

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-95-104>
УДК 004.925.84:544.023.26:621.825.63



Оригинальная статья

А. С. Антонов^{1*}, Н. Р. Прокопчук², П. В. Клочко¹, Д. В. Нахват¹

¹*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
ул. Ожешко, 22, 230023, Гродно, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный технологический университет,
ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь*

**РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ**

Аннотация. Рассмотрены физико-химические, структурные и конструкционные условия моделирования и оптимизации триботехнических покрытий на основе полиамидов в узлах трения автомобильных и специальных агрегатов. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов карданной передачи, осуществленный в CAE-системах Pro/ENGINEER Mechanica и LS-DYNA, позволил установить оптимальную толщину триботехнического покрытия с минимальными напряжениями. Разработаны составы композиционных материалов на основе промышленно выпускаемого полиамида ПА-6 и адгезионного подслоя для формирования триботехнических покрытий на деталях карданного вала грузового автомобиля и специальной техники. Предложено в состав композиционного материала вводить полиамидную смолу на основе аминокислот смоляных кислот канифоли, которая обладает высокой совместимостью с полиамидной матрицей, обеспечивает пластифицирующий эффект и равномерное распределение дисперсных частиц модификатора по объему композита. При использовании полиамидной смолы в качестве адгезионного подслоя на поверхностях элементов карданной передачи обеспечивается повышенное взаимодействие на границе «покрытие – подслоя». Разработанные составы композиционных покрытий и адгезионного подслоя, оптимизированные по конструктивным решениям, апробированы в конструкциях карданных валов, производимых ОАО «Белкард» в качестве полноценной альтернативы импортным аналогам.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод конечных элементов, функциональное покрытие, композиционный материал, полиамид, карданный вал

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2024–2025 годы, задание 8.4.1.51 «Концепт многоуровневого модифицирования в материаловедении и технологии нанокompозитов на основе смесей термопластов».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Антонов Александр Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. <https://orcid.org/0000-0002-6155-4635>. E-mail: antonov.science@gmail.com; *Прокопчук Николай Романович* – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов Белорусского государственного технологического университета. <https://orcid.org/0000-0001-7290-1199>. E-mail: nrprok@gmail.com; *Клочко Павел Валентинович* – магистр педагогических наук, начальник цикла тактических дисциплин военного факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. <https://orcid.org/0009-0007-1285-140X>. E-mail: klochko_pv@grsu.by; *Нахват Денис Викторович* – магистр педагогических наук, начальник кафедры тылового обеспечения военного факультета, аспирант кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий инженерного факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. <https://orcid.org/0009-0006-5301-5339>. E-mail: naхvat_dv@grsu.by

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Вклад авторов: *Антонов Александр Сергеевич* – разработка методологии исследования, создание модели исследования, компьютерное моделирование, интерпретация результатов исследования, написание и оформление текста рукописи; *Прокопчук Николай Романович* – обоснование концепции исследования, интерпретация результатов, редактирование текста рукописи, формулировка выводов; *Клочко Павел Валентинович* – компьютерное моделирование, подготовка образцов, проведение исследования параметров деформационно-прочностных и адгезионных характеристик полимерных композитов; *Нахват Денис Викторович* – сбор и систематизация данных, подготовка образцов, проведение исследования параметров триботехнических характеристик полимерных композитов.

Для цитирования: Разработка функциональных полимерных покрытий для узлов трения автомобильных агрегатов / А. С. Антонов, Н. Р. Прокопчук, П. В. Клочко, Д. В. Нахват // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 95–104. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-95-104>

Поступила в редакцию: 15.08.2024

Доработанный вариант: 02.05.2025

Утверждена к публикации: 12.06.2025

Подписана в печать: 19.06.2025

Original article

Alexander S. Antonov^{1*}, Nikolay R. Prokopchuk², Pavel V. Klochko¹, Denis V. Nakhvat¹

¹Yanka Kupala State University of Grodno

22, Ozheshko St., 230023, Grodno, Republic of Belarus

²Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlov St., 220006, Minsk, Republic of Belarus

DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL POLYMER COATINGS FOR FRICTION COMPONENTS IN AUTOMOTIVE ASSEMBLIES

Abstract. Physico-chemical, structural and engineering prerequisites of modeling and optimization of tribological coatings based on polyamides in friction units of automobile and special units are considered. The analysis of the stress-strain state of the elements of the cardan transmission, carried out in CAE-systems Pro/ENGINEER Mechanica and LS-DYNA, allowed establishing the optimal thickness of tribological coating with minimum stresses. Composite materials based on commercially available polyamide PA-6 and adhesive sublayer for formation of tribological coatings on parts of the cardan shaft of trucks and special equipment are developed. It is proposed to introduce a polyamide resin based on aminoamides of resin acids of rosin, which has high compatibility with the polyamide matrix, provides plasticizing effect and uniform distribution of dispersed particles of modifier over the composite volume. When polyamide resin is used as an adhesive sublayer on the surfaces of the cardan transmission elements, increased interaction at the boundary “coating – sublayer” is provided. The developed composite coatings and adhesive sublayers, optimized by design solutions, have been tested in the cardan shafts produced by Belkard OJSC as a full-fledged alternative to imported analogues.

Keywords: computer modeling, finite element method, functional coating, composite material, polyamide, cardan shaft

Acknowledgments: the work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Belarus within the framework of the State Scientific Research Program “Materials science, new materials and technologies” for 2024–2025, task 8.4.1.51 “Concept of multilevel modification in materials science and technology of nanocomposites based on thermoplastic mixtures”.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Alexander S. Antonov* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Materials Science and Resource-Saving Technology Department at Yanka Kupala State University of Grodno. <https://orcid.org/0000-0002-6155-4635>. E-mail: antonov.science@gmail.com; *Nikolay R. Prokopchuk* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Professor of Polymer Composite Materials Department at Belarusian State Technological University. <https://orcid.org/0000-0001-7290-1199>. E-mail: nrprok@gmail.com; *Pavel V. Klochko* – Master of Sciences (Pedagogy), Head of the Cycle of Tactical Disciplines of the Military Faculty at Yanka Kupala State University of Grodno. <https://orcid.org/0009-0007-1285-140X>. E-mail: klochko_pv@grsu.by; *Denis V. Nakhvat* – Master of Sciences (Pedagogy), Head of the Military Logistics Department of the Military Faculty, Postgraduate Student of Materials Science and Resource-Saving Technology Department of the Engineering Faculty at Yanka Kupala State University of Grodno. <https://orcid.org/0009-0006-5301-5339>. E-mail: naxvat_dv@grsu.by

Contribution of the authors: *Alexander S. Antonov* – methodology, model development, computer simulation, interpretation of the results, writing and formatting of the text of the manuscript; *Nikolay R. Prokopchuk* – conceptualization, interpretation of the results, review and editing, supervision; *Pavel V. Klochko* – computer simulation, sample preparation, investigation of the stress-strain and adhesion properties of the polymer composites; *Denis V. Nakhvat* – analysis and generalization of literature data, sample preparation, investigation of the tribological properties of the polymer composites.

For citation: Antonov A. S., Prokopchuk N. R., Klochko P. V., Nakhvat D. V. Development of functional polymer coatings for friction components in automotive assemblies. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 2, pp. 95–104 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-95-104>

Received: 15.08.2024

Modified: 02.05.2025

Approved for publication: 12.06.2025

Signed to the press: 19.06.2025

Введение. В современном машиностроении широко применяют карданные передачи, предназначенные для передачи крутящего момента между элементами агрегатов, имеющими в процессе эксплуатации относительные перемещения [1–5]. При проектировании и расчете карданной передачи следует знать, в какие эксплуатационные условия будет поставлена разрабатываемая конструкция, определить все виды действующих нагрузок не только по величине, но и по времени их действия. Для надежной эксплуатации транспортного средства или специальной техники необходимо, чтобы карданная передача не выходила из строя по причине преждевременной поломки ее деталей (обладала заданными параметрами прочности) или их изнашивания (имела определенный срок службы). Таким образом, при конструировании карданных передач используют два вида расчетов: на прочность и на износ.

В традиционных методиках расчета вызывает сложность прочностной расчет, поскольку качество карданной передачи определяется не столько ее статическими характеристиками, сколько динамическими. Переход к расчету карданных валов на прочность с помощью компьютерных методов инженерного анализа предполагает прежде всего максимальную оптимизацию конструкции, то есть снижение расхода металла с одновременным его перераспределением для повышения прочности.

В современных конструкциях карданных передач, применяемых в автотракторном машиностроении и специальной технике, используют функциональные покрытия, наносимые на подвижные элементы с целью снижения нагрузок, действующих на передачу в момент запуска и останова, а также снижающие потери на трение и интенсивность изнашивания при установившемся режиме эксплуатации [3–5]. К числу распространенных функциональных покрытий элементов карданных передач относятся покрытия на основе алифатических полиамидов, оказывающие многофакторное действие на работоспособность элементов при различных условиях эксплуатации [4, 5].

Целью настоящего исследования являлась оптимизация геометрических размеров функционального покрытия на элементах карданной передачи с использованием компьютерных технологий и разработка составов и технологии композиционных материалов на основе алифатических полиамидов для его формирования.

Методика исследований. Объектом исследования было выбрано шлицевое соединение конструкции карданного вала, применяемого для комплектации грузовых автомобилей и специальной техники.

Подвижные шлицевые соединения карданного вала изготавливают с многофункциональным покрытием на основе алифатических полиамидов [3–5]. В качестве модельных покрытий использовали покрытие на основе полиамида 11 (Rilsan[®]) фирмы Elf Atochem (Франция), широко применяемого в настоящее время в конструкциях карданных передач, и полиамида-6 (ПА-6), промышленно выпускаемого на филиале «Завод Химволокно» ОАО «Гродно Азот»¹. Покрытие формировали из псевдооживленного слоя, осаждая порошкообразный продукт с размером частиц 80–200 мкм на подготовленную поверхность, содержащую слой адгезива типа Primgreen. После формирования полученное покрытие подвергали механической обработке с целью достижения заданных размеров, соответствующих технической документации.

Для построения геометрии и определения оптимальной технологии сборки элементов карданной передачи использовали CAD-модуль интегрированной системы автоматизированного моделирования Pro/ENGINEER Wildfire 5.0, который обеспечивает сквозной процесс проектирования, инженерного анализа и подготовки производства изделий любой сложности и назначения, включая создание интерактивной документации и обмен данными с другими системами.

Анализ напряженно-деформированного состояния элементов карданной передачи осуществляли в CAE-модуле Pro/ENGINEER Mechanica, реализующем метод конечных элементов. Для расчета напряженно-деформированного состояния элементов шлицевого соединения были заданы параметры прочностных и теплофизических характеристик материалов, соответствующих значениям характеристик стали 45 для элементов втулки и вала, а также ПА-6 и ПА-11 (полиамид-11) марки Rilsan[®] (концерн Arkema) – для покрытия. Динамический анализ проводили

¹ «GRODNAMID 27» (относительная вязкость – 2,70±0,04) по ТУ РБ 500048054.009-2001.

на основе параллельных высокопроизводительных вычислений с помощью кластерных суперкомпьютерных конфигураций семейства «СКИФ» в многоцелевой многопроцессорной программной системе конечно-элементного анализа LS-DYNA версии 970. Для реализации параллельных вычислений применяли суперкомпьютерную установку ВМ 5100, которая представляет собой 16-узловой опытный образец ЭКСС КУ с топологией двумерного тора в следующей конфигурации: 16 узлов в конструктиве 1U (каждый узел содержит двухпроцессорную системную плату Intel® SCB2, два микропроцессора Pentium III 1,4 ГГц, оперативную память объемом 1024 Мбайт, жесткий диск SCSI объемом 18 Гбайт, два встроенных сетевых адаптера Fast Ethernet, высокоскоростной адаптер SCI PCI-64/66 D335), коммутатор сети Fast Ethernet, управляющая машина. Базовая операционная система для управляющей ЭВМ и вычислительных узлов – Linux Fedora Core 2.

Подготовку технической документации на оптимизированную конструкцию карданной передачи в соответствии с требованиями ЕСКД осуществляли в среде объектно-ориентированного пакета дву- и трехмерного геометрического моделирования AutoCAD Mechanical 2023 [6, 7].

Результаты и их обсуждение. Функциональные покрытия на основе полимерных матриц позволяют усовершенствовать конструкцию карданного вала и обеспечить ее эффективную эксплуатацию в автотракторной и специальной технике [4, 5]. Для определения геометрических параметров покрытия, обеспечивающих оптимальную эксплуатацию карданного вала, были проведены модельные исследования шлицевого соединения при нанесении ПА-11 по технологии, рекомендованной его разработчиком [8].

В наших предыдущих исследованиях [9, 10] показана эффективность использования в качестве матричного компонента для формирования функциональных покрытий ПА-6 отечественного производства взамен импортного ПА-11 и влияние состава композиционного материала, технологических режимов формирования покрытий на параметры их деформационно-прочностных, адгезионных, триботехнических и защитных характеристик. Вместе с тем важным фактором, который обуславливает и эксплуатационные характеристики функциональных покрытий, формируемых на металлических субстратах, является толщина формируемого слоя. Правильно подобранная толщина обеспечивает устойчивость покрытия к деформациям и повреждениям, что способствует увеличению технического ресурса изделия. Неверно подобранная толщина приводит к образованию таких дефектов покрытия, как шагрень («апельсиновая корка»), поры, пузыри и вздутия. Кроме того, оптимизация толщины покрытия позволяет снизить расход полимерного материала, что важно с точки зрения экономии и ресурсосбережения.

В связи с этим весьма актуальной научной и практической задачей является определение оптимальных геометрических характеристик функциональных покрытий для заданных составов полимерных композиционных материалов. Для оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния системы «покрытие – подложка» эффективным инструментом выступают численные методы анализа, применяемые при решении задач механики деформируемого тела методом конечных элементов, с использованием прикладных пакетов программ.

Повышение технического ресурса шлицевого соединения карданного вала – это многофакторная задача, которая обуславливает эффективность его эксплуатации. Превалирующими критериями оптимизации шлицевого соединения являются состав полимерного покрытия, определяющий прежде всего параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик, и его геометрия (толщина), которая влияет на параметры ударной прочности, адгезионных характеристик и качество поверхностного слоя (шероховатость). В связи с тем что несущая способность композиционного полимерного покрытия определяется параметрами деформационно-прочностных характеристик матричного компонента, оптимизацию толщины покрытия осуществляли для материала ПА-6. Для расчета напряженно-деформированного состояния покрытия при различных значениях толщины слоя h (мм) использовали следующие параметры физико-механических характеристик материала:

- модуль упругости $E = 2\ 620$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,34$;
- модуль сдвига $G = 970,4$ МПа;
- массовая плотность $\rho = 1\ 120$ кг/м³;

предел прочности при растяжении $\sigma_p = 90$ МПа;
предел текучести $\sigma_T = 103,6$ МПа;
коэффициент теплопроводности (теплоемкость материала) $\lambda = 0,233$ Вт/(м · К);
удельная теплоемкость $C = 1\,601$ Дж/(кг · К).

Для реализации поставленной цели моделирования и оптимизации функциональных покрытий на основе алифатических полиамидов по критерию геометрических параметров (толщины) в системе Pro/ENGINEER была разработана модель шлицевого соединения. С целью снижения затрат компьютерного времени при расчете модель представляла собой 1/8 часть вала с тремя шлицами (рис. 1).

Был проведен расчет разработанной модели шлицевого соединения на статические напряжения в среде Pro/ENGINEER Mechanical, к созданной модели приложена нагрузка и установлены ограничения (рис. 2). По технической документации вал должен выдерживать момент, равный $5\,500$ кН · мм без разрушения. В связи с тем что модель втулки является 1/8 частью реальной детали, то нагрузку принимали равной $687,5$ кН · мм.

Результат расчета (рис. 3, а) показал, что максимальные напряжения сосредоточены в области разделения соединения слоем покрытия. Исходя из результатов виртуальных испытаний, подтвержденных анализом локальной и глобальной чувствительности оптимизируемых параметров, была определена оптимальная толщина покрытия, равная 200 мкм, которая позволила обеспечить минимальный уровень контактных напряжений (рис. 3, б).

Аналогичным образом для изучения распределения напряжения в шлицах карданной передачи с полимерным покрытием в среде LS-DYNA была смоделирована пара «шлиц втулки – шлиц вала» карданного вала. Испытания моделировались в режиме старта для моделей с различной толщиной полимерного покрытия – 100 и 200 мкм. Нами установлено, что наиболее оптимальная толщина полимерного покрытия равна 200 мкм (рис. 4), при ней возникающие напряжения минимальны. При этом выявлено, что в начальный период работы шлицевого соединения в шлицах карданной передачи наблюдаются максимальные напряжения, которые с течением времени

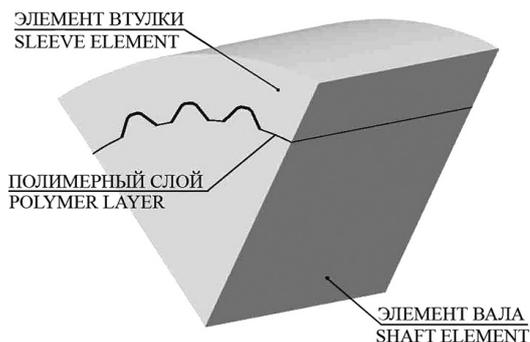


Рис. 1. 3d-Модель шлицевого соединения
Fig. 1. 3d Model of splined joint

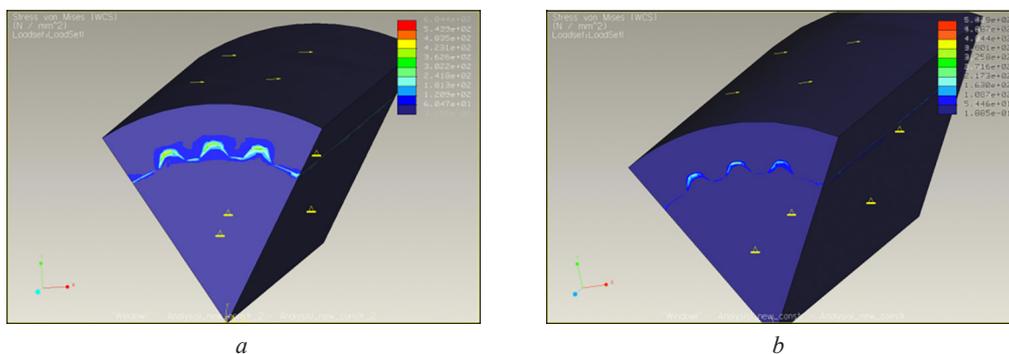
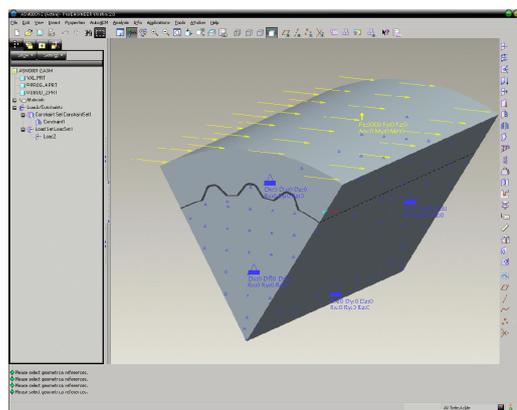


Рис. 3. Результат расчета напряженно-деформированного состояния шлицевого соединения в среде Pro/ENGINEER Mechanical: а – до оптимизации; б – после оптимизации

Fig. 3. The result of the calculation of the stress-strain state of the splined joint in the Pro/ENGINEER Mechanical: а – before optimization; б – after optimization

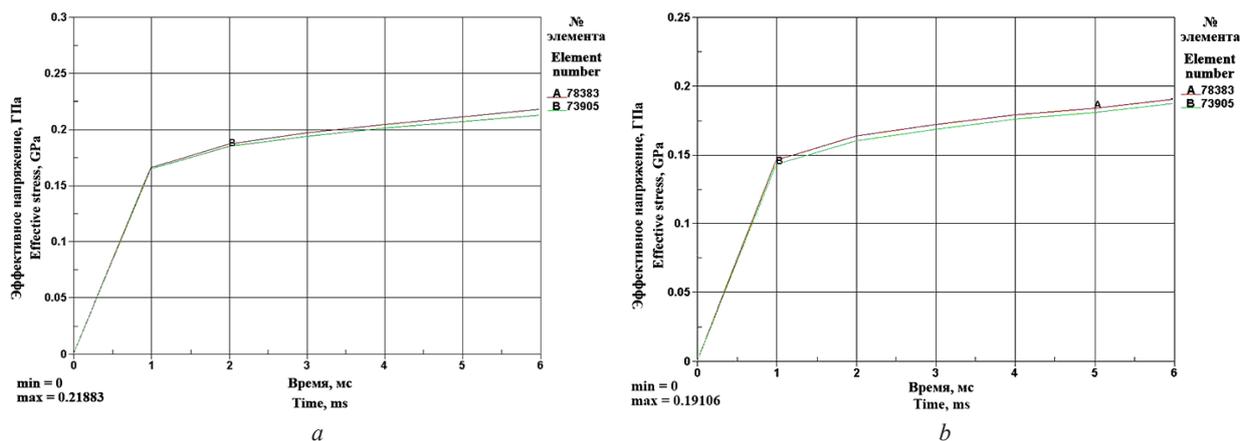


Рис. 4. Зависимость напряжения, возникающего в шлице карданной передачи, от времени в двух произвольных взятых сечениях шлица при толщине полимерного покрытия 100 мкм (а) и 200 мкм (б)

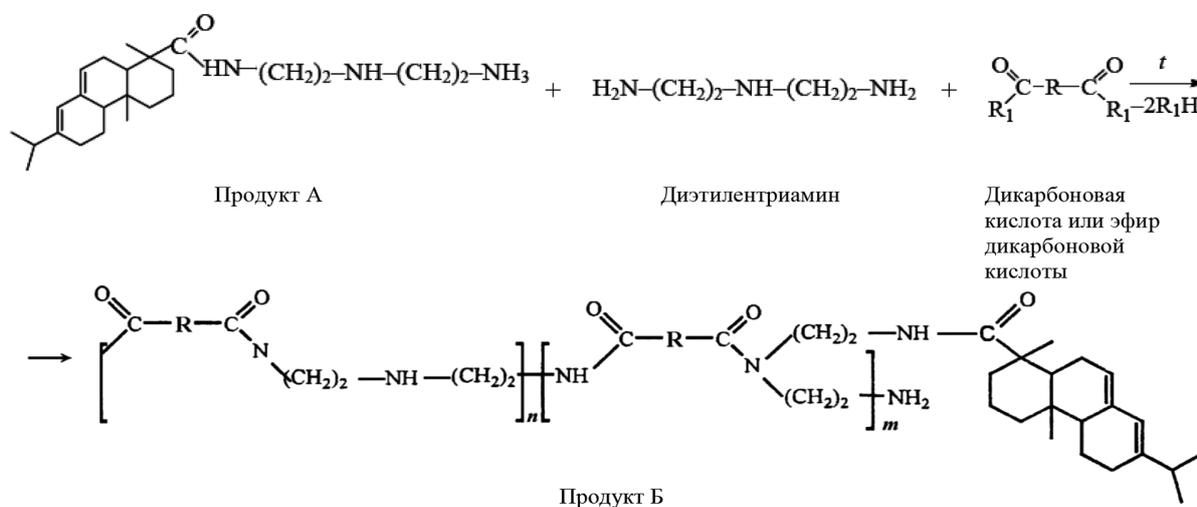
Fig. 4. Dependence of the stress arising in the cardan drive spline on time in two arbitrary sections of the spline with a polymer coating thickness of 100 μm (a) and 200 μm (b)

резко уменьшаются. Применение полимерного покрытия толщиной в 100–200 мкм позволяет существенно снизить значения напряжений в процессе эксплуатации шлицевого соединения. Таким образом, проведенные исследования позволили определить оптимальные геометрические параметры покрытий шлицевых соединений карданных валов.

Вторым направлением исследования стало повышение параметров триботехнических характеристик (коэффициент трения и износостойкость) путем направленного модифицирования полиамидной матрицы дисперсными компонентами целлюлозосодержащих продуктов.

С целью повышения эксплуатационных параметров карданного вала были разработаны составы композиционных материалов для формирования функциональных покрытий и технология его формирования в шлицевом соединении карданных валов грузовых автомобилей и специальной техники¹. В разработанном составе композиционного материала на основе ПА-6 в качестве модификатора использовали высокодисперсные частицы целлюлозы или целлюлозосодержащих продуктов (1–20 мас.%) и полиамидную смолу, которую получают на основе канифоли (1–5 мас.%).

Особенностью используемой полиамидной смолы является хорошая термодинамическая совместимость с полиамидной матрицей, выбранной из групп промышленных полиамидов – полиамида-6, полиамида-6.6, полиамида-11. Схема получения (синтеза) полиамидной смолы на основе аминокислот смоляных кислот канифоли состоит в следующем [11]:



¹ Состав композиционного материала : пат. ВУ 24250 / В. А. Струк, А. С. Антонов, А. Н. Лесун, П. В. Клочко, Д. В. Нахвот, Ю. С. Ковалевский, И. В. Капцевич. Оpubл. 05.04.2024.

Для получения полиамидной смолы используют следующие продукты процесса модифицирования смоляных кислот талловой канифоли диэтилентриамином, осуществляемого при температуре 190–210 °С при мольном соотношении канифоли и диэтилентриамин 1,0 : 1,2. В результате был получен водорастворимый и термически устойчивый до 230 °С продукт. В качестве модификатора использовали аминоксиды смоляных кислот канифоли при соотношении канифоль : дикарбоновая кислота : диэтилтриамин – 1 : (4–12) : (4–12). На первой стадии осуществляли синтез смоляных кислот талловой кислоты с диэтилентриамином, получая монозамещенные аминоксиды смоляных кислот, на второй стадии – синтез полиамидной смолы на основе адипиновой кислоты $R=(-CH_2)_4-R_i=OH$. Для повышения параметров триботехнических характеристик в состав композиционного материала вводили сухие смазки.

Механизм действия модификаторов на полиамидную матрицу заключается в следующем. Частицы микроцеллюлозы и целлюлозосодержащих продуктов под действием технологических факторов процесса литья под давлением (температуры вязко-текучего состояния полиамидной матрицы и термомеханического воздействия шнека) испытывают характерные трансформации, обусловленные процессами термоокислительной деструкции и механодеструкции.

Данные процессы приводят к активации целлюлозосодержащих частиц, которая проявляется в образовании активных функциональных групп ($-OH=CO$; $-COOH-$) и радикальных продуктов. Вследствие этого целлюлозосодержащие частицы существенно изменяют свои энергетические характеристики, что согласуется с концептом энергетического и технологического соответствия компонентов, предложенным нами в ряде публикаций [12, 13].

На параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик композитов существенное влияние оказывает распределение частиц модификатора по матричному полимеру. Для обеспечения равномерного распределения частиц целлюлозосодержащих компонентов в матричном полиамиде использовали полиамидную смолу на основе аминоксидов смоляных кислот канифоли. Данная смола водорастворима и обладает способностью равномерно распределяться в матричном полимере. При этом она проникает в результате диффузии в структуру базового полиамида, преимущественно в микродефекты надмолекулярного строения, изменяя их неблагоприятное действие на процессы разрушения полиамидной матрицы.

При обработке гранул (порошка) базового матричного полиамида раствором полиамидной смолы формируются благоприятные условия для закрепления целлюлозосодержащих частиц на поверхности частиц полиамида. Таким образом, слой полиамида на основе аминоксидов смоляных кислот канифоли выполняет функцию модификатора матричного полиамида и способствует распределению целлюлозосодержащих частиц в объеме матричного связующего. Полиамидная смола на основе аминоксидов смоляных кислот канифоли обладает выраженным гидрофобным действием, что благоприятно сказывается на параметрах служебных характеристик композитов на основе промышленных полиамидов.

Таким образом, совместное введение в состав базового промышленного полиамида полиамидной смолы на основе аминоксидов смоляных кислот канифоли и целлюлозосодержащих продуктов позволяет достичь синергического эффекта повышения показателей деформационно-прочностных и триботехнических характеристик композиционных материалов на основе полиамидов.

В ходе исследования для изготовления композиционных материалов на основе промышленных полиамидов применяли гранулированные продукты, производимые на филиале «Завод Химволокно» ОАО «ГродноАзот», ПА-6 и ПА-6.6. В качестве полиамидной смолы использовали водный раствор продукта, выпускаемого по ТУ ВУ 1526670.005–2018, который имеет следующие характеристики: массовая доля сухого вещества – до 10–12 %, динамическая вязкость при 25 °С не менее 10 сР, водородный показатель рН 8,0–11,5, кислотное число абсолютно сухого вещества > 40 мг КОН/г. Для модифицирования полиамидных матриц применяли микроцеллюлозу, карбоксилметилцеллюлозу, диэтиламинцеллюлозу, ацетилцеллюлозу, а также продукт, полученный на основе натуральной древесины, – древесный лигноцеллюлозный наполнитель, содержащий лигнин и целлюлозу.

Дисперсность частиц целлюлозосодержащих продуктов составляла 1–100 мкм. Для приготовления композиционного материала использовали порошкообразные продукты, полученные

криогенным измельчением гранулированных полуфабрикатов промышленно выпускаемых полиамидов (ПА-6, ПА-6.6), которые обрабатывали соответствующим количеством водного раствора полиамидной смолы.

Разработанный композиционный материал на основе ПА-6 обладает повышенными параметрами эксплуатационных характеристик (таблица).

Параметры характеристик композиционных материалов на основе полиамидов
Parameters of characteristics of composite materials based on polyamides

Характеристика	Параметр для композиционного материала		
	I*	II**	III***
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа исходное	76	73	75
	49	47	49
после 1 000 ч термоокисления на воздухе при температуре 25 °С			
Адгезионная прочность, Н/см, не менее	32	30	33
Коэффициент трения при 5 МПа	0,10	0,09	0,10
	0,10	0,08	0,10
при 10 МПа			
Интенсивность изнашивания, $I \times 10^{-7}$ мм ³ /(Н · м) при 5 МПа	0,6	0,5	0,6
	0,7	0,5	0,7
при 10 МПа			

Примечание: * – состав I содержит 5 мас.% микроцеллюлозы; ** – состав II содержит 10 мас.% микроцеллюлозы; *** – состав III содержит 5 мас.% ацетилцеллюлозы. Во всех составах содержится сухая смазка – коллоидный графит в количестве 2,5–3,0 мас.%.

Note: * – composition I contains 5 wt.% microcellulose; ** – composition II contains 10 wt.% microcellulose; *** – composition III contains 5 wt.% acetylcellulose. All formulations contain a dry lubricant – colloidal graphite in an amount of 2.5–3.0 wt.%.

Сравнительный анализ триботехнических и адгезионных характеристик полимерных покрытий проводили для композитов на основе ПА-6 и ПА-11 (Rilsan®), который характеризуется следующими параметрами: коэффициент трения $f = 0,12$ (без подвода смазочного материала), интенсивность изнашивания $I = 0,8 \cdot 10^{-7}$ мм³/(Н · м) и прочность адгезионного соединения 0,31 Н/см.

Результаты сравнительного анализа триботехнических и адгезионных характеристик, представленные в таблице, свидетельствуют о достижении значимого технического эффекта повышения триботехнических характеристик при модифицировании полиамидных матриц целлюлозосодержащими модификаторами.

Для повышения адгезионных характеристик покрытий из композиционных материалов на основе полиамида-6 разработан состав адгезионного слоя, наносимого на поверхность металлической детали (специальный подслоя). Его формировали из композиционного материала на основе полиамидной смолы, полученной на основе канифоли¹. В состав водного раствора вводили наноразмерные частицы коллоидного графита ультрадисперсных алмазов (УДА, УДАГ), целлюлозосодержащих продуктов (микроцеллюлозы, этилцеллюлозы, карбоксилцеллюлозы и др.) в количестве 0,01–0,10 мас.%. Полученный состав наносили на подготовленную поверхность металлического субстрата, очищенную от загрязнений и различных органических и неорганических соединений, с применением, например, обработки гибкими металлическими элементами металлической фрезы. После этого адгезионный слой подсушивали на воздухе для удаления растворителя (воды) при температуре 30–80 °С в течение 10–20 мин. Затем металлическую подложку с нанесенным адгезионным слоем подвергали термоактивационной обработке при температуре 280–320 °С в течение 10–15 мин и извлекали для нанесения покрытия методом псевдооживленного слоя, используя порошкообразную субстанцию композита на основе ПА-6. Применение адгезионного слоя на основе канифоли позволило на 10–15 % увеличить адгезионную прочность покрытия, снизить интенсивность изнашивания при эксплуатации без подвода внешней смазки.

¹ Состав адгезионного слоя : заявка ВУ 20220237 / В. А. Струк, А. С. Антонов, Г. А. Костюкович, А. Н. Лесун, П. В. Клочко, Д. В. Нахват. Опубл. 13.01.2023.

Апробирование разработанных подходов к оптимизации состава и геометрических параметров функционального покрытия на основе алифатических полиамидов промышленного производства осуществляли на лабораторно-технологической базе ОАО «Белкард», производящем широкий ассортимент карданных валов для автотракторной, железнодорожной и специальной техники. Результаты проведенных испытаний позволили принять решение об использовании импортозамещающих материалов на основе полиамидных композитов в конструкциях карданных валов.

Заключение. На основе результатов численного моделирования установлена связь между толщиной функционального покрытия и уровнем контактных напряжений в шлицевом соединении карданных передач. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов карданных передач в CAE-системах Pro/ENGINEER Mechanica и LS-DYNA позволил установить оптимальную толщину функционального покрытия в шлицевом соединении, равную 200 мкм и обеспечивающую минимальный уровень контактных напряжений и снижение потерь на преодоление сил трения при бросках мощности. Разработаны оптимизированные составы и технология формирования покрытия из композиционного материала на рабочих поверхностях шлицевого соединения карданного вала на основе промышленно выпускаемых в Республике Беларусь полиамидов (ПА-6, ПА-6.6), которые по параметрам адгезионной прочности не уступают зарубежным аналогам (покрытиям дорогостоящего полиамида-11 (Rilsan®)), а по параметрам износостойкости превосходят их в 1,2–1,6 раза при более низкой себестоимости.

Результаты исследований вносят существенный вклад в расширение марочного ассортимента композиционных материалов на основе промышленных термопластов отечественного производства и представляют практический интерес для технологического обеспечения формирования функциональных полимерных покрытий на металлических субстратах и разработки конкурентоспособных наукоемких изделий нового поколения для машиностроения, в том числе для автотракторной и специальной техники.

Список использованных источников

1. Проектирование универсальных шарниров и ведущих валов / А. Х. Беркер, И. Р. Вагнер, Н. В. Вебстер [и др.]; пер. с англ. Ю. В. Попова. – Л.: Машиностроение, 1984. – 463 с.
2. Sehher-Thoss, H. C. Universal Joints and Driveshafts: Analysis, Design, Applications / H. C. Sehher-Thoss, F. Schmelz, E. Aucktor; transl. by J. A. Tipper, S. J. Hill. – Springer, 2006. – 373 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-30170-4>
3. Кравченко, В. И. Структура и технология композиционных материалов для конструкций карданных передач серии «Белкард-2000»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Кравченко Виктор Иванович; Полоцк. гос. ун-т. – Новополоцк, 2001. – 22 с.
4. Костюкович, Г. А. Композиционные материалы для универсальных шарниров нагруженных карданных передач автотракторной и сельскохозяйственной техники: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Костюкович Геннадий Александрович; Физ.-техн. ин-т Нац. акад. наук Беларуси. – Минск, 2003. – 25 с.
5. Кравченко, В. И. Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк; под ред. В. А. Струка. – Минск: Тэхналогія, 2006. – 410 с.
6. Кунву Ли. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / Кунву Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
7. Большаков, В. П. Твердотельное моделирование деталей в CAD-системах: AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo / В. П. Большаков, А. Л. Бочков, Ю. Т. Лячек. – СПб.: Питер, 2015. – 480 с.
8. Rilsan® PA11 Fine Powders Application Process // Arkema Global. – URL: <https://hpp.arkema.com/en/product-families/rilsan-pa11/rilsan-fine-powders-application-process/> (date of access: 24.05.2025).
9. Триботехнические покрытия для узлов трения различных агрегатов / В. Я. Щерба, А. С. Антонов, В. А. Струк [и др.] // Горная механика. – 2008. – № 2. – С. 31–40.
10. Структура и технология триботехнических покрытий на деталях трения металлополимерных систем / В. А. Струк, Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт [и др.] // Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя 6, Тэхніка. – 2011. – № 1. – С. 62–68.
11. Флейшер, В. Л. Модифицированная канифоль: получение, свойства и применение / В. Л. Флейшер, Н. В. Черная. – Минск: БГТУ, 2019. – 305 с.
12. Methods for implementing the concept of energy and technological compliance of components in the technology of highly filled composites / S. Avdeychik, A. Antonov, A. Lesun [et al.] // Machines. Technologies. Materials. – 2022. – Vol. 16, Iss. 2. – P. 62–65.
13. Implementation of the concept of energy and technological compliance of components in the technology of fluorocomposites / S. Avdeychik, A. Antonov, A. Lesun [et al.] // Journal of Materials Science and Engineering A. – 2022. – Vol. 12, Iss. 1–3. – P. 28–39. <https://doi.org/10.17265/2161-6213/2022.1-3.004>

References

1. Berker A. Kh., Vagner I. R., Vebster N. V., Dodzh D. Kh., Zhimanskii L. V., Zeigler S. M., Kuni S. I., Miller V. F., Neidzhel F. S. *Universal Joint and Driveshaft Design Manual*. Society of Automotive Engineers, 1979. 440 p. (Advances in Engineering Series ; Iss. 7).
2. Seherr-Thoss H. C., Schmelz F., Aucktor E. *Universal Joints and Driveshafts: Analysis, Design, Applications*. Springer, 2006. 373 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-30170-4>
3. Kravchenko V. I. *Structure and Technology of Composite Materials for Designs of Cardan Gears of Belkard-2000 Series* [dissertation abstract]. Novopolotsk, 2001. 22 p. (in Russian).
4. Kostyukovich G. A. *Composite Materials for Universal Joints of Loaded Cardan Gears of Automotive Tractor and Agricultural Machinery* [dissertation abstract]. Minsk, 2003. 25 p. (in Russian).
5. Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Struk V. A. *Cardan Gears: Construction, Materials, Application*. Minsk, Tehnologiya Publ., 2006. 410 p. (in Russian).
6. Kunwoo Lee. *Principles of CAD/CAM/CAE*. Pearson, 1999. 608 p.
7. Bol'shakov V. P., Bochkov A. L., Lyachek Yu. T. *Solid Modeling of Parts in CAD Systems: AutoCAD, KOMIAC-3D, SolidWorks, Inventor, Creo*. St. Petersburg, Piter Publ., 2015. 480 p. (in Russian).
8. Rilsan® PA11 Fine Powders Application Process. *Arkema Global*. Available at: <https://hpp.arkema.com/en/product-families/rilsan-pa11/rilsan-fine-powders-application-process/> (accessed 24 May 2025).
9. Shcherba V. Ya., Antonov A. S., Struk V. A., Ovchinnikov E. V., Gusev S. V., Ovsyanko V. A. Tribological coatings for friction units of various aggregates. *Gornaya mekhanika* [Mining Mechanical Engineering], 2008, no. 2, pp. 31–40 (in Russian).
10. Struk V. A., Ovchinnikov E. V., Eysymont E. I., Prushak D. A., Antonov A. S., Kravchenko V. I. Structure and technology of tribological coatings on friction elements of metal-polymer systems. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*, 2011, no. 1, pp. 62–68 (in Russian).
11. Fleisher V. L., Chernaya N. V. *Modified Rosin: Preparation, Properties and Application*. Minsk, Belarusian State Technological University, 2019. 305 p. (in Russian).
12. Avdeychik S., Antonov A., Lesun A., Struk V., Goldade V. Methods for implementing the concept of energy and technological compliance of components in the technology of highly filled composites. *Machines. Technologies. Materials*, 2022, vol. 16, iss. 2, pp. 62–65.
13. Avdeychik S., Antonov A., Lesun A., Struk V., Goldade V. Implementation of the concept of energy and technological compliance of components in the technology of fluorocomposites. *Journal of Materials Science and Engineering A*, 2022, vol. 12, iss. 1–3, pp. 28–39. <https://doi.org/10.17265/2161-6213/2022.1-3.004>