

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-2-33-44

УДК 621.793

А. В. ПОПРУКАЙЛО¹

Г. А. КОСТЮКОВИЧ¹, канд. техн. наук, доц.

Е. В. ОВЧИННИКОВ², д-р техн. наук, доц.

Д. С. КАЛЫНОВ³

¹ОАО «Белкард» (Гродно, Беларусь)

²Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (Гродно, Беларусь)

³ООО «Викон-Авто» (Чкаловск, Россия)

МАТЕРИАЛЫ В ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИАМИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация

Представлен анализ технологий формирования антифрикционного полимерного покрытия на шлицевых втулках карданных передач. Показано, что применение разработанной и внедренной установки для нанесения полимерного покрытия шлицевых втулок в псевдооживленном слое позволяет оптимизировать технологию нанесения покрытия, значительно повысить стабильность и производительность процесса. Проведено исследование физико-механических характеристик покрытий, сформированных из порошков полиамидов ПА11 и ПА6, полученных криогенным измельчением полуфабрикатов, охлажденных до температуры жидкого азота. С помощью оптической и сканирующей микроскопии изучена морфология частиц полиамида. Методом ИК-спектроскопии, оптической и атомно-силовой микроскопии, рентгеноструктурного анализа исследована структура полимерных композиционных материалов. Проведенные исследования показали, что индукционный нагрев шлицевых втулок позволяет обеспечить более высокие адгезионные характеристики полиамидных покрытий.

Ключевые слова:

шлицевое соединение, полимерное покрытие, технология нанесения полимерного покрытия, индукционный нагрев, полиамид-11, полиамид-6, триботехнические характеристики, структурные изменения.

Для цитирования:

Материалы в технологии формирования полиамидных покрытий для тяжелонагруженных узлов трения автотракторной техники / А. В. Попрукайло, Г. А. Костюкович, Е. В. Овчинников, Д. С. Калынов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 2 (91). – С. 33–44.

Введение

В машиностроении в последнее десятилетие наблюдается тренд снижения веса в различных конструкциях, применяемых для изготовления узлов и агрегатов, используемых в том числе при изготовлении компонентов для автотракторной техники [1]. В частности, в легковых автомобилях наблюдается замена стальных изделий на изделия из сплавов алюминия и магния. Этим достигается экономичность эксплуатации изготавливаемых конструкций для механизмов и аппаратов. Однако в усло-

виях постоянного ужесточения требований к износостойкости, антифрикционным свойствам и коррозионной стойкости деталей машин и автомобильных узлов традиционные полимерные покрытия достигают предела своих возможностей.

Полиамиды (ПА6, ПА12, ПА66) обладают высокой адгезией, химической стойкостью и технологичностью нанесения (методы электростатического или псевдооживленного напыления, ротационная технология) [2, 3]. Недостаточная твердость и теплостойкость базовых полимеров ограничивают их

применение в трибологически нагруженных узлах машин и механизмов. Решением проблемы является введение наноразмерных наполнителей (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , углеродные нанотрубки, графен, нитрид бора), что позволяет создавать гибридные композиционные покрытия с уникальным комплексом свойств. Модифицирование полиамидов наночастицами направлено на изменение структуры полимера на молекулярном и надмолекулярном уровне. Наночастицы (размер 10...100 нм) выступают в роли центров кристаллизации, увеличивая степень кристалличности матрицы, либо создают физические сшивки, ограничивающие подвижность макромолекул [4, 5]. Введение от 0,01 мас. %...5 мас. % в объем полимера наночастиц приводит к синергетическому эффекту изменения физико-механических характеристик. Применение наночастиц Al_2O_3 и SiO_2 позволяет повысить микротвердость полимерных композитов по Виккерсу в 1,5–2 раза по сравнению с чистым полиамидом. Это снижает абразивный износ при контакте с частицами грязи и песка (актуально для ходовых частей автомобилей) в процессе эксплуатации транспортного средства. Наноразмерный графен и дисульфид молибдена (MoS_2) при введении в полимер снижают коэффициент трения до 0,08...0,12 в паре трения «металл – композит» за счет формирования разделительной пленки на контртеле. Температура размягчения модифицированного материала увеличивается на 30 °С...50 °С, расширяя рабочий диапазон покрытий до 180 °С...250 °С [7, 8]. Наночастицы глины (монтмориллонит) создают лабиринтный эффект в структуре модифицированного полимера, снижая проницаемость для воды и солевых растворов, повышая коррозионную стойкость кузовных элементов автотранспортных средств.

Проведенные исследования показали перспективность применения покрытий на основе ПА6, модифицированного композицией, состоящей

из 3 мас. % нано-UHMWPE (сверхвысокомолекулярный полиэтилен) и 1 мас. % фуллереновой сажи. Разработанный композит демонстрирует работоспособность без подвода смазочных материалов при нагрузках до 10 МПа, обеспечивая возможность замены бронзы в узлах текстильного и пищевого технологического оборудования. Покрытие, сформированное на основе ПА66 и модифицированное 2 мас. % нано-SiC (карбида кремния), характеризуется повышенной усталостной прочностью, вследствие чего эксплуатационный ресурс возрастает в 4 раза. Изделия из данного композита применяются в тяжело нагруженных редукторах горнорудного оборудования.

Полиамидные покрытия, модифицированные наночастицами, представляют собой эффективное решение для повышения ресурса трущихся пар и антикоррозионной защиты в машиностроении и автомобилестроении. Достигнуты промышленные показатели: снижение износа на 60 %...80 %, увеличение допустимой нагрузки на 30 %, работа в диапазоне температур от минус 60 °С до плюс 250 °С. Для массового внедрения необходимы дальнейшие разработки в области наноразмерных частиц, удешевление наночастиц и создание нормативной базы по методам контроля качества таких покрытий. В ближайшие 5–7 лет ожидается замещение до 15 % гальванических хромовых и никелевых покрытий именно на гибридные нанокompозиты на базе полиамидов [8, 9].

Целью данной работы является исследование физико-механических характеристик полиамидных покрытий, сформированных по разным технологическим подходам из псевдооживленного состояния.

Методика эксперимента. Для приготовления порошковых материалов использовали порошки полиамидов ПА11, ПА6, полученные криогенным измельчением полуфабрикатов, охлажденных до температуры жидкого азота.

Фракционирование порошков осуществляли с помощью набора сит. Для изготовления композиционных материалов для покрытий использовали фракции с размером в поперечнике от $100 \leq d \leq 200$ мкм до 1...15 мкм. Морфологию частиц полиамида исследовали с помощью оптической (ММВ 2200) и растровой микроскопии (Mira Tescan). Размеры полимерных частиц оценивали с помощью атомно-силового микроскопа NT-206. Структуру полимерных композиционных материалов (ПКМ) исследовали методами ИК-спектроскопии (Tensor-27), оптической (Micro200T-01) и атомно-силовой (NT 206) микроскопии, рентгеноструктурного анализа (ДРОН-3.0). Физико-механические характеристики покрытий оценивали по общепринятым методикам. Адгезионную прочность оценивали методом отслаивания под углом 180° . Покрытия наносили по двум технологическим подходам. Первый представляет собой стандартную технологию формирования покрытий, применяемую на ОАО «Белкард» в настоящее время для формирования полиамидных покрытий на шлицевые втулки карданных передач различной номенклатуры. Суть технологии (технология 1) заключается в формировании на поверхности втулки адгезионного подслоя из праймера Rilprim и нагреве партии втулок с праймером в камерной печи до $400^\circ\text{C} \dots 420^\circ\text{C}$ с последующей выдержкой на воздухе до полного оплавления полиамидных компонентов. В ряде случаев для создания адгезионно-активного слоя используется фосфатирование металлической поверхности. Поверхность металлического образца очищали от оксидов и загрязнений путем обработки абразивным порошком и обезжиривали бензином.

Другим технологическим подходом для формирования полиамидных покрытий является нагрев шлицевой втулки с использованием индукционного эффекта с применением оригиналь-

ной конструкции индуктора (необходимо указать режимы для нагрева определенной втулки). Для улучшения формирования полиамидных покрытий на металлических изделиях применяли разработанную конструкцию автоматизированной подачи нагретых втулок в камеру псевдооживленного нанесения (рис. 1).

Установка для нанесения полимерного покрытия в псевдооживленном слое содержит многоместную планшайбу с быстродействующими зажимами и сменными элементами для установки шлицевых втулок, мотор-редуктор привода многоместной планшайбы, рабочую ёмкость и заправочный резервуар с полимерным порошком, подающий пневмоцилиндр, управляющее устройство, коммутационную пневмо- и электросеть. При этом детали, подвергаемые покрытию, на исходных позициях расположены по кругу на сменных элементах и в зону контакта с полимерным порошком поступают автоматически на заданный промежуток времени, а в рабочей ёмкости обеспечен постоянный уровень псевдооживленного полимерного порошка.

Результаты исследований. Анализ сканирующей электронной микроскопии показал, что частицы порошков ПА11 и ПА6 характеризуются нерегулярной угловатой формой с развитой шероховатой поверхностью (рис. 2). На поверхности крупных частиц наблюдаются адгезированные мелкие фрагменты, что свидетельствует о склонности порошков к агломерации. На основании визуальной обработки микрофотографий с учётом масштабных линеек проведена приближённая количественная оценка распределения частиц по размерам. Установлено, что порошки являются полидисперсными и характеризуются широким распределением, близким к логнормальному. Оценочные параметры распределения составляют: $D_{10} \approx 40 \dots 50$ мкм, $D_{50} \approx 75 \dots 85$ мкм, $D_{90} \approx 120 \dots 140$ мкм. Основная массовая доля частиц сосредоточена в диапазо-

не 60...100 мкм, что согласуется с исходными данными. Наряду с этим выявлено присутствие мелкодисперсной фракции (< 40 мкм), преимущественно в виде сателлитных частиц, закреплённых на поверхности более крупных. Сравнительный анализ показал, что частицы

ПА11 имеют несколько более сглаженную морфологию, тогда как для ПА6 характерна более выраженная угловатость и фрагментированность, что может быть связано с различиями в механизме разрушения материала.

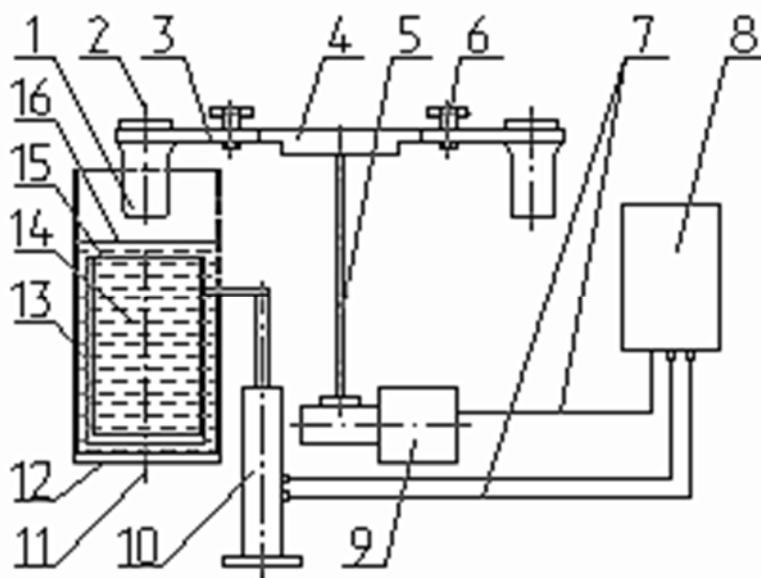


Рис. 1. Схема автоматизированной установки для нанесения антифрикционного полимерного покрытия на шлицевые втулки карданных передач: 1 – шлицевая втулка, подвергаемая полимерному покрытию; 2 – ось шлицевой втулки; 3 – сменный элемент; 4 – многоступенчатая планшайба; 5 – ось; 6 – быстродействующий зажим; 7 – электросеть; 8 – управляющее устройство; 9 – мотор-редуктор; 10 – подающий пневмоцилиндр; 11 – ось рабочей ёмкости; 12 – запорный резервуар; 13 – рабочая ёмкость; 14 – полимерный порошок; 15 – верхняя кромка рабочей ёмкости; 16 – постоянный уровень полимерного порошка

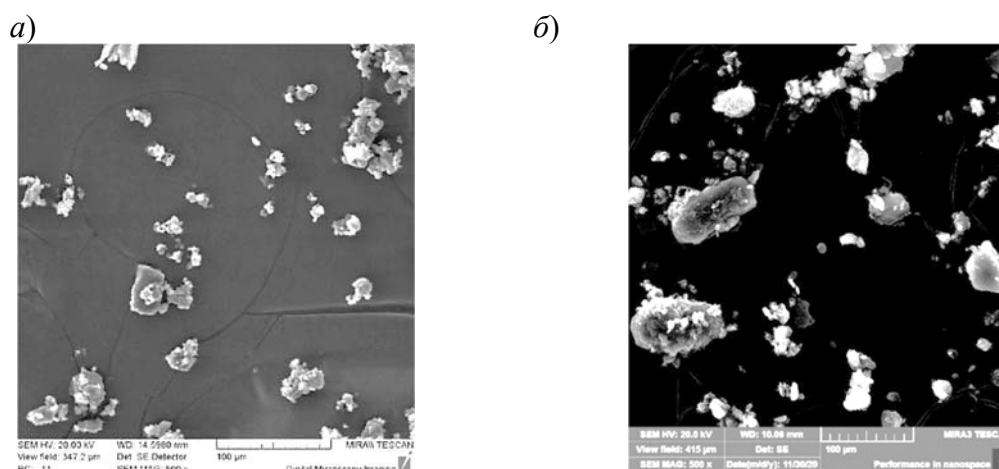


Рис. 2. Морфология частиц ПА11 (а), ПА6 (б). Дисперсность частиц от 60 до 100 мкм

Выявленные морфологические особенности (угловатая форма, наличие сколов, развитая шероховатость поверхности) указывают на то, что порошки получены методом механического или криогенного измельчения. В отличие от порошков, сформированных распылительными методами, для которых характерна сферическая форма частиц, в данном случае наблюдается типичная картина хрупкого разрушения полимерного материала. Более высокая степень фрагментации частиц ПА6 по сравнению с ПА11 может свидетельствовать о большей склонности ПА6 к хрупкому разрушению при измельчении. Установленные характеристики порошков оказывают существенное влияние на формирование и свойства покрытий. Нерегулярная форма частиц и развитая шероховатость поверхности обуславливают пониженную текучесть порошков, что может приводить к ухудшению равномерности формирования слоя покрытия. Дополнительным фактором является наличие мелкодисперсной фракции, усиливающей межчастичные силы сцепления и склонность к агломерации. Полидисперсный состав порошков оказывает двойственное влияние на плотность упаковки. С одной стороны, мелкие частицы способны заполнять межзерновые пустоты, повышая плотность укладки. С другой стороны, наличие агломератов приводит к формированию локальных неоднородностей структуры. При формировании покрытий (в том числе при термическом спекании) развитая поверхность частиц способствует увеличению числа межчастичных контактов и может интенсифицировать процессы агломерации, что будет неоднозначно влиять на монолитизацию слоев полимера при термообработке. Однако различие в размерах частиц приводит к неоднородности теплопереноса и, как следствие, к неравномерности плавления, что повышает вероятность образования дефектов, включая пористость и непровары. Шероховатая поверхность частиц оказывает

положительное влияние на адгезию покрытия за счёт механического зацепления. В то же время структурная неоднородность, обусловленная широким распределением размеров и агломерацией, может приводить к локальной концентрации напряжений и снижению стабильности механических свойств покрытия. Таким образом, порошки ПА11 и ПА6 характеризуются полидисперсным составом, нерегулярной формой частиц и развитой поверхностью (ПА6), что указывает на получение методом механического измельчения.

Указанные особенности оказывают комплексное влияние на свойства покрытий: повышают адгезию, но одновременно ухудшают текучесть и однородность структуры, а также увеличивают вероятность формирования дефектов при переработке.

Исходя из полученных данных, возможно предположить о наличии нескомпенсированного заряда в исследуемых материалах, что и подтверждается методами ЭПР и термостимулированных токов (рис. 3 и 4).

На рис. 5 представлены рентгенограммы покрытий на основе полиамида-11 (ПА11), сформированных на стали 40 при различных способах нагрева подложки: в камерной печи (*a*) и при индукционном нагреве (*б*). Для всех исследуемых образцов наблюдаются характерные дифракционные максимумы в области углов $2\theta \approx 20^\circ \dots 24^\circ$, соответствующие кристаллической структуре ПА11. Профили дифракционных пиков имеют выраженный асимметричный характер и частично перекрываются, что свидетельствует о частично кристаллической структуре материала с наличием аморфной составляющей. Для покрытия, полученного с использованием камерного нагрева (см. рис. 2, *a*), характерны более широкие и сглаженные пики, повышенный уровень фона, менее выраженное разделение максимумов. Это указывает на более низкую степень кри-

талличности, меньшие размеры кристаллитов и более высокую долю аморфной фазы в структуре полимера. В случае индукционного нагрева (рис. 5, б; рис. 6, б) наблюдается повышенная интенсивность и лучшая разрешённость пиков, более чёткое разделение дифракционных максимумов, уменьшение ширины пиков. Такие особенности структуры покрытия свидетельствуют о более высокой степени кристалличности, увеличении размеров кристаллитов и более

высокой упорядоченности структуры покрытия. Выявленные различия обусловлены особенностями теплового воздействия на систему «покрытие – подложка». При камерном нагреве процесс характеризуется относительно медленным и равномерным прогревом, что может приводить к частичному перегреву и последующему замедленному охлаждению. Это способствует формированию менее упорядоченной структуры с повышенной долей аморфной фазы.

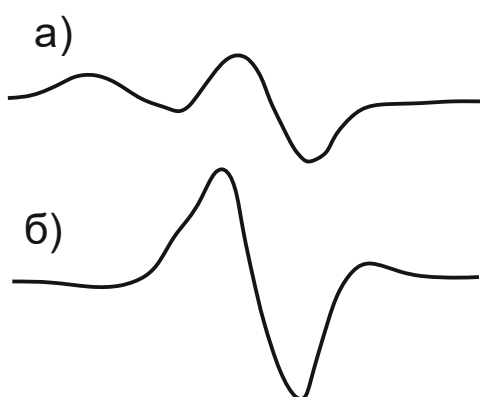


Рис. 3. ЭПР-спектры порошков полимерных материалов: а – характерный вид ЭПР-спектра дисперсных частиц ПА11, полученных по полимеризационной технологии (1, 2, 1', 2'); б – характерный вид ЭПР-спектра дисперсных частиц ПА6, полученных по криогенной технологии

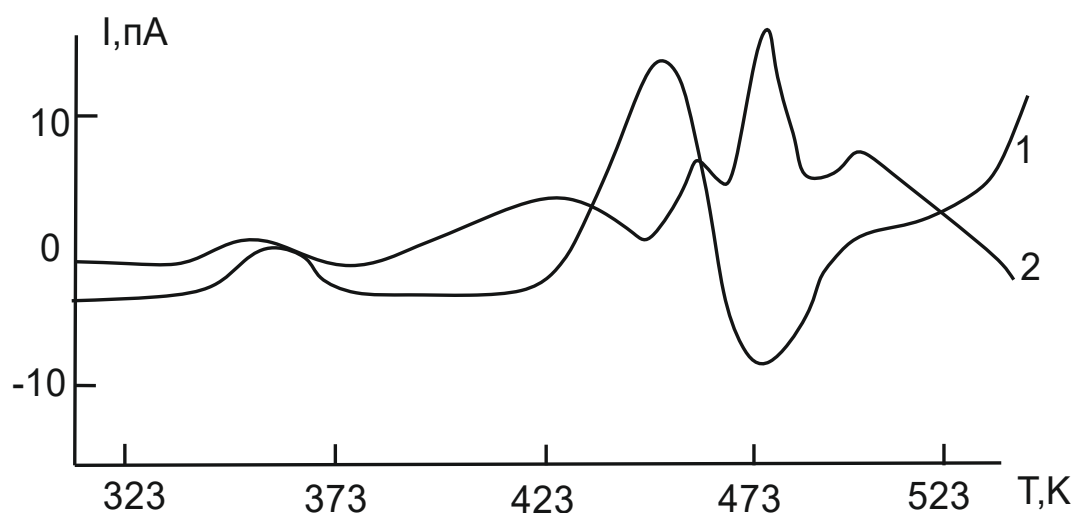


Рис. 4. ТСТ-спектры порошков полимерных материалов: а – характерный вид ТСТ-спектра дисперсных частиц ПА11, полученных по полимеризационной технологии (1, 2, 1', 2'); б – характерный вид ТСТ-спектра дисперсных частиц ПА6, полученных по криогенной технологии

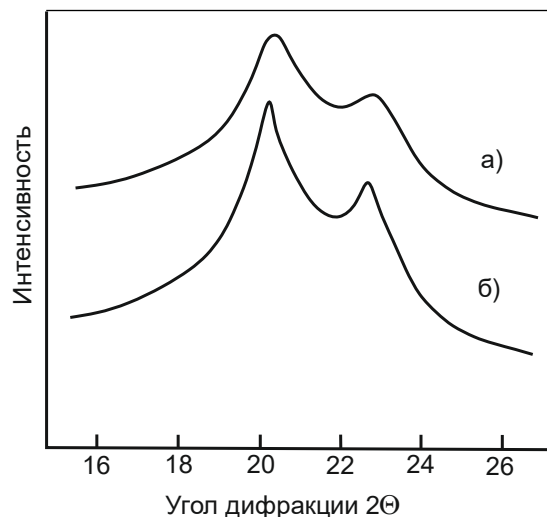


Рис. 5. Рентгенограммы покрытий ПА11, полученных на стали 40 при различных технологических подходах нагрева стального субстрата: *a* – нагрев проводился в камерной печи; *б* – индукционный нагрев

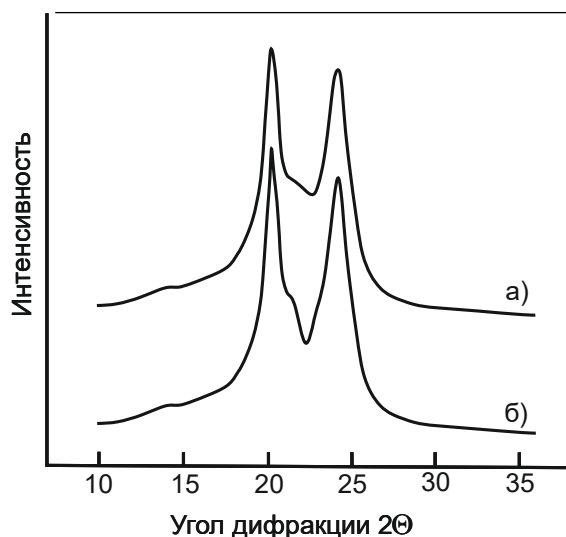


Рис. 6. Рентгенограммы покрытий ПА6, полученных на стали 40 при различных технологических подходах нагрева стального субстрата: *a* – нагрев проводился в камерной печи; *б* – индукционный нагрев

Индукционный нагрев, напротив, обеспечивает быстрый локальный нагрев поверхности подложки с последующим интенсивным охлаждением. Такие условия способствуют формированию более однородной кристаллической структуры и равномерному росту кристаллитов за счёт эффективной перекристаллизации расплава полиамида.

Структурные различия, выявленные методом рентгеноструктурного анализа, определяют эксплуатационные

характеристики покрытий. Повышение кристалличности (индукционный нагрев) приводит к увеличению твёрдости и износостойкости, химической стойкости и снижению ударной вязкости исследуемых покрытий. При получении покрытий по технологии 1 вследствие повышенной аморфности покрытия (камерный нагрев) увеличиваются пластичность и способность к релаксации напряжений, снижаются механическая прочность и износостойкость.

Таким образом, показано, что способ нагрева стального субстрата оказывает существенное влияние на надмолекулярную структуру покрытий ПА11. Индукционный нагрев способствует формированию более кристаллической и структурно упорядоченной фазы, тогда как камерный нагрев приводит к увеличению доли аморфной составляющей. Это необходимо учитывать при выборе технологии формирования покрытий в

зависимости от требуемых эксплуатационных свойств.

Расчёт степени кристалличности покрытий проводили по методике, предложенной в [10], на основании анализа рентгенодифракционных данных. Полученные значения степени кристалличности для покрытий на основе полиамидов ПА6 и ПА11, сформированных при различных технологических режимах, представлены в табл. 1.

Табл. 1. Зависимость степени кристалличности полиамидных покрытий от вида технологии осаждения

Марка полимера, технология формирования	ПА6, вариант 1	ПА6, вариант 2	ПА11, вариант 1	ПА11, вариант 2
Степень кристалличности ϵ , %	1,51	1,63	2,1	2,14

Анализ полученных данных показывает, что степень кристалличности исследуемых покрытий находится на относительно низком уровне и варьируется в узком диапазоне значений. Для покрытий на основе ПА6 увеличение степени кристалличности при переходе от варианта 1 к варианту 2 составляет около 8 %, что может быть связано с изменением условий теплового воздействия при формировании покрытия.

Аналогичная тенденция наблюдается и для покрытий на основе ПА11, где степень кристалличности возрастает с 2,10 % до 2,14 %. Несмотря на незначительную абсолютную разницу, данный результат свидетельствует о более упорядоченной надмолекулярной структуре во втором технологическом варианте.

Сравнение различных марок полиамидов показывает, что покрытия на основе ПА11 характеризуются несколько более высокой степенью кристалличности по сравнению с ПА6. Это может быть обусловлено особенностями химического строения макромолекул и кинетикой кристаллизации.

В целом установлено, что изме-

нение технологии формирования покрытий оказывает влияние на степень кристалличности. Полученные значения указывают на преобладание аморфной составляющей в структуре покрытий, что согласуется с данными рентгеноструктурного анализа. Построение функции радиального распределения атомной плотности (ФРРАП) для исследуемых полимеров [2] позволило установить, что молекулярное упорядочение возрастает в аморфной фазе полимерной матрицы при использовании второго варианта формирования полиамидных покрытий (рис. 7).

Исходя из полученных данных методом рентгеноструктурного анализа, возможно предположить, что в результате использования автоматизированного индукционного нагрева шлицевых втулок изменятся физико-механические характеристики полиамидных покрытий. Одним из основных параметров, определяющих адгезионные характеристики полиамидных покрытий, является адгезионная прочность. Проведенные исследования по определению адгезионных характеристик полиамидных покрытий, сформированных по разным технологическим подходам, показали, что

индукционный нагрев стальных субстратов позволяет обеспечить более высокие адгезионные характеристики по

сравнению с нагревом шлицевых втулок в камерных печах (рис. 8).

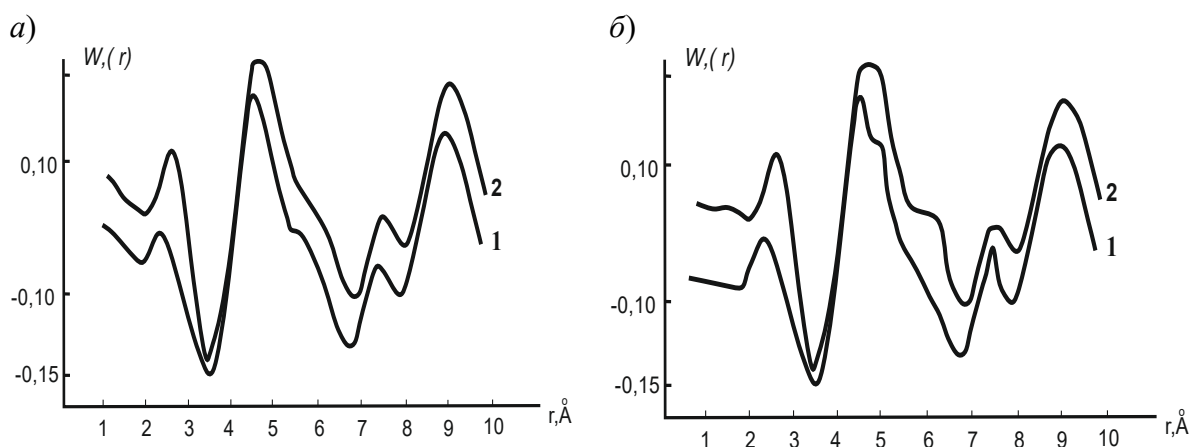


Рис. 7. ФРРАП полиамидных покрытий: а – покрытие на основе ПА6, сформированное по технологии 1 (поз. 1), и покрытие, сформированное по технологии 2 (поз. 2); б – покрытие на основе ПА11, сформированное по технологии 1 (поз. 1), и покрытие, сформированное по технологии 2 (поз. 2)

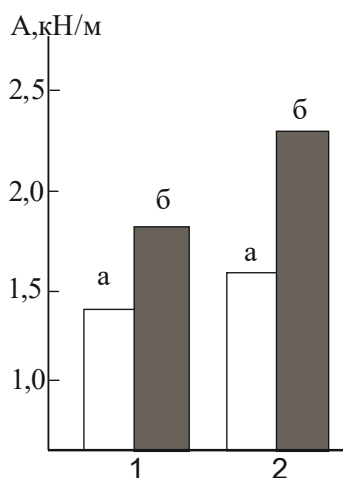


Рис. 8. Адгезионная прочность покрытий на основе ПА6 (а) и ПА11 (б) при различных технологиях формирования покрытий: 1 – вариант 1; 2 – вариант 2

Структурные изменения, наблюдаемые в покрытиях, оказывают существенное влияние на триботехнические характеристики полиамидных покрытий, формируемых по различным технологическим подходам. Увеличение степени кристалличности и молекулярного упорядочения в аморфных фазах полимера приводит к возрастанию твердости покрытий (см. рис. 8) и, как следствие,

к возрастанию стойкости к изнашиванию (рис. 9).

Исходя из данных, представленных на рис. 10, интенсивность изнашивания снижается на 30 %...70 % для варианта 2 нанесения покрытия по сравнению с вариантом 1. Данный эффект характерен для всех марок исследуемых полиамидов в заданном диапазоне нагрузок.

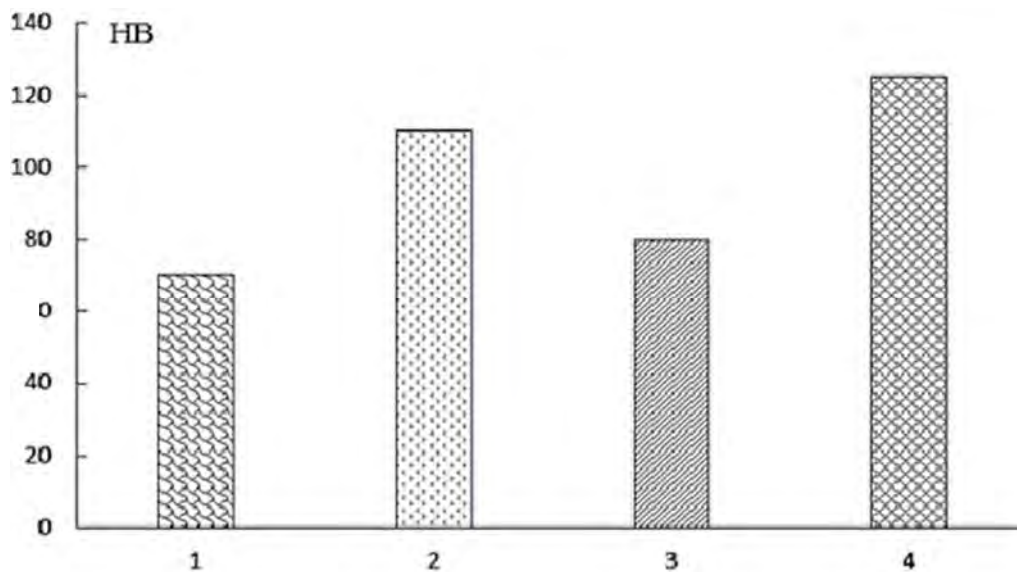


Рис. 9. Зависимость твердости покрытий из ПА11 (поз. 1 и 3) и ПА6 (поз. 2 и 4): 1, 3 – вариант 1 формирования покрытия; 2, 4 – вариант 2 формирования покрытия

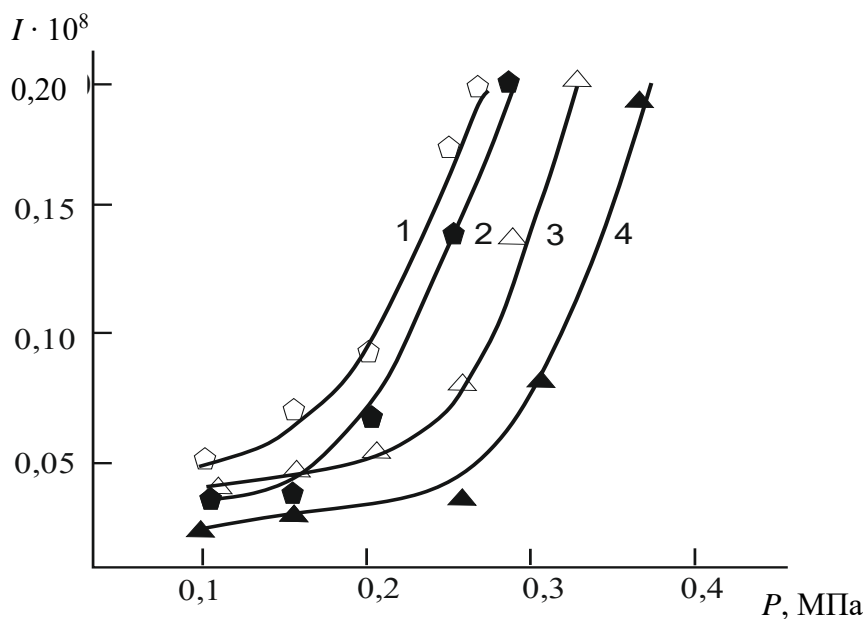


Рис. 10. Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки при трении покрытий из ПА11 (поз. 1 и 3) и ПА6 (поз. 2 и 4) по стали 40: 1, 3 – вариант 1 формирования покрытия; 2, 4 – вариант 2 формирования покрытия. Скорость скольжения 0,6 м/с

Заклучение

Применение индукционного нагрева шлицевых втулок, изготовленных из стали 40, обеспечивает более равномерный и контролируемый разогрев поверхности подложки по сравнению с

традиционным камерным нагревом. Это позволяет более точно задавать и воспроизводить температурные интервалы формирования полиамидных покрытий, что критически важно для управления процессами плавления, растека-

ния и последующей кристаллизации полимерного слоя.

Полученные ранее результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что при индукционном нагреве формируются покрытия с более выраженными и интенсивными дифракционными максимумами, что свидетельствует о повышении степени кристалличности и упорядоченности структуры. Количественная оценка подтверждает данную тенденцию: для полиамида ПА6 степень кристалличности увеличивается с 1,51 % до 1,63 %, а для ПА11 – с 2,10 % до 2,14 % при переходе к более эффективному технологическому режиму. Дополнительно следует учитывать морфологические особенности исходных порошков, характеризующихся полидисперсным составом ($D_{50} \approx 75...85$ мкм) и развитой поверхностью частиц. В условиях индукционного нагрева такие

частицы обеспечивают большее число межчастичных контактов и более эффективное протекание процессов спекания, что в сочетании с контролируемым тепловым циклом способствует формированию более однородной и плотной структуры покрытия.

Повышение степени кристалличности сопровождается увеличением молекулярного упорядочения не только в кристаллической, но и в аморфной фазе полимера, что связано с ограничением подвижности макромолекулярных цепей и их более плотной упаковкой. Это, в свою очередь, приводит к улучшению комплекса эксплуатационных характеристик покрытий: повышаются твердость, износостойкость и сопротивление пластической деформации, а также снижается склонность к образованию дефектов, связанных с неоднородностью структуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кравченко, В. И.** Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк ; под ред. В. А. Струка. – Мн. : Тэхналогія, 2006. – 523 с.
2. Новые материалы и технологии, применяемые при производстве карданных передач / В. И. Кравченко, В. А. Струк, Г. А. Костюкович, Е. В. Овчинников // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2006. – № 4 (13). – С. 91–99.
3. Триботехнические материалы в конструкциях карданных валов / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк, Е. В. Овчинников // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века : сб. тр. – Донецк, 2001. – С. 170–171.
4. **Довгяло, В. А.** Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров / В. А. Довгяло, О. Р. Юркевич. – Мн. : Наука и техника, 1992. – 256 с.
5. **Авдейчик, С. В.** Нанокпозиционные машиностроительные материалы: опыт разработки и перспективы применения / С. В. Авдейчик, Г. А. Костюкович, В. И. Кравченко ; под ред. В. А. Струка. – Гродно : ГрГУ, 2006. – 403 с.
6. **Чвалун, С. Н.** Полимерные наноккомпозиты / С. Н. Чвалун // Природа. – 2001. – № 1. – С. 1–12.
7. **Struk, V. A.** Tribotechnical materials because of thermoplastics, modified by ultra dispersibles clusters of carbon / V. A. Struk, A. A. Skaskevich, V. I. Kravchenko // VII-th International symposium : Tribological problems in exposed friction systems – The High Tatras. – 1999. – P. 149–154.
8. Металлополимерные наноккомпозиты: особенности структуры, технология, применение / А. А. Рыскулов, С. В. Авдейчик, М. В. Ищенко, Е. В. Овчинников ; под ред. В. А. Струка, В. А. Лиопо. – Гродно : ГГАУ, 2010. – 335 с.
9. Нанокпозиционные материалы и технологии, применяемые при производстве карданных передач / В. И. Кравченко, В. А. Струк, Г. А. Костюкович [и др.] // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. – 2012. – № 1 (123). – С. 83–93.
10. Рентгенодифрактометрические исследования структурных особенностей полимерных материалов, модифицированных ультрадисперсными углеродными наполнителями / В. А. Лиопо, Е. В. Овчинников, Л. В. Михайлова, В. А. Струк // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. – 1999. – № 2. – С. 47–53.

Статья сдана в редакцию 17 февраля 2026 г.

Контакты:

ogt@belcard-grodno.by (Попрукайло Александр Витальевич);
gsktb@belcard-grodno.by (Костюкович Геннадий Александрович);
ovchin_1967@mail.ru (Овчинников Евгений Витальевич);
vikon_v@mail.ru (Калынов Денис Сергеевич).

A. V. PAPRUKAILA, G. A. KASTYUKOVICH, E. V. AUCHYNNIKAU, D. S. KALYNOV

MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR FORMING POLYAMIDE COATINGS ON HEAVY-DUTY FRICTION UNITS OF AUTOMOTIVE AND TRACTOR EQUIPMENT

Abstract

The article presents an analysis of technologies for applying antifriction polymer coatings to splined bushings in cardan shafts. It is demonstrated that the use of a developed and implemented fluidized bed polymer coating system for splined bushings optimizes the coating application technology and significantly improves process stability and productivity. A study was conducted on the physical and mechanical properties of coatings formed from PA11 and PA6 polyamide powders obtained by cryogenic grinding of semi-finished products cooled to liquid nitrogen temperatures. The morphology of polyamide particles was studied using optical and scanning microscopy. The structure of polymer composite materials was examined using IR spectroscopy, optical and atomic force microscopy, and X-ray diffraction analysis. The studies demonstrated that inductive heating of splined bushings improves the adhesion properties of polyamide coatings.

Keywords:

splined connection, polymer coating, polymer coating application technology, induction heating, polyamide 11, polyamide 6, tribotechnical characteristics, structural changes.

For citation:

Materials and technologies for forming polyamide coatings on heavy-duty friction units of automotive and tractor equipment / A. V. Paprukaila, G. A. Kastyukovich, E. V. Auchynnikau, D. S. Kalynov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 2 (91). – P. 33–44.