железа толщиной 100-150 мкм.

2. Электроискровое легирование: Нанесение покрытий производилось на рабочие кромки модельных образцов из стали 65Г на установке ЭЛИ-52. Оптимизировались режимы обработки (энергия разряда, частота импульсов) по критерию максимальной производительности процесса.

Металлографический анализ микроструктуры покрытий (микроскоп МИМ-10). Измерение микротвёрдости на поперечных шлифах (прибор ПМТ-3). Рентгенофазовый анализ (дифрактометр ДРОН-7) для идентификации фазового состава. Испытания на абразивный износ (прибор СМЦ-2).

Проведенные исследования показали, что микроструктура электроискрового покрытия представляет собой металлическую матрицу (на основе материала основы и электрода) с равномерно распределенными в ней мелкими включениями фаз FeB и Fe_2B, что является следствием диспергирования и переноса боридного слоя проволоки в процессе разрядов (рисунок 1).

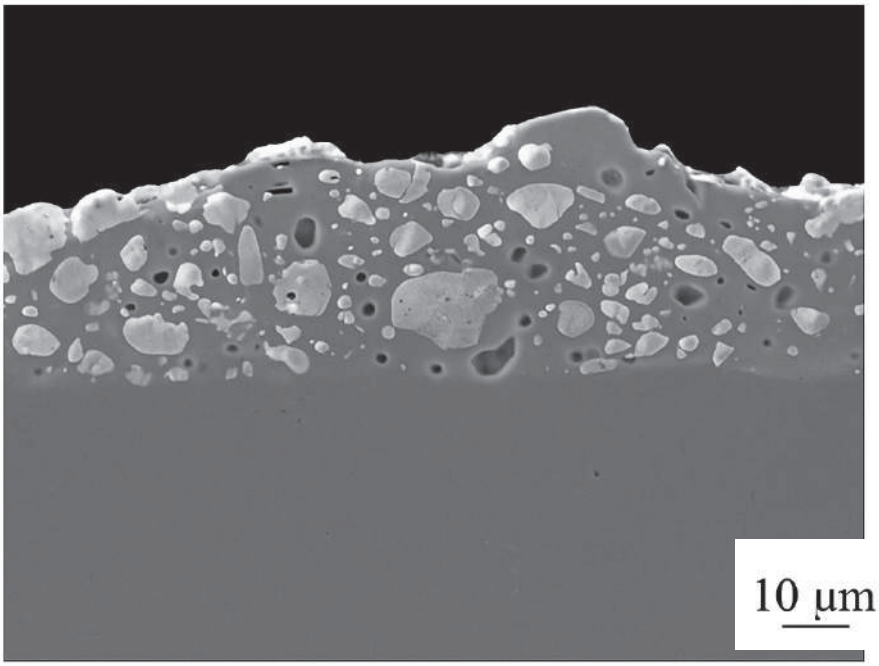


Рис. 1 – Микроструктура электроискрового покрытия, х500

На рисунке 1 видны светлые бориды железа FeB и Fe_2B, равномерно распределённые в металлической матрице. Нестабильная толщина покрытия объясняется взрывным характером технологии электроискрового метода нанесения покрытий. Ввиду кратковременного искрового воздействия на расплав выгорание легирующих элементов было несущественным, что позволило сформироваться фазам боридов железа, что практически невозможно при электродуговой наплавке ввиду существенного выгорания бора при длительном нагреве материала.

Микротвёрдость полученного покрытия составила HV 1450-1800, что существенно выше твёрдости основы (сталь 65Г, HV 250-300) и сопоставимо с твёрдостью некоторых твердых сплавов. Распределение микротвердости по глубине образца приведено на рисунке 2.

Как видно на рисунке 2, микротвердость нанесенного слоя электроискрового покрытия составляет 1200-1450 HV, что соответствует

микротведости боридов Fe_2B, ввиду чего можно говорить о незначительном присутствии или полном отсутствии в данном покрытии высокобористой фазы FeB, которая имеет твёрдость 1880 HV. Очевидно, что высокобористая фаза FeB, содержащаяся в наплавочном материале, при нанесении покрытий выгорает и переходит в менее твёрдую фазу Fe_2B. Твердость подложки в переходной зоне составляет 600-650 HV, обусловленной эффектом закалки и перемешивания материала подложки с материалом покрытия. Дальнейшее снижение твердости подложки до 250-320 HV соответствует микротвердости стали 65Г в состоянии поставки.

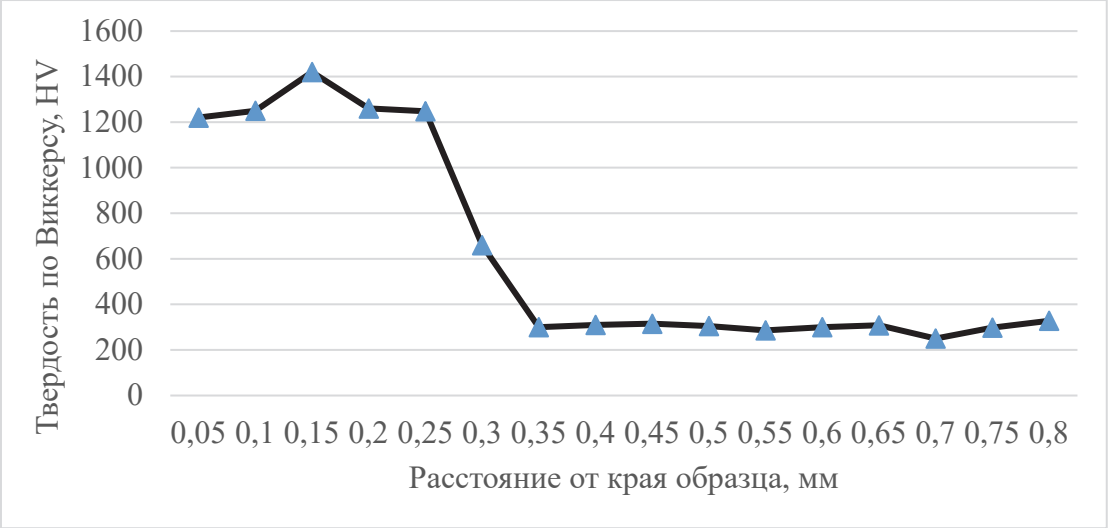


Рис. 2 – Распределение микротвердоти HV по глубине образца

Покрытие имеет хорошую адгезию к стальной подложке без признаков отслоения. Испытания на абразивный износ показали, что износостойкость образцов с борированным покрытием в 3-4 раза выше, чем у неупрочненных образцов.

Ключевое преимущество: себестоимость электродного материала на основе железной проволоки, подвергнутой борированию, значительно ниже, чем у стандартных электродов из твердого сплава.

Разработан новый перспективный электродный материал для ЭИЛ — диффузионно-борированная стальная проволока.

Экспериментально доказано, что электроискровые покрытия на основе боридов железа обладают высокими показателями микротвёрдости (до HV 1800) и износостойкости.

Технология электроискрового нанесения борированных покрытий является экономически эффективно ввиду снижения стоимости наплавочных материалов.

Нанесение разработанных электроискровых покрытий на режущие элементы сельскохозяйственной техники (лопатки культиваторов, ножи) позволит существенно повысить их срок службы в условиях абразивного износа при незначительном увеличении себестоимости самой детали. Это

открывает путь к существенной экономии на замене инструмента и повышению эффективности сельскохозяйственных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Radek N, Pietraszek J, Gądek-Moszczak A, Orman ŁJ, Szczotok A. The Morphology and Mechanical Properties of ESD Coatings before and after Laser Beam Machining. *Materials*. 2020; 13(10):2331. https://doi.org/10.3390/ma13102331

2. Петришин, Г. В. Диффузионно-легированный стальной порошок для магнитно-электрического упрочнения / Г. В. Петришин, Е. Ф. Пантелеенко, А. Ф. Пантелеенко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 4(16). – С. 26-31. – EDN HTRFZB.

3. LYALYAKIN, V.P. & KOSTYUKOV, A.Y. & ROUISSI, D.E.. (2024). HARDENING THE METAL CUTTING TOOLS BY ELECTOSPARK TREATING. Tekhnicheskiy servis mashin. 62. 91-96. 10.22314/2618-8287-2024-62-2-91-96.

4. Семчук, Геннадий. (2013). Methods of restoration and hardening of agricultural machinery parts. Technology audit and production reserves. 5. 57-59. 10.15587/2312-8372.2013.18306.

5. Bourithis, L & Papaefthymiou, Spyros & Papadimitriou, George. (2002). Plasma Transferred Arc Boriding of a Low Carbon Steel: Microstructure and Wear Properties. Applied Surface Science. 200. 203-218. 10.1016/S0169-4332(02)00901-7.

УДК 631.354.02

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРИВОДА ПЛЮЩИЛЬНЫХ ВАЛЬЦЕВ КОСИЛКИ-ПЛЮЩИЛКИ РОТАЦИОННОЙ ТРЁХСЕКЦИОННОЙ НАВЕСНОЙ КПР-9

А.В. Чирков, А.Д. Секач
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

В данной работе рассмотрен вопрос изменения конструкции привода плющильных вальцев косилки-плющилки ротационной трехсекционной навесной КПР-9 (далее – косилка-плющилка КПР-9) с целью повышения надёжности и снижения металлоемкости за счет замены цепного привода на зубчатый.

Введение

В настоящее время все более важным является не только обеспечение сельского хозяйства современной высокопроизводительной и надежной техникой для заготовки кормов, но и максимальное сбережение сырьевых, топливных и энергетических ресурсов, как в процессе производства машин, так и во время их эксплуатации. Достижению этой цели способствует снижение металлоемкости и трудоемкости изготовления выпускаемых машин, что в конечном итоге влечет за собой снижение себестоимости уборки урожая.

Существует два способа заготовки измельченных кормов из травяных культур: раздельный или двухфазный способ уборки и прямое комбайнирование. При прямом комбайнировании растения скашиваются кормоуборочным комбайном, оснащенным жаткой для трав с последующим измельчением скошенной массы и погрузкой ее в транспортное средство. При раздельном способе травы скашиваются косилками с укладкой на стерню в валок или в расстил с последующим сгребанием в валок. После достижения необходимой влажности, провяленные травы подбираются подборщиками кормоуборочных комбайнов. Двухфазный способ уборки имеет большую себестоимость по сравнению с прямым комбайнированием, требует большего количества проходов техники по полю. Однако этот способ обеспечивает получение измельченного корма оптимальной влажности, уменьшения его потерь в период хранения. Кроме этого, снижаются расходы на транспортировку измельченной массы вследствие ее меньшей плотности.

Одной из машин для обеспечения двухфазной уборки трав является выпускаемая холдингом «Гомсельмаш» косилка-плющилка ротационная КПР–9. Косилка может иметь два варианта плющильного аппарата: с

бильным устройством и с плющильными вальцами. Первый вариант предпочтителен при уборке злаковых трав, плохо поддающихся расплющиванию. Проходя через бильное устройство, злаковые стебли надламываются в нескольких местах, что способствует их быстрой сушке. Второй вариант предпочтителен при уборке бобовых трав. Прорезиненные шевронные вальцы расплющивают стебли, тем самым обеспечивая бысярое проваливание травяной массы, при этом максимально сохраняя питательные вещества.

Объект исследования

Привод плющильных вальцев косилки-плющилки КПР-9.

Цель исследования

Цель данного исследования заключается в упрощении конструкции аппарата плющильного, снижения металлоемкости и повышения надежности за счет замены цепного привода вальцев на зубчатый.

Методы исследования – теоретический, расчетно-конструктивный, метод сравнительного анализа.

Результаты исследования

В косилках-плющилках КПР-9, выпускаемых холдингом «ГОМСЕЛЬМАШ», имеется плющильный аппарат с обрезиненными шевронными вальцами, предназначенный для расплющивания трав и последующей укладки их в валок. Привод нижнего вальца (рисунок 1) осуществляется с приводной стороны плющильного аппарата от карданного вала через ременную передачу и двухрядную цепную передачу 1. Привод верхнего вальца также осуществляется двухрядной цепной передачей. Для придания вальцам противоположного направления вращения, в цепной передаче применены обводные звездочки, в связи с чем передача приобретает большие габариты и не размещается на одной боковине с приводом нижнего вальца. Поэтому цепная передача 2 привода верхнего вальца вынесена на противоположную боковину плющильного аппарата. Вращение от нижнего вальца на ведущую звездочку цепной передачи осуществляется синхронизирующим валом 3, проходящим между боковинами.

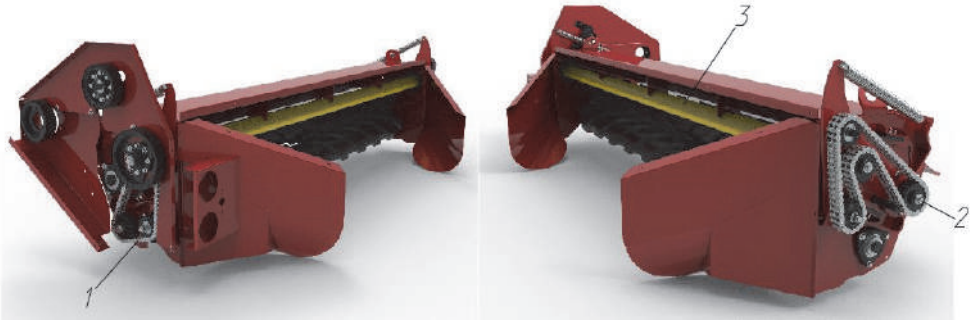


Рис. 1 – Привод плющильных вальцев
1,2 – цепная передача; 3 – синхронизирующий вал

Данная конструкция имеет следующие недостатки:

1. расположение приводов на разных боковинах плющильного аппарата и наличие синхронизирующего вала приводит к усложнению конструкции, увеличению металлоемкости и трудоемкости изготовления косилки;

2. высокоскоростная двухрядная цепная передача с обводными звездочками требует высокой точности сборки и периодического обслуживания, и имеет низкую надежность.

С целью упрощения конструкции плющильного аппарата, снижения металлоемкости и повышения надежности предлагается применить зубчатый привод плющильных вальцев.

Зубчатый привод (рисунок 2) представляет собой два рычага 1 и 2, на каждом из которых установлены по два зубчатых колеса, входящих друг с другом в зацепление. Ведущие колеса 3 верхнего и нижнего рычагов так же входят друг с другом в зацепление. При этом, для обеспечения синхронности вращения вальцев, ведущие зубчатые колеса обоих рычагов имеют одинаковое число зубьев, и зубчатые передачи верхнего и нижнего рычагов имеют одинаковое передаточное отношение. На валу ведущего колеса верхнего рычага установлен шкив 4 привода плющильного аппарата.

Ведомое зубчатое колесо 5 каждого рычага связано с плющильным вальцем. Рычаги шарнирно связаны между собой щеками 6.

Привод верхнего вальца осуществляется через зубчатую передачу верхнего рычага. Привод нижнего вальца осуществляется через зубчатые колеса 3 и зубчатую передачу нижнего рычага.

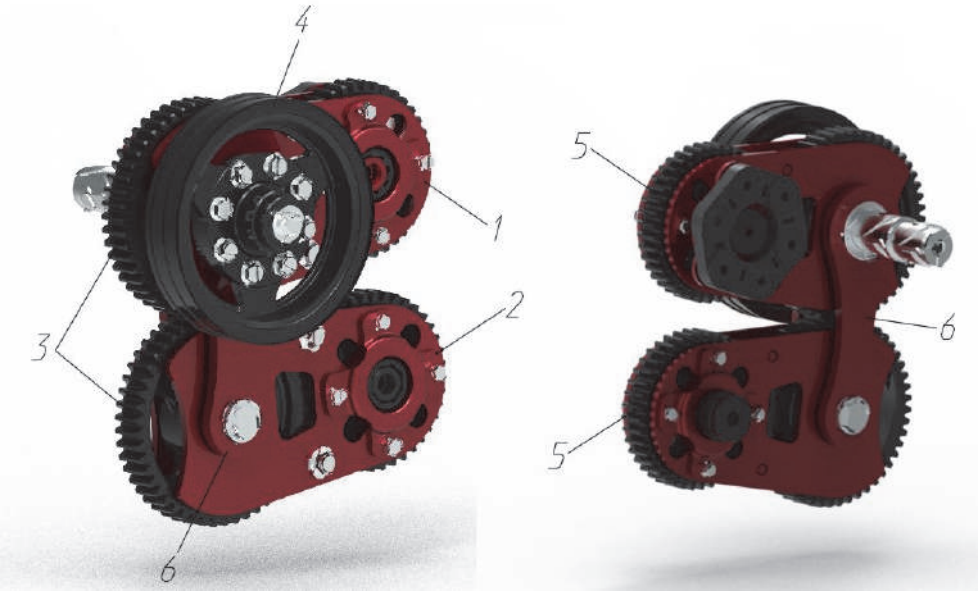


Рис. 2 – Зубчатый привод
1, 2 – рычаг; 3 – ведущее колесо; 4 – шкив; 5 – ведомое колесо; 6 - щека.

Зубчатый привод 1 (рисунок 3) устанавливается в боковину 2 плющильного аппарата взамен имеющегося цепного привода. Привод плющильного аппарата осуществляется ременной передачей 3. На противоположной боковине отсутствуют какие-либо приводные элементы.

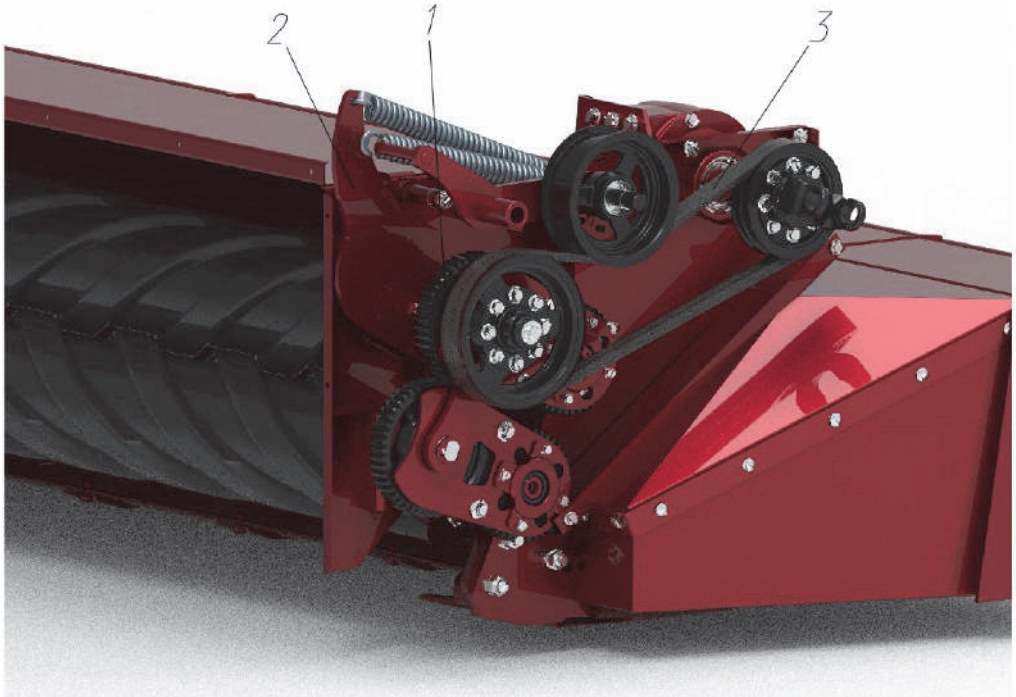


Рис. 3 – Зубчатый привод плющильного аппарата
1 – зубчатый привод; 2 – боковина; 3 – ременная передача.

Такая конструкция является компактной, позволяет вращать вальцы в противоположном направлении и позволяет верхнему рычагу

поворачиваться вокруг оси ведущего зубчатого колеса, обеспечивая изменение зазора между плющильными вальцами под действием растительной массы.

Преимуществом данной конструкции является:

- повышение надежности за счет использование зубчатого привода;
- снижение металлоемкости и трудоемкости за счет отсутствия аннулирования синхронизирующего вала.
- упрощение обслуживания за счет исключения цепных передач.

Заключение

Использование данной конструкции позволит повысить надежность и снизить трудоемкость плющильного аппарата.

УДК 631.354

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ ПАКЕТЕ ANSYS FATIGUE

А.Н. Кондрашова, Н.Л. Прокопенко
Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация: Представлен метод определения усталостного запаса прочности в наиболее опасных зонах и ресурса до наступления отказа в конструкции рычага натяжения ременной передачи привода первой ступени соломосепаратора и соломоизмельчителя при использовании метода конечных элементов (МКЭ) Fatigue module. Авторами проиллюстрирован подход к созданию расчетной модели для исследования влияния нагрузок, возникающих от работы ременной передачи и дисбаланса ролика, на нагруженность конструкции рычага натяжения ременной передачи. По результатам созданной модели предложено техническое решение, позволяющее повысить долговечность элементов конструкции до оптимально допустимых значений.

Введение. Разработка образцов новой техники в области машиностроения, удовлетворяющих самым современным требованиям, связана с всесторонними исследованиями прочности и жесткости несущих конструкций с учетом рабочих и экстремальных нагрузок, возникающих при эксплуатации, а также с учетом воздействия внешней среды. Экспериментальное проведение таких исследований, связано, как правило, со значительными затратами временных и материальных ресурсов. Поэтому применение высокоэффективных и точных методов расчетных исследований является основой для создания надежной и конкурентоспособной техники.

Одним из таких методов является метод конечных элементов – в настоящее время основной инструмент решения задач строительной механики, механики деформируемого твердого тела. Для МКЭ характерны широкий диапазон применимости, инвариантность по отношению к геометрии конструкции и механическим характеристикам материалов, высокая степень приспособленности к автоматизации всех этапов расчета.

Рама сельскохозяйственной машины – это прежде всего сварная конструкция с наличием значительного числа концентраторов напряжений в виде отверстий различной конфигурации, резкого изменения геометрической формы и размеров, а также собственно сварных швов, являющихся серьезным источником местных напряжений, поскольку для них характерна неоднородность материала шва, наличие всевозможных

дефектов и остаточных напряжений, обусловленных температурными деформациями. Напряженность рамной конструкции изменяется во времени, что требует проведения расчетов прочности конструкций по критериям сопротивления усталости.

Гарантийный срок эксплуатации – это период времени, в течение которого производитель или продавец обязуется бесплатно устранять дефекты, обнаруженные в товаре. В случае прочности рычага, производитель должен обеспечить статический запас прочности конструкции, оцениваемый по пределу текучести стали, и не допустить пластических деформаций. Оценка прочности по статике не зависит от времени, а только зависит от предельной величины нагрузки. Усталостный запас прочности труднее оценить, так как набор циклов осуществляется со временем и необходимо выяснить ресурс конструкции, что бы в дальнейшем не возникло усталостных трещин в гарантийный период комбайна.

Расчет прочности конструкций, оценка их ресурса и надежности проводятся во многих случаях с учетом возможного наличия в них технологических или эксплуатационных трещин (трещиноподобных дефектов). Механика разрушения – это раздел механики, в котором изучаются конструкционные материалы и их способность сопротивляться разрушению под действием внешних сил при наличии усталостных трещин и различных технологических и эксплуатационных дефектов. Соответственно расчет конструкции в рамках механики разрушения (Fracture analysis) предполагает наличие исходной трещины [1]. Потеря конструкционной целостности может происходить по многим причинам: выбор неподходящих материалов, неверное конструирование, дефекты в производстве/технологии литья, превышение срока службы, условия окружающей среды.

В общем виде процесс решения задачи механики разрушения можно разделить на два больших этапа: Расчет параметров механики разрушения. На этом этапе производится вычисление того или иного параметра (в основном коэффициента интенсивности напряжения) и сравнение его с критическим значением материала позволит установить будет ли расти трещина при заданных нагрузках. В подавляющем большинстве случаев этим этапом и ограничиваются. Моделирование процесса развития трещины. В ANSYS Mechanical реализован ряд методик, позволяющих смоделировать в том числе и рост трещины, когда значение параметра превышает критический уровень. Кроме того существует также специфический подход к моделированию роста усталостной трещины. Важно также отметить, что еще перед первым этапом может существовать также предварительный расчет (оценка) конструкции без трещины для определения местоположения дефекта [4].

Модуль Fatigue в инженерных расчетах — это инструмент для анализа усталостной прочности материалов и конструкций под действием циклических нагрузок. Он позволяет предсказать, когда и где может произойти разрушение из-за накопления микроповреждений [4].

Объект исследования: конструкция рычага натяжения ременной передачи первой ступени привода соломосепаратора и соломоизмельчителя зерноуборочного комбайна GH810.

Предмет исследования: зона качания рычага натяжения ременной передачи.

Цель исследования: создание расчетной математической модели, ее анализ и выработка рекомендаций по обеспечению достаточного запаса прочности и требуемой долговечности.

Методология исследования: Для исследования возникшей научно-технической проблемы была создана расчетная модель конструкции рычага натяжения ременной передачи первой ступени привода соломосепаратора на комбайне с использованием программного обеспечения Ansys Workbench [2]. В частности для данного расчета использовался модуль Static Structural с подключением модуля Fatigue, который заключается в предпочтительном расчете усталостного запаса прочности и долговечности, а также учитывает разрушение [3]. Данный метод при достаточно высоком качестве конечно-элементной сетки позволяет определить локальное повышение действующих напряжений, связанное с особенностями геометрии конструкции. Поэтому при назначении расчетных коэффициентов концентрации напряжений необходимо учитывать только технологические факторы, оказывающие влияние на локальное повышение напряжений (сварные швы, шероховатость поверхности, переходы зон с различной твердостью, натяг, и т.д.).

Имитационная модель элементов конструкции рычага натяжения ременной передачи первой ступени привода соломосепаратора была создана на основе конструкторской 3D-модели, выполненной в Windchill и преобразованной в Design Modeler [3].

Fatigue допускает расчет усталостной долговечности при нагружении несколькими нагрузками с различными историями нагружения. Однако ограничен максимум двумя различными историями и только подходом по напряжениям и с постоянной амплитудой. Реализовано через инструмент Solution Combination (основной функционал которого – формировать линейные сочетания полей результатов).

В нашем расчете на усталостную прочность рычага, учет среднего напряжения выполнен по критерию Goodman.

Критерий Goodman – это один из самых популярных методов в усталостном анализе, используемый для оценки влияния среднего напряжения на срок службы материала при циклических нагрузках. Он

помогает определить, при каких условиях материал выдержит заданное количество циклов без разрушения.

Goodman диаграмма – это график зависимости между средним напряжением (σ_m) и амплитудой переменного напряжения (σ_a). Она показывает, как увеличение среднего напряжения снижает допустимую амплитуду циклической нагрузки [5].

Уравнение Goodman (1):

$$\frac{\boldsymbol{\sigma_a}}{\boldsymbol{\sigma_в}} + \frac{\boldsymbol{\sigma_m}}{\boldsymbol{\sigma_{uts}}} = \mathbf{1} \quad (1)$$

где: σ_a – амплитуда переменного напряжения;

σ_m – среднее напряжение;

$\sigma_в$ – предел выносливости;

σ_{UTS} – временное сопротивление.

Если точка (σm, σa) лежит ниже линии Goodman, то материал считается безопасным от усталостного разрушения. Если выше то возможен отказ.

Коэффициент снижения прочности при усталости. Учитывает реальные условия эксплуатации (шероховатость поверхности, качество обработки, сварные швы). Для нашего расчета $k_f = 0.9$.

В решателе ANSYS выбраны настройки определения амплитуды и характера смещения гармоники относительно осей. Силы прикладывалась по симметричному циклу и проходящему через ноль. Масштабный коэффициент для амплитуды нагрузки k = 1.0.

Расчет выполнялся в постановке, многоцикловой усталости (Stress). Теорию о многоцикловой усталости применяется, когда деформации малы и материал работает в упругой области. В свойствах материала задана кривая S-N. Кривые S-N (Stress Number of cycles) – это фундаментальный инструмент в усталостном анализе, описывающий зависимость между амплитудой напряжения (S) и числом циклов до разрушения (N). Они позволяют прогнозировать срок службы материала под действием циклических нагрузок [6]. Кривые S-N получают эмпирически, при помощи опытов набирается база по кривым усталости. В расчете, кривые S-N были выбраны из базы конечно элементного пакета Ansys.

Результаты исследования и их обсуждение:

На рисунке 1 изображены режимы нагружения участвующие в нагружении конструкции рычага. Для оценки усталостной прочности, где основной вклад в нагружение конструкции рычага вносит сила увода.

Первый режим нагружения, при котором на конструкцию рычага действует сила упругости пружины F_2=1700Н, для натяжения ременной передачи. Второй режим нагружения, на конструкцию рычага действует сила увода $F_{ув}$=250Н от ременной передачи, определенная как сила трения

(произведение силы прижатия ремня на коэффициент трения резины по стали f=0.4) в зоне контакта ролика с ремнем.

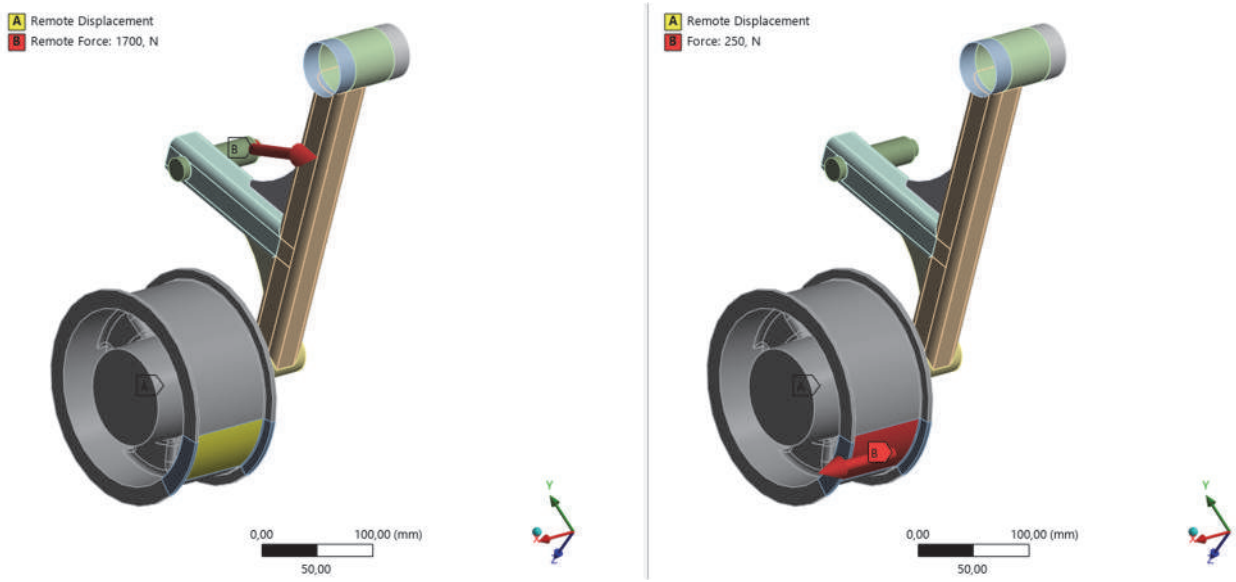


Рис. 1 – Режим нагружения с учетом силы увода ремня.

Предварительные расчеты, на статическую прочность показали, что статические запасы прочности обеспечиваются.

Расчет на усталостную прочность выполнен при действии комбинированного действия первого и второго режима нагружения. Причем интенсивность влияния режимов нагружения на нагруженность рычага не одинакова. Первый режим нагружения вносит 25% нагруженности рычага, а второй режим нагружения вносит 75%.

На рисунке 2 изображены поля усталостного запаса прочности (Safety Factor) и ресурса (Life). Как видно из рисунка 2, минимальные запас усталостной прочности в зоне А равен n=1, при этом минимальный ресурс в этой зоне составляет $cycl$ = 7.47e^{8}.

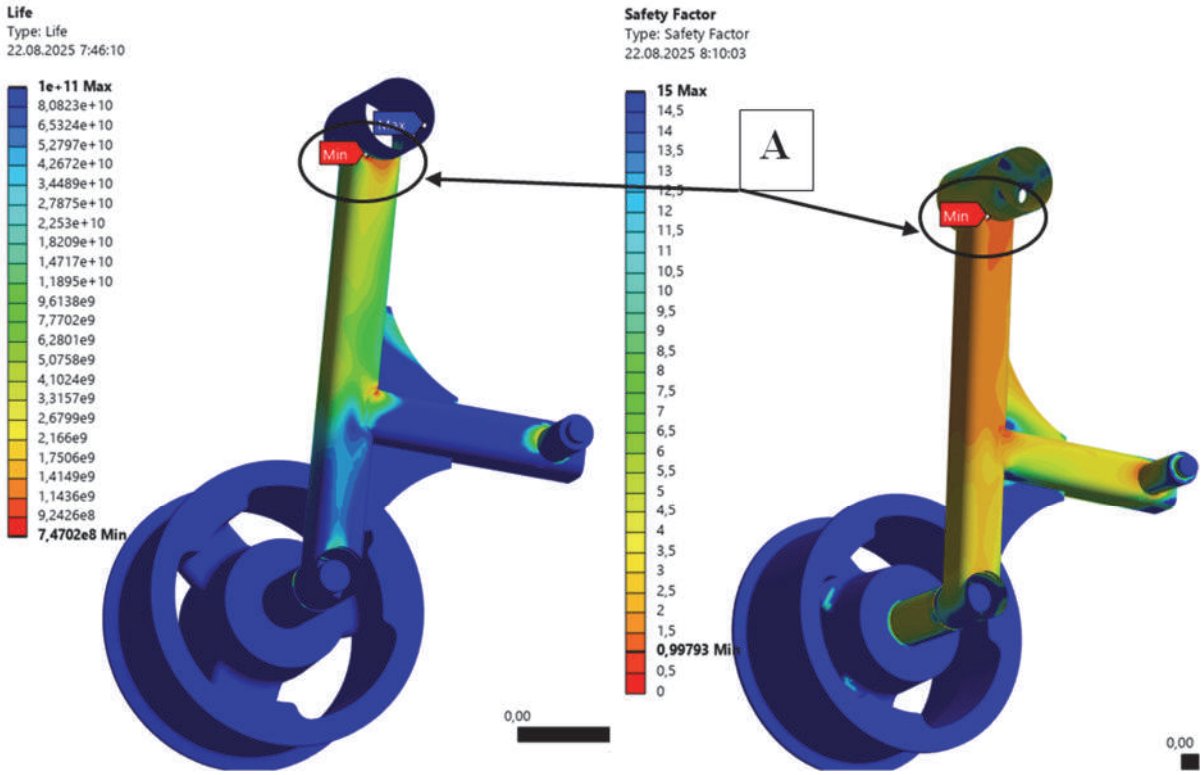


Рис. 2 – Поля распределения ресурса (Life) и усталостного запаса прочности (Safety Factor).

Расчет допустимого ресурса [*cycl*], для обеспечения работоспособности рычага за весь гарантийный срок службы комбайна, при действии на конструкцию силы увода.

Для определения количество циклов увода ремня за один оборот ролика, был определен перекос ролика для первого режима нагружения. Как показал расчет, перекос ролика составит 0.05º. Из второго режима нагружения были определены перемещения в плоскости перпендикулярной ременной передачи Δ=0.25мм. Далее через тангенс угла определили длину окружности, на которой произойдет увод ремня по ролику $L_{ср}$=0.25 / tg(0.05) = 286,47мм. Длина окружности ролика равна $L_{рол}$=565,5мм, тогда отношение z = $L_{рол}$ / $L_{ср}$ = 565.5 / 286.47 = 2, дает количество уводов ремня за один оборот ролик. Частота вращения ролика составляет n = 2886 об/мин, средняя наработка в год зерноуборочного комбайна составляет 350моточ. Гарантийный период зерноуборочной техники составляет 5лет. Из этих условий был определен допустимый ресурс (2).

$$[cycl] = n \cdot z \cdot 60 \cdot 350 \cdot 5 = 6.06e^{8} \quad (2)$$

Условие работоспособности за весь гарантийный срок службы комбайна, для данного режима нагружения выполняется $cycl > [cycl]$.

На рисунке 3 изображены режимы нагружения участвующие в нагружении конструкции рычага. Для оценки усталостной прочности, где основной вклад в нагружение конструкции рычага вносит дисбаланс ролика.

Первый режим нагружения, при котором на конструкцию рычага действует сила упругости пружины F_2=1700Н, для натяжения ременной передачи. Третий режим нагружения, на конструкцию рычага действует сила инерции от дисбаланса ролика Ф=565Н, дисбаланс по Кд D=6гм.

Сила инерции от дисбаланса [7] вычисляется по формуле 3:

$$\Phi = ma = mw^2R = Dw^2 = 4\pi^2n^2D \qquad (3)$$

где D – дисбаланс ролика (кгм);
w – угловая скорость ролика (рад/с);
n – частота вращения ролика (1/с).

Рис. 3 – Режим нагружения, с учетом дисбалансом ролика.

Расчет на усталостную прочность выполнен при действии комбинированного действия первого и третьего режима нагружения. Причем интенсивность влияния режимов нагружения на нагруженность рычага не одинакова. Первый режим нагружения вносит 20% нагруженности рычага, а третий режим нагружения вносит 80%.

На рисунке 4 изображены поля усталостного запаса прочности (Safety Factor) и ресурса (Life). Как видно из рисунка 4, минимальные запас

усталостной прочности в зоне А равен n=1, при этом минимальный ресурс в этой зоне составляет $cycl$ = 1.07e^7.

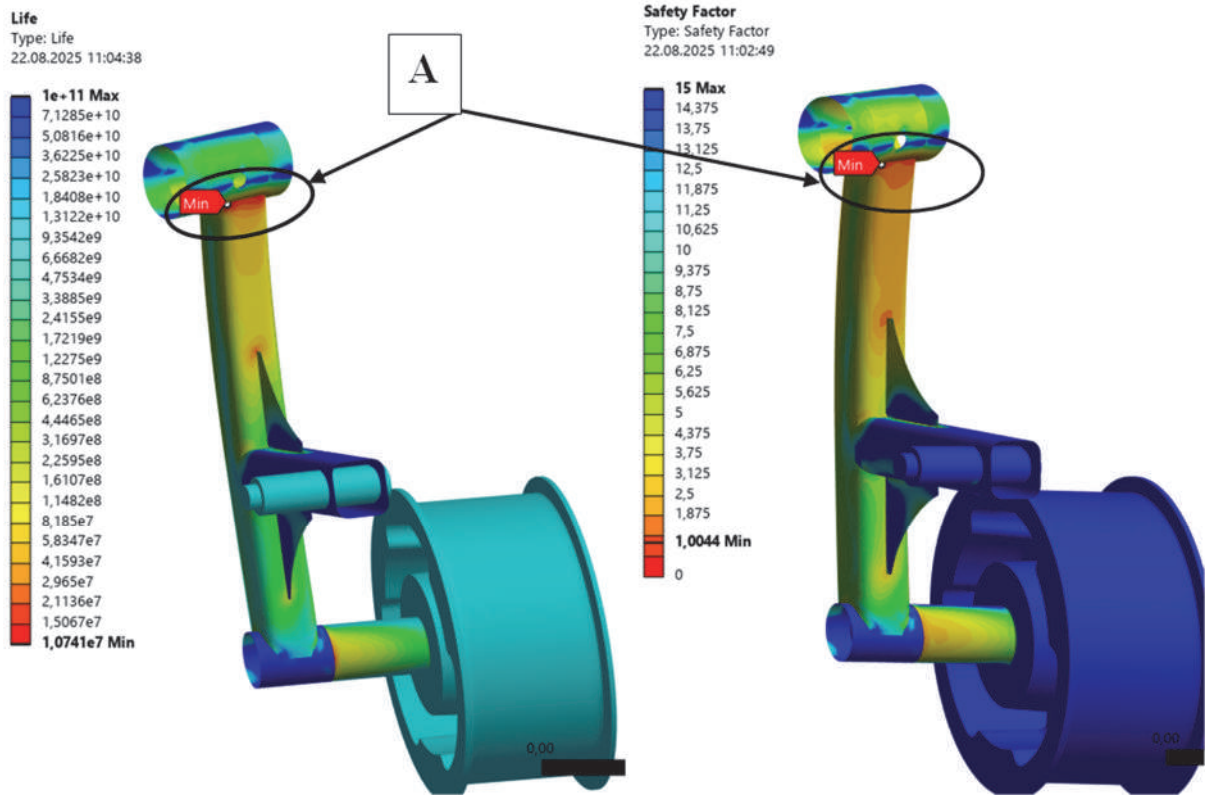


Рис. 4 – Поля распределения ресурса (Life) и усталостного запаса прочности (Safety Factor).

Расчет допустимого ресурса [$cycl$], для обеспечения работоспособности рычага за весь гарантийный срок службы комбайна, при действии на конструкцию сил дисбаланса.

Частота вращения ролика составляет n = 2886 об/мин, средняя наработка в год зерноуборочного комбайна составляет 350моточ. Гарантийный период зерноуборочной техники составляет 5лет. Из этих условий был определен допустимый ресурс.

$$[cycl] = n \cdot 60 \cdot 350 \cdot 5 = 3.03e^8 \quad (4)$$

Условие работоспособности за весь гарантийный срок службы комбайна не выполняется $cycl < [cycl]$.

Для выполнения условия по обеспечению ресурса, необходимо уменьшить дисбаланс ролика до D=0.3гм, при этом сила инерции от дисбаланса ролика составит Ф=27.5Н.

Расчет на усталостную прочность выполнен при действии комбинированного действия первого и третьего режима нагружения. Причем интенсивность влияния режимов нагружения на нагруженность рычага не одинакова. Первый режим нагружения вносит 20% нагруженности рычага, а третий режим нагружения вносит 80%.

На рисунке 5 изображены поля усталостного запаса прочности (Safety Factor) и ресурса (Life). Как видно из рисунка 5, минимальные запас усталостной прочности в зоне Б равен n=1, при этом минимальный ресурс в этой зоне составляет $cycl$ = 8.52e^8. Запас усталостной прочности в зоне А равен n=1,59 при этом ресурс в этой зоне составляет $cycl$ = 4.4e^9.

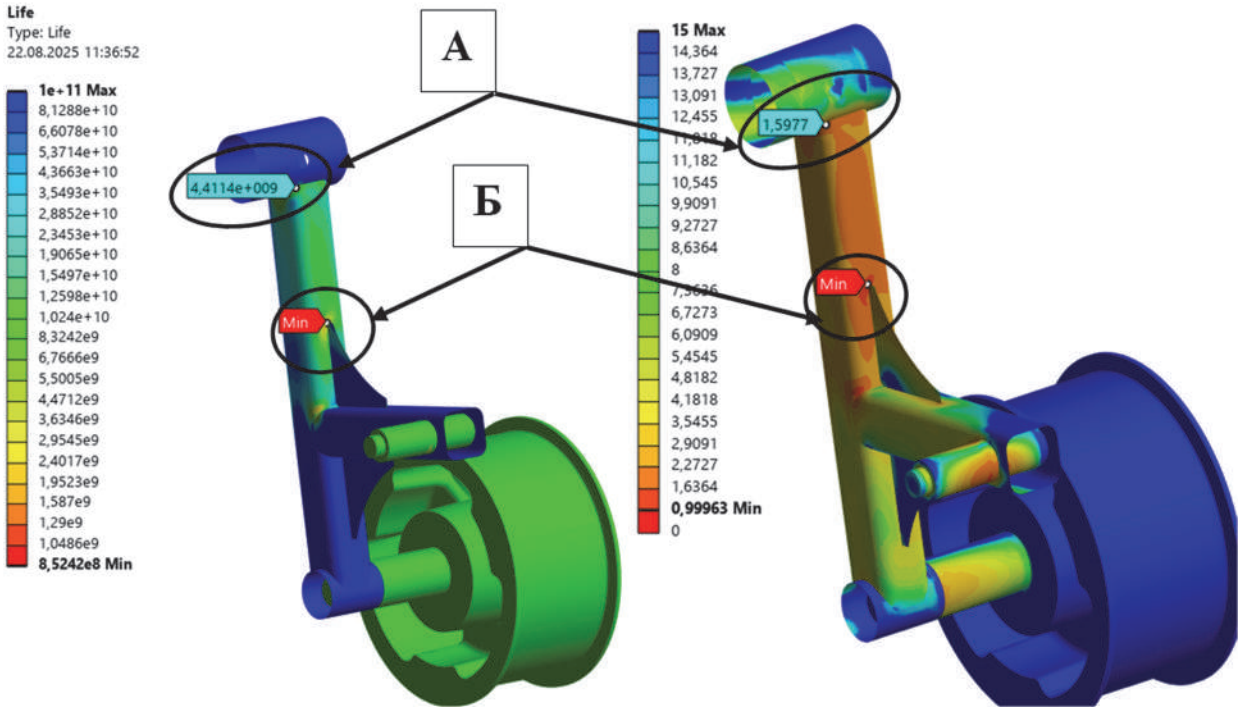


Рис. 5 – Поля распределения ресурса (Life) и усталостного запаса прочности (Safety Factor).

Величину допустимого ресурса [$cycl$], при действии на конструкцию сил дисбаланса, описано выше [$cycl$] = 3.03e^8.

Условие работоспособности за весь гарантийный срок службы комбайна, для зон А и Б, выполняется $cycl > [cycl]$.

Заключение. Авторами разработана методика, позволяющая при помощи конечно-элементного пакета ANSYS Workbench и модуля Fatigue получать усталостный запас прочности, долговечности.

Проведенные расчеты показали, что исходная конструкция рычага обладает достаточным ресурсом, для гарантийного срока службы комбайна 3года. При увеличения гарантийного срока службы комбайна до 5 лет, ресурс рычага в зоне А, для дисбаланса ролика D=6гм, меньше допустимого.

Исходя из этого был уменьшен дисбаланс ролика до D=0.3гм, и конструкция рычага стала обладать достаточным ресурсом, для безотказной работы во весь гарантийный срок службы комбайна 5 лет.

Применение в расчетах методики оценки усталостной прочности позволяет предсказать количество циклов до разрушения, учитывает реальные условия эксплуатации: вибрации, переменные нагрузки. Также усталостные расчеты выявляют опасные зоны конструкции, где может начаться разрушение.

Расчеты усталостной прочности помогают оптимизировать конструкцию. Позволяют снизить массу, сохранив прочность. Выбрать качество обработки поверхности, уменьшив при этом сопутствующие параметры (в нашем случае дисбаланс).

Применения методов расчета усталостной прочности в ОАО “Гомсельмаш”: снижает потребность в дорогостоящих испытаниях, ускоряет цикл разработки и внедрения новых продуктов, даёт возможность виртуального тестирования различных материалов и конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонтьев Н.В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». Нижний Новгород, 2006, 101 с.

2. Басов, К.А. ANSYS справочник пользователя/ К.А Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

3. Reddy, J.N. An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis/ J.N. Reddy. – Oxford University Press, 2004. – 488 с.

4. Клочков, А.В. Зерноуборочные комбайны / А.В. Клочков, А.В. Адась, В.А. Попов. – Мн: Дизайн ПРО, 2004. – 240с.

5. Штейнвольф, Л.И. Динамические расчеты машин и механизмов / Л.И. Штейнвольф. – М.: Машгиз, 1961. – 339 с.

6. Иванов, Н.И. Основы виброакустики / Н.И. Иванов, А.С. Никифоров – М.: Политехника, 2000. – 482 с.

7. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И. А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г. Б. Иоселевич – М.: Машиностроение, 1979.–702 с.

УДК 62-236.58

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ХАРВЕСТЕРНОГО МАНИПУЛЯТОРА

А.А. Гончарко[1], А.А. Дюжев[2], Александр Л. Кравченок[1], Алексей Л. Кравченок[1], А.Н. Колесникович[1]
[1]ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь
[2]ОАО «АМКОДОР» - управляющая компания холдинга, г. Минск, Республика Беларусь

Введение

Харвестер — это высокотехнологичная специализированная машина, предназначенная для механизированной вырубки леса, обработки деревьев и подготовки древесины к дальнейшей транспортировке. Одним из основных элементов рабочего органа харвестера является манипулятор, обеспечивающий позиционирование и перемещение харвестерной головки в рабочей зоне. Благодаря подвижности (вылету, углам поворота, телескопированию) манипулятор позволяет обрабатывать деревья в широком радиусе вокруг машины без её перемещения [1].

Во время выполнения технологических операций изменяются силовые нагрузки на составные части манипулятора. При превышении нагрузок в гидроцилиндрах не обеспечивается грузоподъемность или устойчивость харвестера [2-4].

Для исследования работоспособности харвестерного манипулятора с подъемным моментом до 240 кНм разработана его динамическая модель с применением методов и средств компьютерного моделирования и проведена оценка его динамической нагруженности [5-9].

Моделирование рабочего режима харвестерного манипулятора

Основные технические характеристики исследуемого манипулятора приведены в табл. 1 и 2.

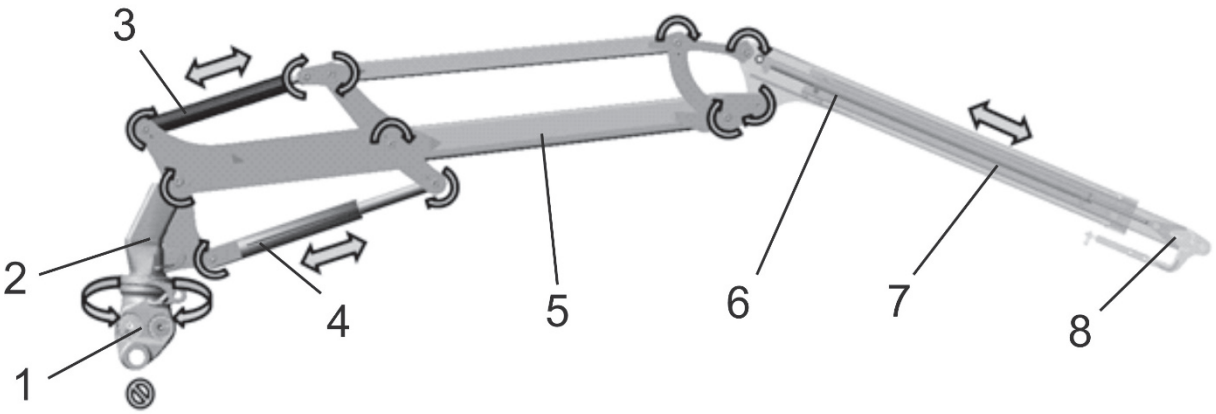
Табл. 1. Основные технические характеристики манипулятора

Наименование параметра (характеристики)	Значение
Максимальный вылет стрелы манипулятора, мм, не менее	10000
Максимальный вылет (удлинение) телескопа, мм, не менее	2500
Грузоподъемность манипулятора при максимальном вылете стрелы (без учета веса ротатора и харвестерной головки), кг, не менее	1540
Момент поворота манипулятора в горизонтальной плоскости (с учетом массы манипулятора), кН м, не менее	55

Табл. 2. Параметры гидроцилиндров манипулятора

Параметр	Гидроцилиндр		
	Стрела	Рукоять	Телескоп
Максимальное давление в поршневой полости, МПа	25	25	10
Максимальное давление в штоковой полости, МПа	10	25	25
Диаметр поршня гидроцилиндра, мм	140	125	70
Диаметр штока гидроцилиндра, мм	100	63	40
Максимальный ход, мм	795	950	2500
Максимальная сила, действующая на поршень, кН	384,7	306,6	38,5
Максимальная сила, действующая на шток, кН	75,4	228,8	64,8

Разработанная в программном комплексе ADAMS динамическая модель манипулятора включает 17 абсолютно твердых тел, описывающих основные конструкции и агрегаты, а также 22 шарнира, описывающих кинематические связи между телами с заданным числом степеней свободы. Общий вид динамической модели манипулятора с указанием степеней свободы стрелы, рукояти и телескопа представлен на рис. 1.



1 – устройство поворотное; 2 – колонна; 3 – гидроцилиндр рукояти; 4 – гидроцилиндр стрелы; 5 – стрела; 6- гидроцилиндр телескопа; 7 – рукоять; 8 – телескоп;

Рис.1 – Общий вид динамической модели

Рабочий режим харвестера включает в себя операции по захвату дерева харвестерной головкой и его спиливание, очистки ствола от сучьев и распиловки на сортименты (бревна заданной длины), укладки сортимента для последующего вывоза.

Для моделирования динамического режима работы харвестерного манипулятора принята следующая последовательность операций (длительность рабочего цикла - 19 секунд):

1. Подвод харвестерной головки к стволу дерева и его захват с выдвинутым телескопом манипулятора (3 секунды).

2. Подъем стрелы с грузом до горизонтального положения на максимальном вылете (3 секунды).

3. Поворот стрелы на максимальном вылете на 90° относительно продольной оси харвестера (4 секунды).

4. Складывание телескопа рукояти (3 секунды).

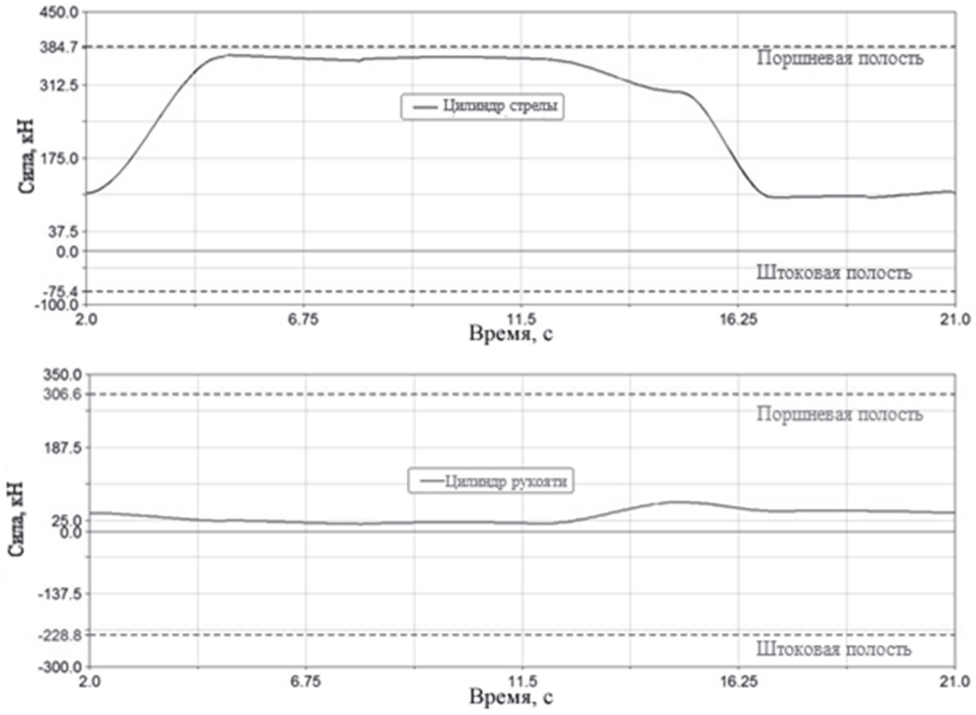
5. Выгрузка сортимента для положения рукояти со сложенным телескопом (2 секунды).

6. Возврат стрелы в исходное положение согласно пункту № 1 (4 секунды).

В соответствии с выбранным режимом, масса поднимаемого груза (включая харвестерную головку и сортимент) принята $m_{гр}=1,1\cdot m_{ном}= 1694$ кг.

Анализ результатов

В результате моделирования работы харвестерного манипулятора получены зависимости изменения сил в гидравлических цилиндрах стрелы, рукояти и телескопа по времени. Графики изменения сил в цилиндрах представлены на рис. 2.



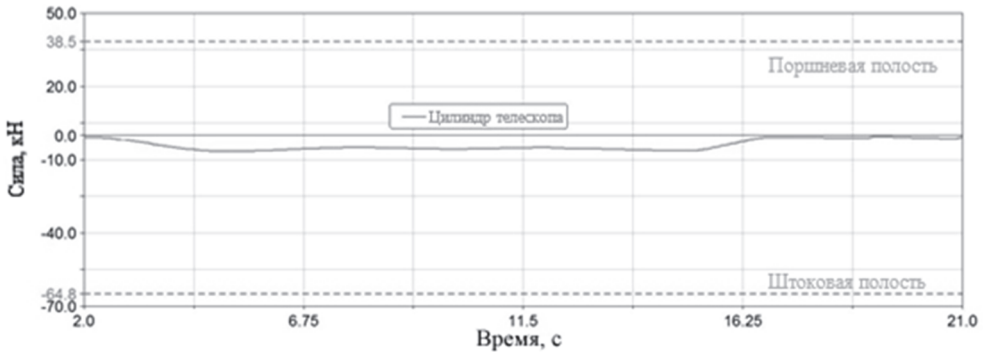


Рис. 2 – Графики изменения сил в гидроцилиндрах стрелы, рукояти и телескопа

Сила, развиваемая в поршневой полости гидроцилиндра стрелы, составляет от 107 до 361,5 кН, что не превышает максимальную силу 384,7 кН.

Сила, развиваемая в поршневой полости гидроцилиндра рукояти, составляет от 41 до 66,2 кН, что не превышает максимальную силу 306,6 кН.

Сила, развиваемая в штоковой полости гидроцилиндра манипулятора, достигает 7,8 кН, что не превышает 64,8 кН.

Заключение

Проведена оценка динамической нагруженности харвестерного манипулятора путем моделирования рабочего цикла, включающего шесть операций с заданной длительностью каждой операции.

По результатам анализа динамической нагруженности получены зависимости изменения сил в гидроцилиндрах манипулятора по времени. Определено, что наиболее нагруженным элементом является гидроцилиндр стрелы. Силы, действующие в штоковых и поршневых полостях всех гидроцилиндров, не превышают максимальных значений, следовательно конструкция манипулятора обеспечивает выполнение заданного рабочего режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сюнёв, В. С. Лесосечные машины в фокусе биоэнергетики: конструкции, проектирование, расчет: Учеб. пособие / В. С. Сюнёв, А.А. Селиверстов, Ю. Ю. Герасимов, А. П. Соколов. – Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии METLA, 2011. – 143 с.

2. ГОСТ 31595–2012. Погрузчики леса. Оборудование рабочее манипуляторного типа. Общие технические условия. – Введ. 2015-02-01. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2015. – 24 с.

3. Гринчар, Н. Г. Основы гидропривода: учеб. пособие. Ч. 2 / Н. Г. Гринчар, Н. А. Зайцева. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 445 с.

4. Лесковец, И. В. Гидравлика, гидромашины и гидропривод: метод. указания / И. В. Лесковец, А. П. Смоляр, В. В. Береснев. – Могилёв: ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2014. – 23 с.

5. Голякевич, С. А. Основы проектирования лесных машин и системы автоматизированного проектирования. Часть 1: учеб. – метод. Пособие для студентов специальности 1-36 05 01 «Машины и оборудование лесного комплекса» специализации 1-36 05 01 01 «Машины и оборудование лесной промышленности» / С. А. Голякевич, А. Р. Гороновский. – Минск, БГТУ, 2015. – 127 с.

6. Голякевич, С.А. Математическая модель динамики манипуляторов многооперационных лесозаготовительных машин / С. А. Голякевич, А. Р. Гороновский // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2024. – № 1 (276). – С. 132–143.

7. Лагерев, А.В. Влияние конструктивных характеристик манипулятора харвестера на оптимальные размеры рабочей зоны / А.В. Лагерев, А.В. Макулина, И.А. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2024. – №2. – С. 111-123.

8. Shen, R. Dynamic Simulation of the Harvester Boom Cylinder / R. Shen, X. Zhang, C. Zhou // Machines. – 2017. – Vol. 5, Iss. 2. – Art. 13. – Режим доступа: https://doi.org/10.3390/machines5020013. – Дата обращения: 18.07.2025.

9. Мохов, С. П. Оценка нагруженности элементов технологического оборудования харвестерных машин / С. П. Мохов, С. Е. Арико, В. А. Симанович // Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: доклады Международной научно-технической конференции, Минск, 11-14 февраля 2009 г. – Минск: БГАТУ, 2009. – С. 399-403.

УДК 004.94

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ: КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ, АРХИТЕКТУРА И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ

А.В. Шмелев, А.Н. Колесникович, О.В. Дробышевская
ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»,
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы концепции, и архитектуры цифровых двойников в машиностроении. В работе проведен анализ причин возникновения и развития технологии цифровых двойников от становления первых систем CAD/CAE до современных цифровых двойников, рассмотрено место технологии на кривой Гартнера, приведен пример практического применения цифровых двойников в машиностроении.

Ключевые слова: *цифровой двойник, кривая Гартнера, CAD, CAE, CAM, PLM, зрелость цифрового двойника*

Введение

Основы концепции цифровых двойников (ЦД, Digital Twin, DT) были заложены в 1960-х годах с началом разработки первых систем автоматизированного проектирования (CAD) и инженерного анализа (CAE).

Одним из наиболее ранних функциональных аналогов цифрового двойника принято считать «физические двойники» в рамках космической программы NASA «Аполлон» [1], когда для сопровождения миссий создавались идентичные наземные экземпляры космических аппаратов.

Концептуальные основы цифровых двойников

Идею цифровых двойников Майкл Гривс (M. Grieves) впервые представил в Мичиганском университете в 2002 году в рамках курса по управлению жизненным циклом продукции (PLM, Product Lifecycle Management). В последствии она была представлена на международной конференции, посвящённой PLM-системам, в 2003 году, что положило начало её активному распространению в инженерной практике и научно-исследовательском сообществе [2–5]. В дальнейшем появление новой технологии отмечается не только научным сообществом, но и бизнес-аналитиками, что подтверждается активным упоминанием о цифровых двойниках мировыми аналитическими агентствами. Компания Гартнер (Gartner) в 2016 году поместила технологию цифровых двойников в начало кривой, соответствующей фазе «запуска» технологии, а уже спустя три года, в 2019 г она находилась на пике в фазе «ажиотажа» технологий (рис. 1). Кривая Гартнера наглядно показывает, как технология будет развиваться с течением времени. Положение технологии на кривой определяет ее

относительное проникновение на рынок и прогнозирует объем и перспективность инноваций в данную технологию на протяжении ее жизненного цикла. Таким образом, кривая Гартнера является инструментом, позволяющим оценить технологические тренды и перспективы той или иной технологии на протяжении ее жизненного цикла. На рис. 1 показаны места локализации технологии цифровых двойников на кривой Гартнера за период 2016–2024 гг.

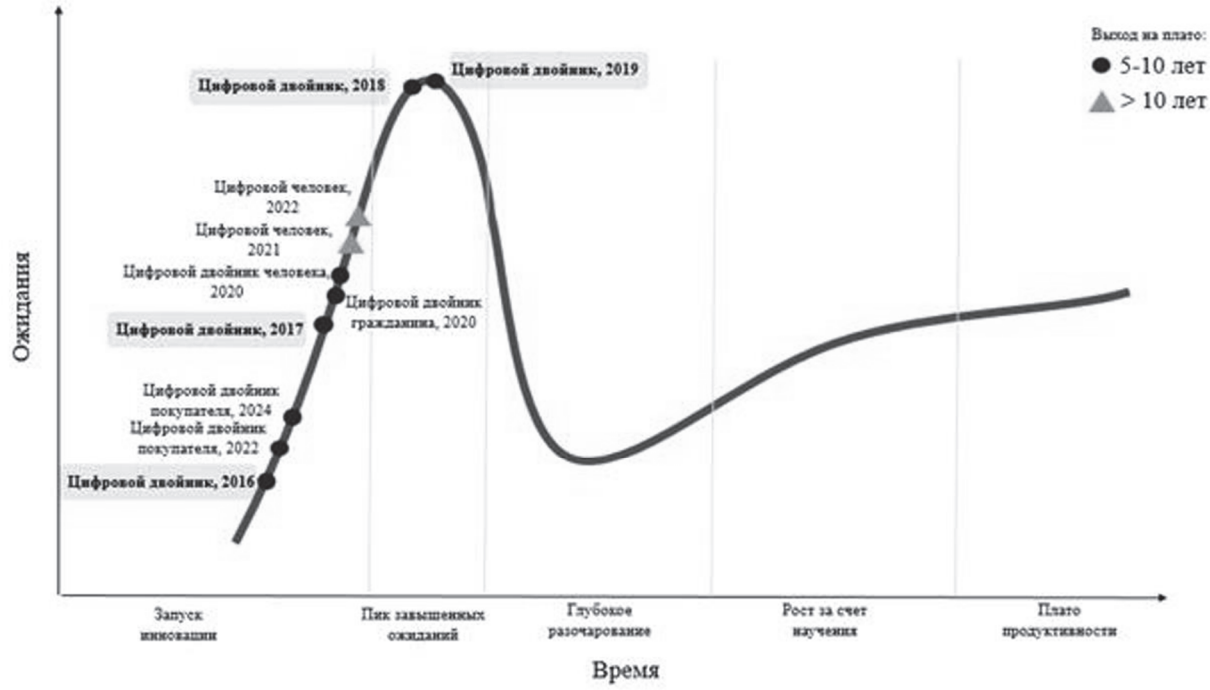


Рис. 1 – Обобщенная кривая Гартнера 2016-2024 с локализацией технологии цифрового двойника [6]

Таким образом наблюдая эволюцию развития технологии цифровых двойников в разрезе ее появления на кривых Гартнера, можно сказать, что с момента ее появления на кривой в 2016 г. и по настоящее время она прошла уверенный путь становления. За небольшой промежуток времени она прочно вошла в технологические, производственные и цифровые процессы предприятий, где были внедрены не только пилотные, но и реализованы реальные проекты с внедрением цифровых двойников атомных станций, самолетных и автомобильных двигателей, электростанций и т.д.

Архитектура цифровых двойников

Основными компонентами цифровых двойников являются: сенсоры, актуаторы, модуль данных, модуль моделирования и модуль аналитической обработки [7, 8]. При этом сенсоры отвечают за сбор данных о работе системы и окружающей среде, актуаторы оказывают управляющее воздействие на систему, модуль данных формирует основу для анализа и прогнозирования, модуль моделирования воспроизводит поведение

системы с учетом физических и статистических моделей, модуль аналитической обработки обрабатывает данные для визуализации, прогнозирования и управления. В зависимости от сложности представления и уровня детализации цифрового двойника существуют две основные архитектуры - 3-х уровневая и 5-ти уровневая.

Трехуровневая модель была изначально представлена Гривсом в 2003- м году и включала физический объект, его виртуальную копию и механизм связи между ними. Такая структура позволяет понять базовые принципы цифрового двойника и создать его, но она не учитывает сложные аспекты его интеграции и эксплуатации. С развитием и становлением цифровых двойников как самостоятельной новой технологии была выработана пятиуровневая модель, которая включает физический объект (PE), виртуальную модель (VE), систему сервисов (Ss), модель данных (DD) и систему коммуникаций (CN). Эта архитектура обеспечивает более точное моделирование, взаимодействие с реальным миром и аналитику на основе больших данных.

В общем виде цифровой двойник, построенный по пятиуровневой архитектуре, можно представить следующим образом:

$$M_{DT} = (PE, VE, Ss, DD, CN),$$

Модель физического объекта (PE) включает функциональные подсистемы объекта и сенсорные устройства передающие данные о состоянии подсистем и рабочих условиях. Виртуальная модель (VE) представляет собой цифровой аналог физического объекта, интегрирующий полученные данные от физического объекта для воспроизведения его характеристик (геометрии, физических свойств, связей и законов движения в виртуальной среде). Система сервисов (Ss) объединяет сервисы для физического объекта и виртуальной модели. Модель данных (DD) включает пять компонентов: Dp — данные от физического объекта, Dv — данные от виртуальной модели, Ds — данные от системы сервисов, Dk — отраслевые знания, Df — комбинации вышеперечисленных данных. Система коммуникаций (CN) включает всевозможные различные интерфейсы и соединения между всеми вышеуказанными компонентами и модулями цифрового двойника.

Практика применения цифровых двойников в машиностроении

Реализация идеи цифровых двойников стала возможной только после того, как технологии САПР, а именно CAD/CAE/CAM были широко внедрены на этапе проектирования новых объектов и вышли на уровень PLM систем, затрагивая весь жизненный путь изделия. Инструменты цифрового проектирования и цифровые модели в CAD/CAE/CAM как предшественники цифровых двойников появились примерно в одно и тоже время, когда был реализован проект физических двойников. Основные этапы развития цифровых двойников происходили на фоне эволюции САПР систем. При этом развитие систем PDM/PLM способствовало выводу

цифровой модели и виртуальных испытаний на новый системный уровень. К этому времени качество цифровых моделей, количество виртуальных испытаний, снижение их стоимости и трудозатрат в совокупности с бурным ростом производительности компьютерных вычислений достигло той точки перехода, когда виртуальные испытания на определенном этапе жизненного цикла изделия уже могли заменить реальные с существенным выигрышем по времени и стоимости. Такое многоуровневое развитие способствовало существенному расширению функциональных возможностей и сфер применения цифровых двойников в инженерной и промышленной практике.

Примером цифрового двойника сложной системы в машиностроении может быть системы контроля динамических нагрузок карьерных самосвалов (рис. 2) [9].

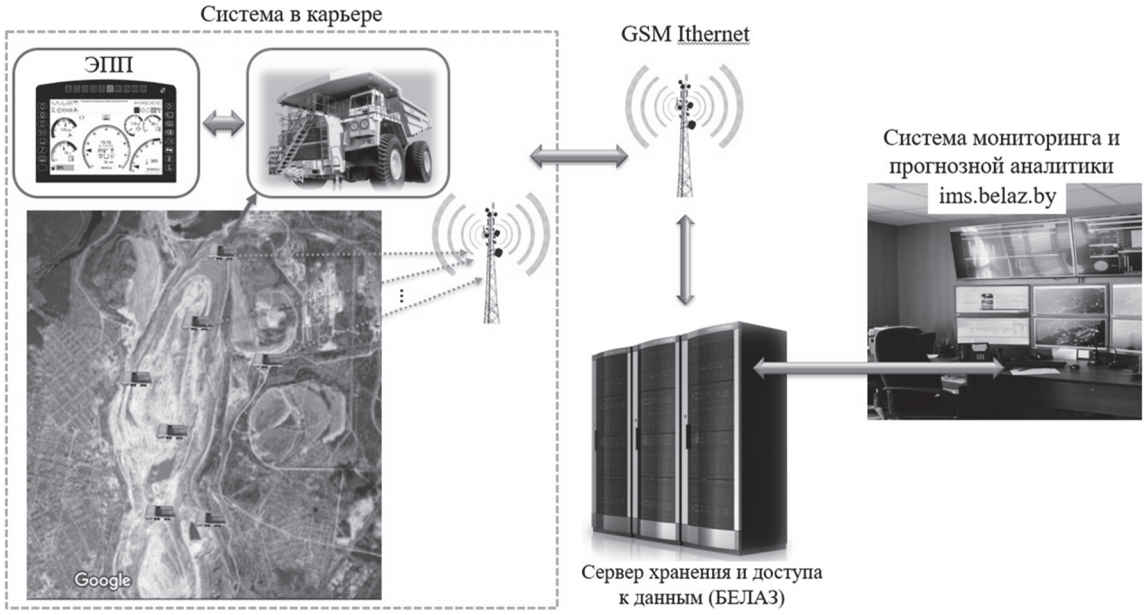


Рис. 2 – Пример цифрового двойника системы контроля динамических нагрузок карьерных самосвалов

Система строится на основе алгоритмов обработки потоков информации от автомобилей-самосвалов, получаемой в режиме реального времени при их эксплуатации в карьерах и системы мониторинга и прогнозной аналитики. Задачами системы являются оперативное выявление и локализация факторов повышающих нагруженность карьерного самосвала; определение и предоставление оператору карьера информации о наличии (появлении) участков маршрута движения, создающих повышенный уровень нагруженности; проведение комплексного анализа условий эксплуатации самосвалов в карьерах; оценка эффективности мероприятий по содержанию дорог карьера и увеличение ресурса несущих систем и подвесок карьерного самосвала.

Заключение

Возникновение цифровых двойников как технологии виртуального отражения физического объекта или системы, обеспечивающей средства для моделирования, прогнозирования и оптимизации на протяжении всего жизненного цикла изделия представляет собой естественный этап эволюции концепции цифрового производства. Являясь прорывной технологической разработкой, цифровой двойник способен радикально изменить подходы к проектированию, производству и эксплуатации технических систем. Его применение позволяет создать информационно насыщенное и адаптивное цифровое представление объекта, формируемое и обновляемое в реальном времени на основе данных, поступающих от физических сенсоров, моделей и аналитических алгоритмов. Интеграция цифровых двойников с интеллектуальными алгоритмами (включая машинное обучение и предиктивную аналитику) открывает организациям новые технологические возможности в сфере управления данными, оптимизации, разработки инновационных продуктов и услуг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Glaessgen Edward H., Stargel D. S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles // Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference; Special Session on the Digital Twin. – Honolulu, HI, United States, 23–26 Apr. 2012. – AIAA Paper 2012 1818. DOI: 10.2514/6.2012 1818.

2. Grieves Michael W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication // White Paper. – Melbourne, FL, Michael Grieves LLC, 2014. — 7 с.

3. Grieves Michael W., Vickers John Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches / eds. F-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. – Cham (Switzerland): Springer International Publishing, 2017. – С. 85–113. – DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4

4. Grieves Michael W. Digital Twins: Past, Present, and Future // The Digital Twin / eds. Crespi N., Drobot A. T., Minerva R. – Cham (Switzerland): Springer, 2023. – P. 97–121. – DOI: 10.1007/978-3-031-21343-4_4

5. Wong C. Y., McFarlane D., Ahmad Zaharudin A., Agarwal V. The Intelligent Product Driven Supply Chain [Электронный ресурс] // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2002), Vol. 4. – Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/228920205_The_Intelligent_Product_Driven_Supply_Chain – Дата обращения: 18.07.2025.

6. Kravchenko, A.A. (2025) The Evolution of Digital Twin Technology on Gartner Cycle for the Period 2016–2024. Scientific Research of Faculty of Economics. Electronic Journal, vol. 17, no. 2, pp. 88-110. DOI: 10.38050/2078-3809-2025-17-2-88-110.

7. Прохоров, А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. Под ред. А. Боровкова. – М.: ООО АльянсПринт, 2020. – 401 с.

8. Digital Twin – цифровая копия физической системы [Электронный ресурс] // Хабр. – Режим доступа: https://habr.com/ru/articles/887936/ – Дата обращения: 18.07.2025.

9. Бусел, Б. У. Основные положения контроля динамической нагруженности несущей системы карьерного самосвала на основе коэффициентов динамичности / Б. У. Бусел, М. В. Рак // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Международной научно-технической конференции. - Минск: БНТУ, 2018. - Т. 2. - С. 11.

СОДЕРЖАНИЕ

Секционные статьи

Секция № 1 «Тенденции и направления развития уборочной техники и научно-техническое сотрудничество»

ЗУБЧАТЫЕ ГРЕБЕНКИ В РЕШЕТАХ ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ С ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ

Д.С. Коновалов, А.В. Ермак…… 3

СНИЖЕНИЕ ВИБРОАКТИВНОСТИ РЕЖУЩЕГО АППАРАТА ЖАТКИ ДЛЯ УБОРКИ РИСА

Д.Ю. Барсуков…… 8

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ВЕНТИЛЯТОРА ПЫЛЕСОСА НАКЛОННОЙ КАМЕРЫ КОМБАЙНА GS12A1

В.В. Гусарев, М.А. Савков…… 14

УЛУЧШЕНИЕ АЭРОДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ КАСКАДОМ В СТРЯСНОЙ ДОСКЕ

А.А. Соловьева, А.А. Морозов…… 19

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВОЗДУХОМ

В.В. Кравжуль, А.В. Сущенко, Ю.В. Миранович…… 26

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОПИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОЛЯ ЖАТКОЙ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

В.С. Ушев, В.А. Дюбин…… 33

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ ПАРЫ НОЖ-БРУС НА ИХ ИЗНОС

А.А. Дакука…… 37

ЭРГОНОМИЧЕСКАЯ И ЭСТЕТИЧЕСКАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ УНИФИЦИРОВАННОЙ КАБИНЫ

А.В. Третинников, А.М. Никитин…… 44

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОВОРОТА ВАЛА КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПАНЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ И ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ТЕРМИНАЛА

И.И. Уздовский, А.В. Лашкевич, С.В. Семенов…… 52

Секция № 2 «Мобильные энергетические средства, тракторы, прицепные и навесные агрегаты»

О ВЛИЯНИИ РАБОТЫ ФРИКЦИОНОВ КПП ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГОСРЕДСТВ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ ТРАНСМИССИИ

С.И. Кирилюк, И.А. Куда…… 56

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МНОГОДИСКОВЫХ ФРИКЦИОНОВ КОРОБКИ ПЕРЕМЕНЫ ПЕРЕДАЧ МОБИЛЬНОГО ЭНЕРГОСРЕДСТВА

С.И. Кирилюк, М.Ю. Целуев…… 62

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЪЕМНОГО УСТРОЙСТВА УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА

В.Б. Попов, И.А. Занкевич…… 68

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ ВЫЖИГАЕМОЙ МАСТЕР-МОДЕЛИ ДЕТАЛИ ПРИ ПОМОЩИ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.Д. Лёвкина, Е.П. Поздняков, И.Б. Одарченко…… 73

БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОХРАНЕ ТРУДА НА ПРИМЕРЕ ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»

М.М. Кучук, М.Л. Калиниченко…… 77

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК НА СКЛЕЕННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ SOLIDWORKS

Е.А. Малиновский, М.Л. Пшеничный, М.Л. Калиниченко…… 81

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК НА СКЛЕЕННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ КОМПАС 3D

Е.Н. Шиш, Д.А. Шклёда, М.Л. Калиниченко…… 87

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОРМОРАЗДАТОЧНЫХ МАШИН

М.А. Керимов, В.И. Ветушко, К.В. Горецкий, М.М. Керимов …… 92

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ДРОССЕЛИРУЮЩИХ КАНАВОК НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ СИЛУ ПОТОКА

Ю.И. Железнякова, Д.Л. Стасенко…… 96

МЕТОДИКА МИГРАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ДАННЫХ: ПЕРЕХОД НА ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Д.В. Дубовский, В.Б. Ковалевский…… 100

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОЙ РАБОТЫ ЛЕЗВИЯ ИЗМЕЛЬЧАЮЩИМ АППАРАТОМ БАРАБАННОГО ТИПА

П.Е. Родзевич, К.В. Ридкина…… 106

ТЕПЛОВАЯ НАГРУЖЕННОСТЬ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ДИСКОВ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ТОРМОЗОВ АВТОМОБИЛЕЙ

П.Е. Родзевич…… 110

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Б.И. Долгий, Е.М. Акулова…… 115

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРЫ 3D ИЗДЕЛИЙ

М.С. Захаренко, Е.М. Акулова…… 120

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

М.К. Ничипоренко, Е.М. Акулова…… 123

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

И.В. Жиренок, Е.М. Акулова…… 127

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСТАЧИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ

А.Н. Скороходов, Е.М. Акулова…… 130

НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПА6 – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

А.А. Даниленко, Ю.М. Кривогуз, И.В. Царенко…… 132

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

М.Н. Фоменок…… 135

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ОТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ И НАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ТРАКТОРА

Ч.И. Жданович, Н.В. Калинин…… 143

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТОВАННЫХ СЛОЕВ СТАЛЕЙ 18ХГТ, 20ХН3А и 16CrMNS5

Е.П. Поздняков, И.Н. Степанкин, А.Д. Левкина, Д.В. Куис, С.Н. Лежнев…… 148

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОВ ОБОРУДОВАНИЯ

О.К. Гурбан, В.В. Пинчук…… 153

МОДЕРНИЗАЦИЯ МАШИНЫ ПЕРЕДВИЖНОЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МПД-500 В РЕЗУЛЬТАТЕ ВНЕДРЕНИЯ ЦЕПНОГО МЕХАНИЗМА ПРИВОДА БАРАБАНА

А.А. Алагинский, А.С. Хоронжина, А.А. Белозор…… 159

АДАПТАЦИЯ МНОГОДИСКОВЫХ МАСЛООХЛАЖДАЕМЫХ ТОРМОЗОВ В СОСТАВЕ БОРТОВОГО РЕДУКТОРА СРЕДСТВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО

К.А. Грабок, Ю.Ю. Наливайко…… 165

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ ПРИВОДНЫХ ЦЕПЕЙ

Р.В. Попков…… 175

НОВЫЕ БОРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

С.И.Чернецкий, Г.В. Петришин…… 182

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРИВОДА ПЛЮЩИЛЬНЫХ ВАЛЬЦЕВ КОСИЛКИ-ПЛЮЩИЛКИ РОТАЦИОННОЙ ТРЁХСЕКЦИОННОЙ НАВЕСНОЙ КПР-9

А.В. Чирков, А.Д. Секач…… 187

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ ПАКЕТЕ ANSYS FATIGUE

А.Н. Кондрашова, Н.Л. Прокопенко…… 192

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ХАРВЕСТЕРНОГО МАНИПУЛЯТОРА

А.А. Гончарко, А.А. Дюжев, Александр Л. Кравченок, Алексей Л. Кравченок, А.Н. Колесникович…… 202

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ: КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ, АРХИТЕКТУРА И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ

А.В. Шмелев, А.Н. Колесникович, О.В. Дробышевская…… 207

Научное издание

9-ая международная научно-практическая конференция
«Инновационные технологии в агропромышленном комплексе - сегодня и завтра»

В 2 частях
Часть 2

Сборник научных статей

Статьи изданы в авторской редакции

Оригинал-макет: Романьков С.А.
Обложка: Шландыкова Н.И.

Подписано в печать 29.12.2025. Формат издания 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Newton. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 25,8. Тираж 100 экз. Заказ № 02-26
Государственное научное учреждение
«Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси»
Регистрация № 1/244 от 25.03.14
246050 г. Гомель, Беларусь, Кирова, 32а