

Отзыв

официального оппонента о диссертационной работе

Башлаковой Анны Леонидовны

«Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена для изделий машиностроительного назначения с оптимальным содержанием модифицированных в плазме углеродных волокон»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – «Материаловедение (машиностроение)»

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите.

Представленные в диссертационной работе и автореферате материалы исследований, а также сформулированные соискателем цель, задачи, объект и предмет исследования и положения, выносимые на защиту, свидетельствуют о соответствии работы отрасли «технические науки» и специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение) и областям исследований: 1 – «Закономерности формирования структуры материалов с заданным комплексом эксплуатационных характеристик в зависимости от их состава, а также при различных воздействиях (механическом, термическом, термомеханическом, радиационном и других)» и 4 – «Разработка физико-химических и физико-механических основ процессов формирования новых материалов с уникальным комплексом свойств».

2. Актуальность темы диссертации.

Актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений и обусловлена рядом факторов. Политетрафторэтилен является уникальным полимером с исключительными антифрикционными и химическими характеристиками. Однако его широкое применение в машиностроении ограничивается низкой несущей способностью, хладотекучестью и ползучестью. Классическим способом решения этой проблемы является наполнение ПТФЭ различными волокнистыми и дисперсными наполнителями, среди которых особое место занимают углеродные волокна. Вместе с тем, существующие подходы, как правило, предполагают введение высоких концентраций наполнителей (15–20 мас. %), что приводит к излишней жесткости, снижению эластичности и удорожанию готовых изделий, делая их менее пригодными для применения в высокоподвижных узлах трения, в которых требуются упругость и герметичность.

В связи с этим, актуальной научно-технической задачей является создание малонаполненных ПТФЭ-композитов, в которых целевое модифицирование поверхности углеродных волокон в низкотемпературной плазме позволяет значительно усилить межфазное взаимодействие и добиться существенного улучшения эксплуатационных характеристик при минимальном содержании дорогостоящего наполнителя. Разработанный в диссертации подход к управлению структурой композита за счет направленного структурирующего эффекта модифицированных волокон вносит вклад в решение проблемы импортозамещения и расширения ассортимента отечественных антифрикционных материалов.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту.

Научную новизну диссертационной работы представляют следующие результаты:

- впервые установлена закономерность влияния углеродных волокон на основе гидратцеллюлозы, модифицированных в плазме тлеющего разряда в среде фторорганических соединений, на структурную организацию ПТФЭ-матрицы, заключающаяся в том, что при содержании наполнителя до 5 мас. % его поверхность функционирует как совокупность активных центров кристаллизации, стимулируя рост степени кристалличности и размера кристаллитов, тогда как при увеличении концентрации до 10 мас. % возникают стерические ограничения, приводящие к образованию паракристаллической фазы с нарушенной регулярностью;
- экспериментально обоснован структурирующий эффект модифицированных углеродных волокон, состоящий в повышении степени кристалличности матрицы на 10–15 % при содержании наполнителя до 5 мас. % и последующем ее снижении на 12 % при увеличении концентрации до 10 мас. %, что позволило оптимизировать содержание наполнителя как фактора упорядоченности матрицы и установить концентрационные интервалы его преимущественного влияния на структурообразование;
- установлен характер анизотропии физико-механических характеристик композитов на основе ПТФЭ и модифицированных углеродных волокон, проявляющийся в том, что при содержании наполнителя 5–7 мас. % нивелируется анизотропия модуля упругости при сжатии, который перестает зависеть от направления прессования композитной заготовки, что имеет важное технологическое значение для обеспечения изотропности характеристик готовых изделий;
- выявлен концентрационный порог (около 5 мас. %) для ряда эксплуатационных характеристик, включая коэффициент теплопроводности, диэлектрическую проницаемость и интенсивность изнашивания, что обусловлено формированием перколяционных структур из углеродных волокон, выступающих в качестве проводников тепловой и электрической энергии, и позволяет обосновать минимальную концентрацию модифицированных углеродных волокон в композите;
- установлено, что образцы, содержащие 7 мас. % модифицированных углеродных волокон, демонстрируют увеличение скорости релаксации напряжений только на начальном участке релаксационной кривой, в то время как при содержании 10 мас. % этот эффект распространяется на весь временной интервал, что позволяет оценивать вязкоупругие характеристики композитов и прогнозировать их поведение в условиях длительного нагружения.

Следует отметить, что главной особенностью диссертационной работы, имеющей признаки научной новизны, является то, что при разработке мало-наполненных композитов на основе ПТФЭ соискателем научно обоснован и практически реализован комплексный материаловедческий подход, заключающийся в целевом плазмохимическом модифицировании поверхности углеродных волокон с формированием фторполимерного покрытия, что обеспечивает комбинированный структурирующий эффект на различных уровнях

структурной организации матрицы, причем уровень этого эффекта определяется концентрацией наполнителя и, соответственно, интенсивностью межфазных взаимодействий компонентов в композите, а сам этот эффект выражается в значимом улучшении триботехнических и деформационно-прочностных характеристик полимерной матрицы.

Выносимые на защиту положения диссертации в целом соответствуют последовательности поставленных и решенных материаловедческих задач. В них содержится достаточно исчерпывающее обоснование основных закономерностей, обнаруженных в характере изменения характеристик композитов в зависимости от типа, концентрации и способа модифицирования введенных углеродных волокон.

В рамках первого положения соискателем впервые проведено систематическое сравнительное исследование влияния типа прекурсора углеродных волокон (гидратцеллюлоза (ГЦ) и полиакрилонитрил (ПАН)) на комплекс физико-механических и триботехнических характеристик ПТФЭ-композитов. Установлено, что несмотря на более высокие прочностные характеристики ПАН-волокон, композиты с ГЦ-волокнами демонстрируют существенно лучшие триботехнические характеристики. Соискателем показано, что определяющим фактором является не столько прочность волокна, сколько его адгезионное взаимодействие с матрицей, обусловленное морфологией поверхности. Ключевым результатом является установление того, что ПАН-волокна, обладая повышенной жесткостью, оказывают абразивное действие на поверхность контртела и разрушают формирующуюся пленку переноса ПТФЭ, которая в трибологии антифрикционных материалов выполняет роль твердой смазки. Этот вывод является принципиально новым и имеет важное практическое значение для обоснованного выбора наполнителя. Вместе с тем, ГЦ-волокна благодаря своей более развитой и морфологически активной поверхности обеспечивают формирование стабильной пленки переноса и оптимальный режим фрикционного взаимодействия. Данный вывод является принципиально новым и имеет важное практическое значение для обоснованного выбора типа наполнителя. Следует отметить, что положение является хорошо обоснованным экспериментально (подтверждено микрофотографиями поверхностей трения (рисунки 3.5 и 3.6 диссертации), а также триботехническими испытаниями).

Второе положение представляет собой экспериментальное обоснование структурирующего эффекта углеродных волокон из гидратцеллюлозы, модифицированных в низкотемпературной плазме тлеющего разряда в среде фторорганических соединений, состоящего в повышении степени кристалличности матрицы ПТФЭ на 10–15 % при содержании УВ до 5 мас. % за счет стимулирования кристалличности активными центрами на поверхности волокон, что позволило оптимизировать содержание наполнителя как фактора упорядоченности матрицы. При содержании УВ от 5 до 10 мас. % степень кристалличности снижается на 12 % по сравнению с максимальным значением, что объясняется влиянием стерических ограничений и увеличением количества кристаллитов с нарушенной регулярностью. В этом положении соискателем впервые выявлен немонотонный характер изменения структурных параметров ПТФЭ-матрицы при введении плазмохимически модифициро-

ванных волокон. Важнейшим результатом является установление расхождения между данными РСА и ДСК, которое соискателем интерпретировано как формирование паракристаллической фазы с нарушенной регулярностью. Новизна состоит в том, что соискатель не просто констатирует изменение степени кристалличности, а предлагает физический механизм, объясняющий это изменение через конкуренцию двух процессов: зародышеобразования на поверхности волокон (при малых концентрациях) и стерических ограничений роста кристаллитов (при высоких концентрациях).

Третье положение, описывающее экспериментальное обоснование изменения показателей коэффициента теплопроводности (увеличение в 1,6 раз), диэлектрической проницаемости (увеличение в 3,7 раза) и интенсивности изнашивания (в 54 раза ниже), состоящее в возникновении точки перегиба при концентрации 5 мас. % УВ в результате образования цепей из УВ, которые становятся проводниками тепловой и электрической энергии, вносит существенный вклад в развитие физики полимерных композитов. Соискателем впервые установлена корреляция между теплофизическими, диэлектрическими и триботехническими характеристиками малонаполненных ПТФЭ-композитов с плазмохимически модифицированными УВ, причем эта корреляция имеет одинаковую точку перегиба (5 мас. %). Новизна заключается в интерпретации этого факта с позиций теории перколяции – образования пространственной сетки из волокон, являющихся проводниками тепла и электричества. Соискатель убедительно показывает, что при содержании наполнителя менее 5 мас. % отдельные волокна изолированы друг от друга, а при превышении этого порога формируются проводящие «мостики». Установление точки перегиба при концентрации 5 мас. % на зависимостях теплофизических, диэлектрических и триботехнических характеристик позволило идентифицировать нижний концентрационный предел содержания модифицированных УВ в композите, превышение которого обеспечивает формирование перколяционной сетки и достижение комплекса улучшенных эксплуатационных характеристик.

В четвертом положении, выносимым на защиту, соискателем разработаны конкретные составы композиционных материалов с улучшенными характеристиками – сочетанием повышенной износостойкости (снижение интенсивности изнашивания в 54 раза) и достаточной эластичности, что принципиально отличает их от высоконаполненных жестких композитов типа «Флувис». Новизна состоит в том, что соискатель не просто констатирует улучшение характеристик, а устанавливает интервал концентраций УВ (5–7 мас. %), в котором одновременно достигаются: высокий PV-фактор (4,12–4,49 МПа·м/с), низкая интенсивность изнашивания, оптимальная скорость релаксации напряжений (быстрая релаксация на начальном участке и медленная – на длительном), а также исчезновение анизотропии модуля упругости. Это комплексное решение является новым и имеет несомненную практическую ценность. Положение подкреплено разработкой технических условий (ТУ ВУ 400084698.324-2023) и патента на полезную модель уплотнительной манжеты.

Пятое положение, выносимое на защиту, представляет собой оригинальное методическое решение, защищенное патентом на изобретение. Новизна способа анализа компонентов композитов на основе ПТФЭ заключается в том, что он позволяет проводить качественный и количественный анализ наполнителя без его механического извлечения из матрицы, что особенно актуально для труднорастворимых и химически стойких полимеров, каким является ПТФЭ. Впервые предложено использовать лазерную абляцию для селективного удаления полимерной матрицы с сохранением формы и размеров частиц наполнителя (волокон), что позволяет с высокой точностью определять их геометрические характеристики с помощью РЭМ. Новизна подтверждена патентом ВУ 22964. Практическая значимость способа состоит в возможности экспресс-анализа готовых изделий и контроля качества исходного сырья.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Представленные в диссертационной работе выводы и практические рекомендации являются обоснованными и достоверными, что подтверждается:

- корректным выбором и использованием комплекса современных взаимодополняющих методов исследования: рентгеноструктурный анализ (РСА), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), динамический механический анализ (ДМА), растровая электронная микроскопия (РЭМ) с энергодисперсионным анализом, дилатометрия, метод лазерной вспышки для определения теплопроводности, а также стандартизованные методы определения физико-механических и триботехнических характеристик;

- тщательной статистической обработкой экспериментальных данных: все результаты получены на репрезентативных выборках с использованием методов математической статистики (расчет доверительных интервалов по критерию Стьюдента при доверительной вероятности 0,95), что гарантирует их воспроизводимость и достоверность;

- непротиворечивостью полученных результатов: зависимости, например, степени кристалличности от содержания УВ, установленные методами РСА и ДСК, различаются, но получают убедительное научное объяснение с позиций формирования паракристаллической фазы, что свидетельствует о глубоком понимании соискателем физико-химической сущности процессов;

- апробацией работы на представительных международных и республиканских конференциях и публикацией в ведущих рецензируемых научных журналах: основные результаты опубликованы в 8 статьях в изданиях, соответствующих п. 19 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь», а также защищены патентами на изобретение и полезную модель;

- положительными результатами практической апробации: разработанный материал прошел испытания и внедрен на предприятиях РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» и ООО «Белань Плюс», что подтверждено соответствующими актами и рекомендациями, которые являются объективным свидетельством практической ценности работы.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.

Научная значимость работы заключается в установлении фундаментальных закономерностей влияния плазмохимически модифицированных углеродных волокон на надмолекулярную структуру и комплекс физико-механических характеристик ПТФЭ. Полученные данные вносят вклад в развитие теории структурообразования в полимерных композитах, армированных волокнистыми наполнителями. Предложенные модели и объяснения могут служить основой для прогнозирования свойств новых материалов данного класса.

Практическая значимость работы подтверждена разработкой нового композиционного материала «Эластофлувис» (ТУ ВУ 400084698.324-2023), который характеризуется уникальным сочетанием эластичности и износостойкости. Модуль упругости разработанного композита (600 МПа) и PV-фактор (в 3,5 раза выше, чем у ненаполненного ПТФЭ) делают его идеальным для использования в подвижных уплотнениях (шаровые краны, амортизаторы, промывочные барабаны). Разработанный материал успешно прошел промышленные испытания.

Экономическая значимость связана с импортозамещением и снижением стоимости продукции, что достигается за счет уменьшения содержания дорогостоящего углеродного волокна с 15–20 мас. % до 5–7 мас. % без потери, а в ряде случаев – с улучшением ключевых эксплуатационных характеристик. Рекомендуемое использование материала в узлах трения позволит увеличить срок службы оборудования и снизить затраты на его ремонт и обслуживание.

Социальная значимость диссертации заключается в обеспечении отечественного машиностроения и смежных отраслей (химической, нефтегазовой) высококачественными, безопасными и доступными материалами, что способствует укреплению технологической независимости Республики Беларусь.

Разработанный материал рекомендуется к широкому применению на предприятиях машиностроительной и химической промышленности. Кроме того, методика лазерного анализа состава ПТФЭ-композитов может быть использована в лабораториях контроля качества для проведения входного контроля и идентификации материалов зарубежного производства. Полученные результаты целесообразно также внедрить в учебный процесс при подготовке инженерных кадров по специальностям, связанным с полимерными композиционными материалами.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

Основные научные и прикладные результаты диссертационного исследования Башлаковой А. Л. представлены в научной печати с достаточной полнотой и в объеме, отражающем ключевые этапы и итоговые выводы работы. По материалам диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе, 8 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень, установленный пунктом 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь; 1 статья в сборнике материалов международной конференции; 6 тезисов докладов, представленных на профильных международных и республиканских научно-технических конфе-

ренциях; 2 охранных документа – патент Республики Беларусь на изобретение и патент на полезную модель, подтверждающие новизну и практическую реализуемость предложенных технических решений. Уровень и характер публикационной активности Башлаковой А.Л. полностью соответствуют установленным требованиям ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и свидетельствуют о широкой апробации полученных результатов в научном сообществе.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Оформление диссертации и автореферата в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Беларуси. Структура работы логична и включает все необходимые элементы (общая характеристика работы, введение, аналитический обзор, экспериментальная часть, главы с результатами и их обсуждением, заключение, список литературы и приложения). Язык изложения научно-технический и достаточно четкий. Иллюстративный материал (рисунки, графики, таблицы) информативен и нагляден.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Научная квалификация Башлаковой Анны Леонидовны полностью соответствует требованиям ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к соискателям ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение). Данное заключение базируется на комплексной оценке личного вклада соискателя в решение поставленных научно-технических задач, включая:

- обоснование выбора объектов и методов исследования, планирование и проведение многофакторных экспериментальных исследований, связанных с получением и изучением характеристик композиционных материалов на основе политетрафторэтилена;

- проведение структурных исследований с применением современных физико-химических методов (рентгеноструктурный анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, динамический механический анализ, растворяющая электронная микроскопия), а также интерпретацию полученных данных с позиций физико-химии полимеров и материаловедения;

- системный анализ экспериментальных результатов, установление корреляционных зависимостей между технологическими параметрами, структурными и эксплуатационными характеристиками разработанных композитов;

- подготовку и оформление научных публикаций в ведущих рецензируемых журналах, соответствующих установленным требованиям, а также представление результатов исследований на международных и республиканских конференциях;

- разработку и патентование новых технических решений, включая способ анализа состава композитов и конструкцию уплотнительного элемента;

- оформление диссертационной работы и автореферата в строгом соответствии с требованиями инструкции ВАК Республики Беларусь.

Следует особо отметить, что соискатель проявил способность не только к проведению самостоятельных экспериментальных исследований, но и к

глубокой теоретической интерпретации полученных данных, что нашло отражение в сформулированных научных положениях, выносимых на защиту. Комплексный характер работы, сочетающей фундаментальные исследования структуры с разработкой импортозамещающих материалов и внедрением их в промышленность, свидетельствует о сформированном системном научном мышлении и высокой профессиональной зрелости соискателя.

Совокупное заключение по диссертационной работе Башлаковой А.Л. – положительное.

По тексту и содержанию представленных к защите материалов имеются замечания:

1. Для оценки степени кристалличности соискатель использует два метода – РСА и ДСК – и делает обоснованный вывод о наличии паракристаллической фазы. Однако в работе отсутствует количественная оценка доли этой самой паракристаллической фазы. Следовало бы провести разложение дифракционных профилей на три компонента (кристаллическую, паракристаллическую и аморфную) с использованием специализированного программного обеспечения. Без этого вывод о том, что «дефектные кристаллиты ... образуют паракристаллическую фазу» (С. 83 диссертации) остается качественной гипотезой, хотя и весьма убедительной. Строго говоря, метод ДСК фиксирует плавление всех кристаллитов, но с разной температурой, и по расширению пика плавления также можно было бы судить о дефектности. Соискатель этого не делает, что снижает строгость доказательств.

2. На С. 86–90 соискатель объясняет анизотропию характеристик преимущественной ориентацией волокон поперек оси прессования. Однако не приведено количественного распределения волокон по углам ориентации. Упомянутая программа «Fiber Scout» определяет только длину волокон (С. 45–48), но не их ориентацию. Без полярных диаграмм распределения волокон по углам это утверждение остается предположением, хотя и вполне вероятным. Следовало бы либо провести соответствующий анализ микрофотографий, либо признать, что анизотропия обусловлена также и текстурой кристаллитов самого ПТФЭ, возникающей при спекании под давлением.

3. В главе 3 (С. 63–64) соискатель утверждает, что плазмохимическая обработка волокон позволяет формировать тонкое фторполимерное покрытие, которое улучшает совместимость. Однако в главе 4 (С. 73–74) при обсуждении центров кристаллизации соискатель не разделяет влияние геометрического фактора (развитая поверхность волокна) и химического фактора (наличие фторполимерного покрытия). Известно, что эпитаксиальная кристаллизация на подложках зависит от параметров кристаллической решетки подложки. Является ли аморфное фторполимерное покрытие центром кристаллизации, или же это все-таки поверхность самого углеродного волокна? Соискатель не приводит данных ИК-спектроскопии или РФЭС для подтверждения того, что покрытие действительно способствует зародышеобразованию, а не просто улучшает адгезию. Этот аспект требует более четкой дифференциации.

4. В главе 1, содержащей аналитический обзор, соискатель приводит обширный перечень литературных источников, однако акцент сделан преимущественно на работах отечественных исследователей. Представляется целесообразным более широко осветить современные зарубежные подходы к

модифицированию поверхности углеродных волокон, включая методы ковалентной функционализации, плазмохимическую обработку в различных газовых средах, а также способы «прививки» полимерных цепей. Это позволило бы более контрастно выделить преимущества разработанной соискателем технологии и глубже обосновать выбор именно плазмохимического модифицирования в среде фторорганических соединений.

5. В разделе, посвященном методике лазерной абляции (глава 2), соискателем предложен оригинальный подход к выделению частиц наполнителя из ПТФЭ-матрицы. Однако в тексте не приведены данные о возможном влиянии параметров лазерного излучения (интенсивность, длительность воздействия) на морфологию и размеры высвобождаемых углеродных волокон. Остается открытым вопрос, не происходит ли при абляции частичная термодеструкция или изменение длины волокон, что могло бы исказить результаты анализа. Целесообразно было бы провести сравнительную оценку разработанного метода с альтернативными способами выделения наполнителя (например, химическим травлением) с целью подтверждения его безопасности.

6. В работе продемонстрировано успешное применение разработанного материала для уплотнений шаровых клапанов в среде жидких углеводородов. Вместе с тем, для расширения области применения материала целесообразно было бы представить данные о его стойкости к набуханию и сохранении деформационно-прочностных характеристик в других агрессивных средах, включая газовые и химически активные среды, характерные для нефтегазовой и химической промышленности.

7. В тексте диссертации встречаются отдельные стилистические и редакционные погрешности, снижающие его литературное качество. Так, на С. 57 диссертации при описании компьютерной программы «Fiber Scout» допущен ряд нарушений правил пунктуации и логической организации текста: предложение «Для определения длины измельченных УВ использована компьютерная программа Fiber Scout. которая позволяет провести анализ изображений...» содержит ошибку, поскольку придаточная часть начинается со строчной буквы после точки; в конце предложения «... представить распределение волокон по длинам в виде таблицы или графика Авторами компьютерной программы ...» отсутствует точка между двумя самостоятельными смысловыми блоками; кроме того, имеет место нарушение логической последовательности изложения, поскольку сначала приводится перечень авторов программы, а затем дублируется информация о том, что данная программа разработана для расчета распределения длины волокна.

Данные замечания не носят принципиального характера и в целом не влияют на положительную оценку работы.

Заключение.

Диссертационная работа Башлаковой А.Л. представляет собой завершенное научно-квалификационное исследование, посвященное актуальной проблеме материаловедения – созданию новых антифрикционных композиционных материалов на основе ПТФЭ. В работе представлены новые научные данные о влиянии плазмохимически модифицированных углеродных волокон на структуру и свойства фторполимерной матрицы, что имеет важное теоретическое значение. Практическая значимость работы подтверждена

разработкой материала «Эластофлувис» и его успешным внедрением в промышленность. По своему содержанию, научной новизне, обоснованности выводов и практической значимости диссертационная работа полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение).

Ученая степень кандидата технических наук может быть присуждена **Башлаковой Анне Леонидовне** за следующие полученные результаты:

- установление закономерностей структурной трансформации ПТФЭ-матрицы, обусловленных конкуренцией процессов стимулированной кристаллизации и стерических ограничений при введении плазмохимически модифицированных углеродных волокон в диапазоне концентраций 1–10 мас. %;

- доказательство ключевой роли фторполимерного покрытия на углеродных волокнах в повышении адгезионного взаимодействия и комплексного улучшения физико-механических и триботехнических характеристик композита;

- разработку нового импортозамещающего антифрикционного материала «Эластофлувис» с оптимизированным составом (ПТФЭ + 5–7 мас. % модифицированных УВ), обладающего модулем упругости 600 МПа и PV-фактором, в 3,5 раза превышающим аналогичный показатель ненаполненного ПТФЭ, предназначенного для высокоподвижных уплотнительных элементов,

что в совокупности позволило решить актуальную научно-прикладную задачу материаловедения – создать новый класс экономичных антифрикционных материалов на основе ПТФЭ с управляемой структурой и стабильными триботехническими характеристиками, что подтверждено их успешным внедрением в производство в качестве импортозамещающей продукции.

Настоящим даю согласие на размещение отзыва о диссертации Башлаковой А.Л. на официальном сайте ИММС НАН Беларуси.

Официальный оппонент:
доцент кафедры материаловедения
и ресурсосберегающих технологий
учреждения образования «Гродненский
государственный университет
имени Янки Купалы»,
кандидат технических наук, доцент

 А.С.Антонов

Адрес: 230005, г. Гродно, ул. Курчатова, 1а
Телефон: +375 (152) 684109; E-mail: antonov_as@grsu.by

Подпись Антонова А.С. удостоверяю.
Декан инженерного факультета
ГрГУ им. Янки Купалы
08.09.2026



 Д.А.Линник