

УДК 621-192

DOI 10.62595/1819-5245-2026-1-16-23

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ НОЖЕЙ РЕЖУЩЕГО БАРАБАНА НА ЖЕСТКОСТЬ СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ

К. М. МИХАЙЛОВ, М. И. МИХАЙЛОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Разработаны конструкция сборного режущего барабана кормоуборочного комбайна, а также 3D-модели системы крепления ножей барабана. Приведены результаты исследования жесткости крепления ножей при различных условиях. Установлено влияние условий крепления и применения демпфирующих покрытий базовых поверхностей на жесткость системы крепления.

Ключевые слова: кормоуборочные комбайны, режущий барабан, система крепления ножей, жесткость.

Для цитирования. Михайлов, К. М. Влияние условий крепления ножей режущего барабана на жесткость системы крепления / К. М. Михайлов, М. И. Михайлов // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 1 (104). – С. 16–23. – DOI 10.62595/1819-5245-2026-1-16-23

THE INFLUENCE OF THE CUTTING DRUM KNIVES FASTENING CONDITIONS ON THE RIGIDITY OF THE FASTENING SYSTEM

K. M. MIKHAILOV, M. I. MIKHAILOV

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

A design for a prefabricated cutting drum for a forage harvester, as well as a 3D model of the drum's knife mounting system, have been developed. The results of a study of the knife mounting rigidity under various conditions are presented. The influence of mounting conditions and the use of damping coatings on the base surfaces on the rigidity of the mounting system is determined.

Keywords: forage harvesters, cutting drum, knife fixing system, rigidity.

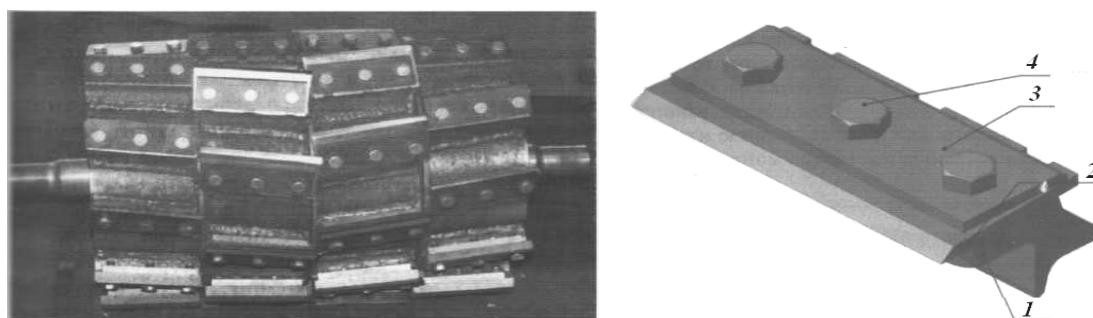
For citation. Mikhailov K. M., Mikhailov M. I. The influence of the cutting drum knives fastening conditions on the rigidity of the fastening system. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 1 (104), pp. 16–23 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2026-1-16-23

Введение

Система «нож – прижим – опора», показанная на рис. 1, является одним из наиболее ответственных узлов режущего барабана комбайна КВК 8060 производства ОАО «Гомсельмаш». В данной системе реализуется как контактное взаимодействие с трением между ее компонентами, так и изгиб ножа вследствие резания зеленой массы [1–8].

Важнейшим критерием эксплуатационной стойкости ножей является положение режущей кромки ножа, которое зависит от жесткости системы крепления и износа режущей кромки. Известно, что ее радиус не должен превышать 0,2–0,3 мм, в противном случае резко возрастают потребляемая мощность и расход топлива. Кроме

того, перерывы на заточку ножей ведут к значительной потере производительности комбайна. В этой связи в условиях сельскохозяйственного предприятия был проведен специальный эксперимент. В качестве объектов исследований приняты ножи питающе-измельчающих аппаратов комбайнов КВК-800 двух типов: импортные стальные ножи MWS с упрочнением режущей кромки твердым сплавом и отечественные ножи из высокопрочного чугуна марки ВЧТГ. Мониторинг работоспособности ножей с измерением износа и затупления режущей кромки проведен по разработанной ОАО «Гомсельмаш» методике полевых испытаний.



а)

б)

Рис. 1. Общий вид режущего барабана комбайна (а); системы крепления ножа (б):

1 – опора; 2 – нож; 3 – прижим; 4 – винт

Чтобы описать рассеяние результатов измерений, проведена статистическая обработка данных. Из приведенных данных следует, что ножи MWS после наработки 1000 т имеют повышенные в ~ 2 раза значения радиуса режущей кромки по сравнению с ножами из чугуна ВЧТГ (55 HRC) и при этом они обнаруживают больший разброс (рассеяние) результатов испытаний.

В рамках работ по замещению импортных стальных ножей системы «нож – прижим – опора» отечественными, изготовленными из высокопрочного чугуна марки ВЧТГ, возникла необходимость оценки напряженно-деформированного состояния системы закрепления ножей, а также определение влияния покрытий на основе полимеров базовых поверхностей на жесткость системы закрепления ножей.

Цель работы – повышение работоспособности режущего барабана кормоуборочного комбайна.

Методика исследования

Основными задачами при проведении исследований были:

– построение 3D-модели системы крепления ножа в программном комплексе ANSYS;

– определение распределений перемещений в системе крепления ножа.

Исследования напряженно-деформированного состояния выполнялось методом конечных элементов. Для этого были разработаны 3D-модели системы крепления ножа, а также произведено ее разделение на конечные элементы. Для проведения расчетов разработаны граничные условия и приложена нагрузка в виде распределенной силы.

В моделях опора жестко закреплена, т. е. на ее опорной поверхности заданы граничные условия первого типа

$$U_i = 0. \tag{1}$$

Граничные условия второго типа заданы для k -го элемента системы (на режущей кромке ножа и в болтовых соединениях) на поверхностях распределением усилий \bar{F}_i^k

$$\sigma_{ij}^k l_j^k = \bar{F}_i^k, \quad (2)$$

где l_j^k – направляющий косинус.

Взаимодействие двух тел (например, ножа и прижима) с учетом их механических и геометрических свойств описывается условиями контакта

$$\bar{U}_i^k \Big|_{s_{kl}^U} - \bar{U}_i^l \Big|_{s_{kl}^U} = \gamma_i^{k,l}, \quad i=1,2,3; \quad l=1 \dots m, \quad (3)$$

$$\sigma_{nm}^k \Big|_{s_{kl}^\sigma} - \sigma_{nm}^l \Big|_{s_{kl}^\sigma} = 0; \quad (4)$$

$$\sigma_{nr}^k \Big|_{s_{kl}^\sigma} - \sigma_{nr}^l \Big|_{s_{kl}^\sigma} \leq f^{k,l} \sigma_{nm}, \quad (5)$$

где m – количество тел, контактирующих с k -м элементом; $f^{k,l}$ – коэффициент трения между k и l телами.

Осевые усилия затяжки болтов рассчитываются исходя из предела текучести их материала (стали), равного 450 МПа, в предположении, что при пластическом деформировании болтов напряжения, а следовательно, и осевые усилия, остаются практически неизменными.

Параметры конечно-элементной сетки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры конечно-элементной сетки

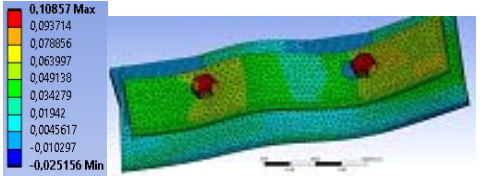
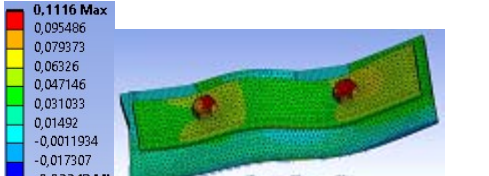

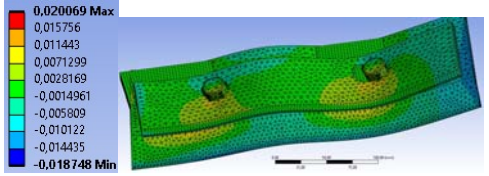
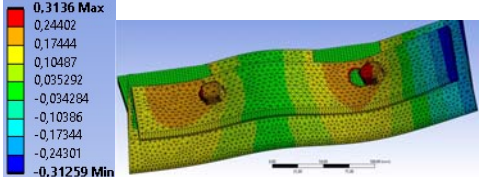
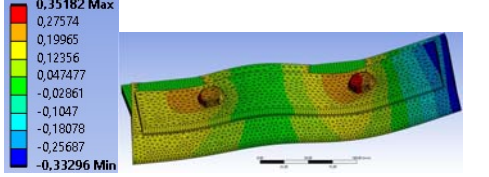
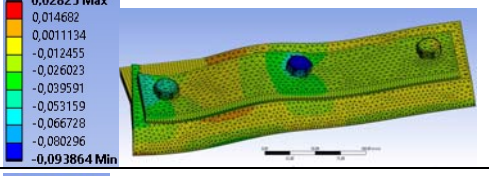
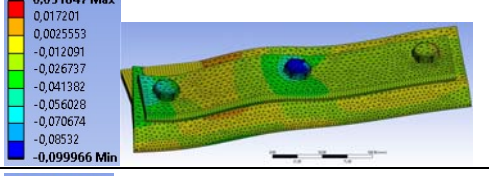
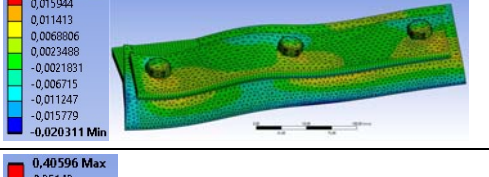
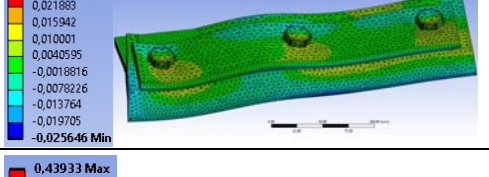
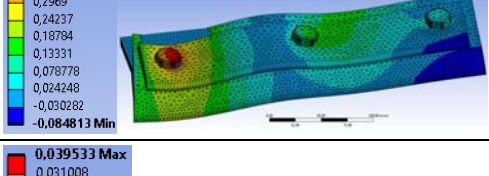
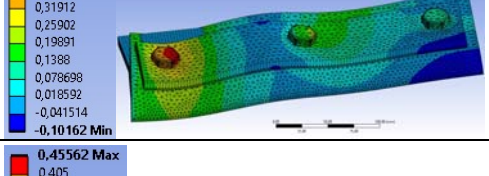
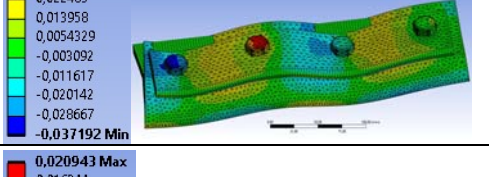
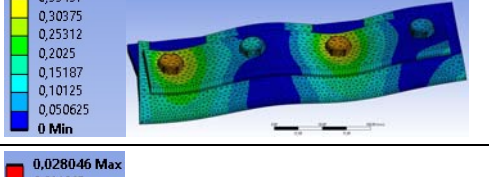
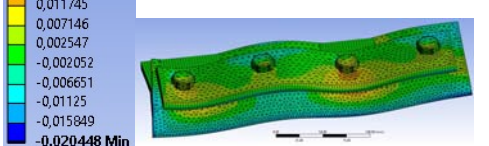
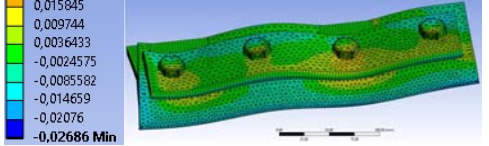
Параметр	Значение
Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение	Стандартная сетка
Сглаживание поверхности	Включить
Проверка Якобиана	4 Points
Максимальный размер элемента	1,7309 мм
Допуск	0,33654 мм

Результаты и их анализ

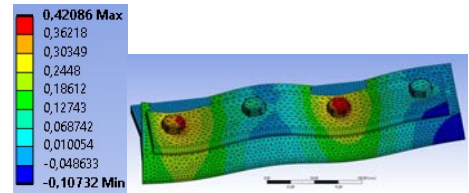
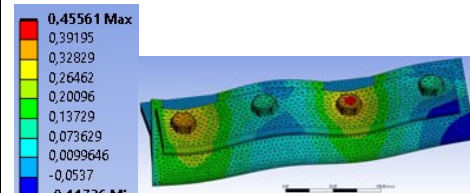
Для более детального исследования были получены картины распределения перемещений в элементах системы крепления режущих ножей (табл. 2). Полученные результаты позволяют заключить, что наибольшие перемещения концентрируются в области приложения режущей нагрузки и под шляпками болтов. В данных областях нормальные перемещения и их интенсивность примерно на порядок больше, чем в остальных частях системы.

Таблица 2

Результаты расчета перемещений в системе крепления ножей

Перемещения вдоль осей	Крепежные болты M16	Крепежные болты M18
X	 <p>0,10857 Max 0,093714 0,078856 0,063997 0,049138 0,034279 0,01942 0,0045617 -0,010297 -0,025156 Min</p>	 <p>0,1116 Max 0,095486 0,079373 0,06326 0,047146 0,031033 0,01492 -0,0011934 -0,017307 -0,03342 Min</p>
Y	 <p>0,020069 Max 0,015756 0,011443 0,0071299 0,0028169 -0,0014961 -0,005809 -0,010122 -0,014435 -0,018748 Min</p>	 <p>0,020069 Max 0,015756 0,011443 0,0071299 0,0028169 -0,0014961 -0,005809 -0,010122 -0,014435 -0,018748 Min</p>
Z	 <p>0,3136 Max 0,24402 0,17444 0,10487 0,035292 -0,034284 -0,10386 -0,17344 -0,24301 -0,31259 Min</p>	 <p>0,35182 Max 0,27574 0,19965 0,12356 0,047477 -0,02861 -0,1047 -0,18078 -0,25687 -0,33296 Min</p>
X	 <p>0,02825 Max 0,014682 0,0011134 -0,012455 -0,026023 -0,039591 -0,053159 -0,066728 -0,080296 -0,093864 Min</p>	 <p>0,031847 Max 0,017201 0,0025553 -0,012091 -0,026737 -0,041382 -0,056028 -0,070674 -0,08532 -0,09966 Min</p>
Y	 <p>0,020476 Max 0,015944 0,011413 0,0068806 0,0023488 -0,0021831 -0,006715 -0,011247 -0,015779 -0,020311 Min</p>	 <p>0,027824 Max 0,021883 0,015942 0,010001 0,0040595 -0,0018816 -0,0078226 -0,013764 -0,019705 -0,025646 Min</p>
Z	 <p>0,40596 Max 0,35143 0,2969 0,24237 0,18784 0,13331 0,078778 0,024248 -0,020282 -0,084813 Min</p>	 <p>0,43933 Max 0,37923 0,31912 0,25902 0,19891 0,1388 0,078698 0,018592 -0,041514 -0,10162 Min</p>
X	 <p>0,039533 Max 0,031008 0,022483 0,013958 0,0054329 -0,003092 -0,011617 -0,020142 -0,028667 -0,037192 Min</p>	 <p>0,45562 Max 0,405 0,35437 0,30375 0,25312 0,2025 0,15187 0,10125 0,050625 0 Min</p>
Y	 <p>0,020943 Max 0,016344 0,011745 0,007146 0,002547 -0,002052 -0,006651 -0,01125 -0,015849 -0,020448 Min</p>	 <p>0,028046 Max 0,021945 0,015845 0,009744 0,0036433 -0,0024575 -0,0085582 -0,014659 -0,02076 -0,02686 Min</p>

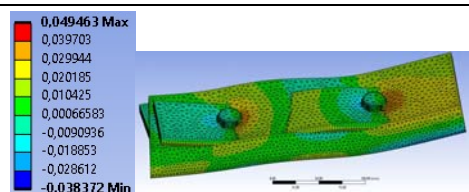
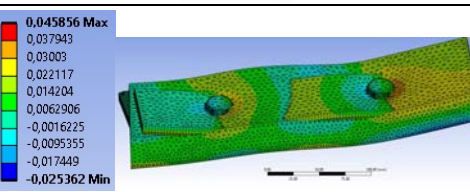
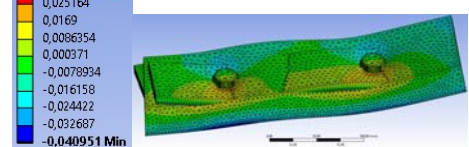
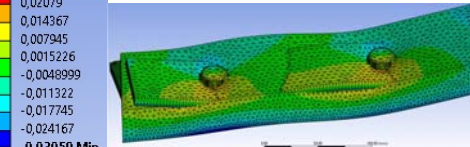
Окончание табл. 2

Перемещения вдоль осей	Крепежные болты М16	Крепежные болты М18
Z		

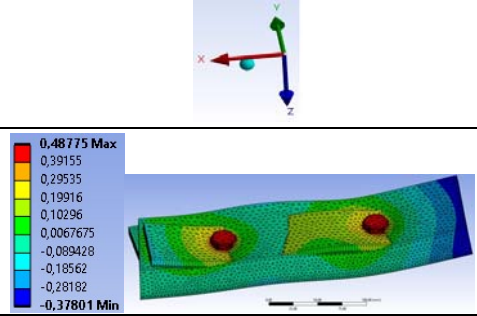
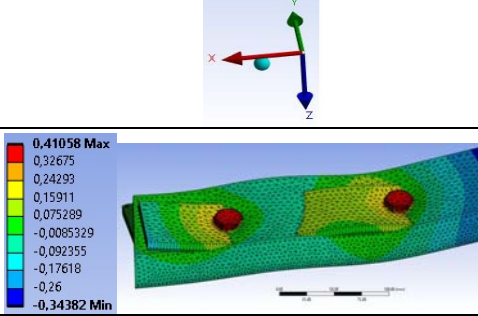
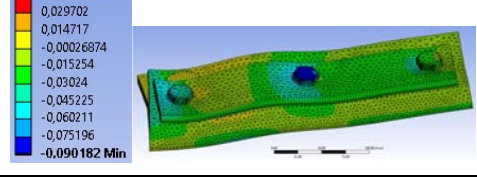
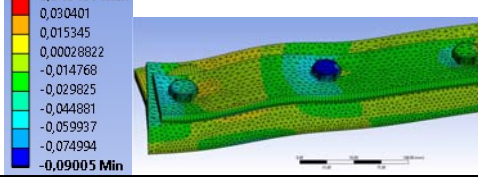
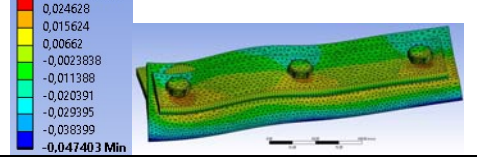
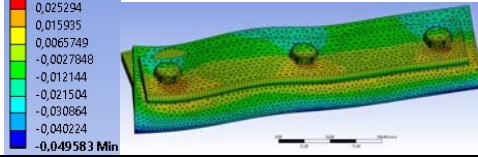
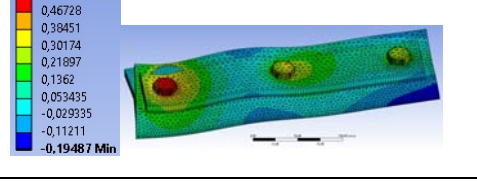
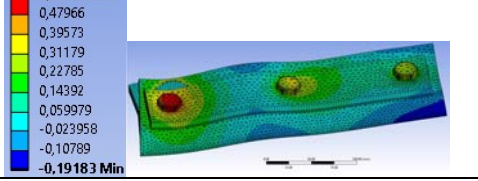
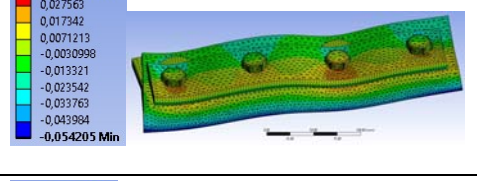
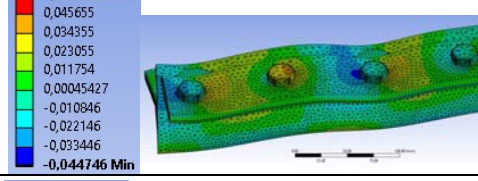
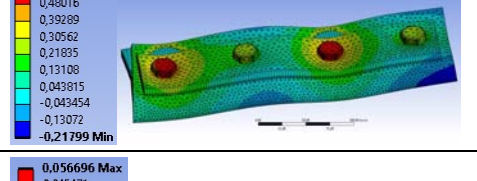
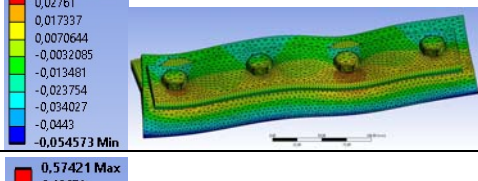
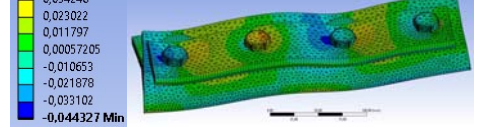
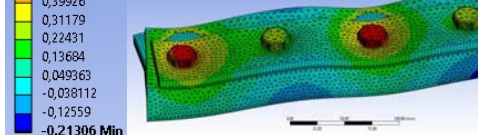
Анализ результатов табл. 2 позволяет заключить, что увеличение сил закрепления ножей в 1,27 раза приводит к увеличению минимальных перемещений вдоль осей OX в 1,33 раза, OY – 1,3 раза, OZ – 1,08 соответственно. К тому же при закреплении винтами М16 увеличилась зона максимальных перемещений и произошло раскрытие контакта в зоне крепления винта, расположенного справа, а при закреплении винтами М18 увеличилась зона перемещения кромки ножа в 1,65 раза. Применение трех винтов приводит к росту минимальных перемещений вдоль осей OX в 3,783 раза, а уровень максимальных перемещений уменьшился в 3,84 раза, кроме того, изменился характер распределения перемещений – он стал более равномерным. Увеличение сил закрепления ножей в 1,27 раза приводит к увеличению минимальных перемещений вдоль осей OX в 1,06 раза, а максимальных – в 1,12 раза; OY – 1,26 раза, а максимальных – в 1,36 раза; OZ – 1,198, а максимальных – в 1,08 раза соответственно. Применение четырех винтов вместо трех приводит к уменьшению минимальных перемещений вдоль осей OX в 2,523 раза, а уровень максимальных перемещений увеличивается в 1,39 раза, кроме того, изменился характер распределения перемещений – он стал неравномерный с минимумом в центре ножа. Применение крепежных винтов М18 вместо М16 приводит к увеличению минимальных перемещений вдоль осей OX в 11,06 раза, а максимальных – в 11,52 раза; OY – в 1,31 раза, а максимальных – в 1,33 раза; OZ – в 1,093, а максимальных – в 1,08 раза соответственно.

Таблица 3

Результаты расчета перемещений системы крепления ножей

Перемещения вдоль осей	М18 со слоем 0.5мм	М18 со слоем 1 мм
X		
Y		

Окончание табл. 3

Перемещения вдоль осей	M18 со слоем 0.5мм	M18 со слоем 1 мм
Z		
X		
Y		
Z		
X		
Y		
Z		

Анализ результатов табл. 3 позволяет заключить, что применение композиционного покрытия на базовых поверхностях толщиной 0,5 и 1,0 мм при двух крепежных болтах приводит к уменьшению минимальных перемещений вдоль оси OX в 1,57 раза, а максимальных – в 1,079 раза; вдоль оси OY минимальных перемещений – в 1,59 раза, а максимальных – к увеличению в 1,379 раза; к уменьшению минимальных перемещений вдоль оси OZ – в 1,099 раза, и максимальных – в 1,188 раза соответственно.

При трех крепежных болтах с толщиной покрытия 0,5 и 1,0 мм минимальные перемещения уменьшаются вдоль оси OX в 1,0014 раза, а максимальные – в 1,017 раза; вдоль оси OY минимальные перемещения увеличиваются в 1,045 раза, а максимальные – в 1,03 раза; минимальные перемещения вдоль оси OZ уменьшаются в 1,016 раза, а максимальные – увеличиваются в 1,0246 раза соответственно. При четырех крепежных болтах с толщиной покрытия 0,5 и 1,0 мм минимальные перемещения уменьшаются вдоль оси OX в 1,211 раза, а максимальные – увеличиваются в 1,5 раза; вдоль оси OY минимальные перемещения уменьшаются в 4,04 раза, а максимальные – в 14,98 раза; минимальные перемещения вдоль оси OZ увеличиваются в 4,8 раза, а максимальные – увеличиваются в 10,13 раза соответственно. Кроме того, изменяется характер распределения перемещений вдоль режущей кромки

Заключение

В результате проведенной работы была сформулирована постановка задачи для многоэлементной системы «нож – прижим – опора» с учетом взаимовлияния контактного взаимодействия и объемного деформирования.

Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния многоэлементной системы «нож – прижим – опора», в том числе и в областях контактного взаимодействия с учетом различных величин сил закрепления и условий контакта. Проведено конечно-элементное компьютерное моделирование трехмерного напряженно-деформированного состояния многоэлементной системы «нож – прижим – опора» с учетом контактного взаимодействия, а также влияния величины нагрузки. Исследовано контактное взаимодействие между поверхностями различных компонент системы, в том числе между ножом и крепежными элементами.

Литература

1. Журавков, М. А. Напряженно-деформируемое состояние трибофатической системы «прижим – нож – основание режущего инструмента комбайна» / М. А. Журавков, С. С. Щербаков, А. В. Круподеров // Теоретическая и прикладная механика : межвед. сб. науч.-метод. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2012. – Вып. 27. – С. 219–224.
2. Щербаков, С. С. Напряженно-деформированное состояние и повреждаемость трибофатической системы «прижим – нож – опора» режущего инструмента комбайна / С. С. Щербаков // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 2 (19). – С. 75–80.
3. Объемная повреждаемость ножа и противорежущего бруса режущего аппарата комбайна в динамической постановке / М. А. Журавков, С. С. Щербаков, О. А. Назань [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси ; редкол.: С. Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2015. – Вып. 4. – С. 232–236.
4. Миренков, В. В. Анализ напряженно-деформированного состояния ножа измельчающего барабана кормоуборочного комбайна / В. В. Миренков, В. Ф. Хиженок, П. Е. Родзевич // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2014. – № 1 (56). – С. 20–28.
5. Оценка стойкости ножей питающе-измельчающих аппаратов сельскохозяйственных комбайнов: теория, стендовые и полевые испытания / А. А. Новиков, В. В. Комиссаров, В. О. Замятин [и др.] // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2016. – № 1 (32). – С. 201–208.
6. Дробышевский, П. С. Опыт применения чугуна ВЧТГ для изготовления ножей режущих барабанов кормоуборочных комбайнов / П. С. Дробышевский, А. А. Новиков // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : тез. докл. междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 4–5 окт. 2018 г. / Науч.-техн. центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2018. – С. 126–127.

7. Псырков, Н. В. Опыт внедрения специального чугуна VChTG для изготовления ножей режущих барабана кормоуборочной техники / Н. В. Псырков, А. А. Квитанов, В. О. Замятин // Актуальные вопросы машиноведения : науч. тр. / Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси ; редкол.: А. А. Дюжев [и др.]. – Минск, 2013. – Вып. 2. – С. 388–390.
8. Псырков, Н. В. Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как новый конструкционный материал / Н. В. Псырков // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3/4 (20, 21). – С. 213–218.

References

1. Zhuravkov M. A., Shcherbakov S. S., Krupoderov A. V. Stress-strain state of the tribo-fatigue system “clamp – knife – base of the cutting tool of a combine”. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: mezhd. sb. nauch.-metod. statej.* [Theoretical and applied mechanics: interdepartmental collection of scientific and methodological articles]. Minsk, Belorusskii natsional’nyi tekhnicheskii universitet, 2012, vol. 27, pp. 219–224 (in Russian).
2. Shcherbakov S. S. Stress-strain state and damageability of the tribo-fatigue system “clamp – knife – support” of a combine cutting tool. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2012, no. 2 (19), pp. 75–80 (in Russian).
3. Zhuravkov M. A., Shcherbakov S. S., Nasan’ O. A., Marmysh D. E., Shemet L. A., Kuznecova E. L. Volumetric damage of the knife and counter-shear bar of the combine harvester cutting apparatus in a dynamic setting. *Aktual’nye voprosy mashinovedeniya: sb. nauch. tr.* [Current issues in mechanical engineering: collection of scientific papers]. Minsk, Ob’ed. in-t mashinostroeniya NAN Belarusi, 2015, iss. 4, pp. 232–236 (in Russian).
4. Mirenkov V. V., Hizhenok V. F., Rodzevich P. E. Analysis of the stress-strain state of the chopping drum knife of a forage harvester. *Vestnik Gomel’skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2014, no. 1 (56), pp. 20–28 (in Russian).
5. Novikov A. A., Komissarov V. V., Zamyatin V. O., Drobyshevskij P. S., Shcherbakov S. S., Sosnovskij L. A. Evaluation of the durability of knives of feed-chopping devices of agricultural combines: theory, bench and field tests. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport*, 2016, no. 1 (32), pp. 201–208 (in Russian).
6. Drobyshevskij P. S., Novikov A. A. Experience of using VChTG cast iron for the manufacture of cutting drum knives for forage harvesters. *Innovatsionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse – segodnya i zavtra: tez. dokl. mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Gomel’, 4–5 okt. 2018 g.* [Innovative technologies in the agro-industrial complex – today and tomorrow: abstract of the report of the international scientific and practical conference, Gomel’, October 4–5, 2018]. Gomel’, Nauch.-tekhn. tsentr kombainostroeniya OAO “Gomsel’mash”, 2018, pp. 126–127 (in Russian).
7. Pсырков Н. В., Квитанов А. А., Замыатин О. Experience in the implementation of special cast iron VChTG for the manufacture of cutting knives for forage harvesting drums. *Aktual’nye voprosy mashinovedeniya: nauch. tr.* [Current issues in mechanical engineering: scientific paper.]. Minsk, 2013, vol. 2, pp. 388–390 (in Russian).
8. Pсырков Н. В. Special high-strength cast iron with spheroidal graphite as a new structural material. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2012, no. 3/4 (20, 21), pp. 213–218 (in Russian).

Поступила 27.02.2026 г.