УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук, доктор технических наук, профессор РАН

_____ Е.А. Колубаев

«12» ноября 2026 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Чудинова Вячеслава Сергеевича «**Физические свойства углеродного нанослоя, сформированного ионно-плазменной обработкой на полимерных материалах**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации

Ввиду высокой технологичности и биосовместимости полимерные медицинские имплантаты широко применяются в качестве искусственных кровеносных сосудов, стентов, суставов, катетеров, шовных материалов и др. Однако большинство полимеров биоинертны, что не только влияет на их функциональность, но и может вызывать осложнения, связанные с неспецифической адсорбцией белков, развитием инфекций, вызванных бактериальной колонизацией, биодеградацию имплантатов. Поэтому разработка методов функционализации поверхности полимерных имплантатов играет ключевую роль в обеспечении их биобезопасности и клинической эффективности. В общем случае, функционализация поверхности имплантатов заключается в снижении их реакции на инородное тело, придании имплантатам биоактивности, обеспечении возможности насыщения имплантатов лекарственными препаратами и их пролонгированным высвобождением, а также в увеличение функционального срока службы имплантатов. Модификация поверхности имплантатов позволяет уменьшить риск осложнений и способствовать выздоровлению пациентов, что особенно актуально в связи с глобальной демографией старения населения и ростом числа различных хронических и внезапно возникающих заболеваний. Одним из способов повышения биосовместимости полимерных имплантатов является ионно-плазменная обработка, позволяющая создавать на их поверхности тонкое углеродное покрытие за счет разрушения и реструктуризации молекулярной структуры исходного материала. В связи с вышесказанным, **актуальность** диссертационной работы Чудинова Вячеслава Сергеевича, посвященная установлению зависимостей молекулярно-структурных параметров и физических свойств углеродного слоя на поверхности полимерных материалов от режимов ионно-плазменной обработки, не вызывает сомнений.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержание изложено на 149 страницах, включая 72 рисунка, 2 таблицы и списка из 147 библиографических ссылок.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, описана ее разработанность, сформулированы цели и задачи, показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, а также описаны методология и методы исследования. Также представлены научные положения, выносимые на защиту, отмечена достоверность полученных результатов и личный вклад соискателя.

В первой главе представлен анализ литературных данных по теме диссертации. Рассмотрены механизмы изменения структуры полимерных материалов в процессе воздействия высокоэнергетических ионов. Описана реакция организма на внедрение инородного тела. Рассмотрены современные полимерные материалы, применяемые в медицинской практике для замещения мягких тканей и сердечно-сосудистой системы. Представлены литературные данные, посвященные вопросам биосовместимости полимерных имплантатов, подвергнутых ионно-плазменной обработке. Описаны существующие ионно-плазменные установки для карбонизации поверхности полимерных образцов различного размера и конфигурации. На основании литературного обзора сформулированы вводы и подтверждена актуальность представленных исследований.

Во второй главе подробно описана установка ионно-плазменной обработки для карбонизации поверхности полимерных материалов. Обоснован выбор и проведена оптимизация режимов ионно-плазменной обработки полимерных материалов медицинского назначения.

В третьей главе представлены результаты исследования изменения структуры, морфологии и физических свойств поверхности полимерных материалов, обработанных ионно-плазменными методами. Описаны синтез полиуретановых образцов, их очистка от низкомолекулярных продуктов. Методом спектроскопии комбинационного рассеивания света проведен сравнительный анализ структуры карбонизованного слоя, сформированного на плоской поверхности полимеров в процессе ионно-плазменной обработки при планарной геометрии электрода и на внутренней поверхности полых полимерных изделий. Для получения информации об изменениях молекулярной структуры поверхности полимеров в процессе ионно-плазменной обработки также была использована инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье многократного нарушенного полного внутреннего отражения и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. Методом спектральной эллипсометрии определены толщина и оптические константы карбонизированного слоя на поверхности полиэтилена. Методом атомно-силовой микроскопии продемонстрировано гофрирование и растрескивание карбонизированного слоя, сформированного на поверхности полиуретана, обработанного ионами с энергией 5 и 20 кэВ.

В четвертой главе приведены результаты исследования адсорбции белковых молекул на поверхности полиуретана и полиэтилена медицинского назначения. Подтверждена гипотеза о ковалентной связи белков с углеродным нанослоем, содержащим стабилизированные неспаренные электроны, продемонстрирована стабильная адсорбция белков без возможности их полного удаления детергентами на карбонизованном слое. Методом ИК спектроскопии исследована конформация и биологическая активность белков, адсорбированных

на поверхности полимеров медицинского назначения, показано, что гидрофильность обработанной поверхности способствует сохранению вторичной структуры адсорбированного белка и не изменяет его каталитическую активность.

В заключении сформулированы основные выводы, следующие из анализа полученных в работе результатов.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации и соответствует основным ее положениям.

Новизна результатов диссертационной работы

По результатам КРС, РФЭС, ЭПР и ИК МНПВО-спектроскопии установлено, что сформированный карбонизованный слой состоит из аморфного углерода с включениями графитовых кластеров и содержит активные свободные радикалы, стабилизированные π-электронами, способные взаимодействовать с адсорбируемыми молекулами. Из анализа результатов ИК спектроскопии модифицированного поверхностного слоя полимерных материалов установлено появление в нем различных углерод-, кислород- и азотсодержащих соединений, не присутствующих в молекулярной структуре исходного полимерного материала. Получены экспериментальные зависимости смачиваемости и поверхностной энергии углеродного слоя от режима ионно-плазменной обработки поверхности для различных полимерных материалов. Установлено, что ионно-плазменная обработка обеспечивает существенное снижение угла смачиваемости и значимое увеличение поверхностной энергии, которые сохраняются в течение длительного времени. По результатам численного моделирования осуществлена оценка толщины углеродного слоя (60-70 нм), которая подтверждена результатами спектральной эллипсометрии. По результатам оптической и атомно-силовой микроскопии показано, что параметры морфологии поверхности углеродного покрытия (периодичность и амплитуды волнообразований, распределение трещин) зависят от флюенса обработки и энергии ионов. Установлено, что наличие в углеродном нанослое стабилизированных неспаренных электронов при атомах углерода обеспечивает ковалентную связь с белками. С использованием разработанной экспериментальной установки предложен и реализован подход создания углеродного слоя на внутренней поверхности полой полимерной трубки.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность результатов исследования обеспечена корректностью постановки задач, применением современного сертифицированного научно-исследовательского и лабораторного оборудования, аппаратных и программных средств в экспериментальных исследованиях и при обработке и анализе результатов, а также согласием полученных результатов с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными.

Основные выводы диссертационной работы изложены в статьях, опубликованных в профильных рецензируемых научных журналах из списка ВАК.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

Совокупность установленных зависимостей молекулярно-структурных параметров и физических макросвойств углеродного слоя на поверхности полимерных материалов от режимов ионно-плазменной обработки является научной основой, позволяющей за счет ионно-плазменной обработки управлять

свойствами карбонизированного слоя, в частности, с целью достижения наилучшей биосовместимости имплантатов. Разработанная и созданная ионно-плазменная установка может служить прототипом промышленного образца для медицинского применения.

В качестве замечаний по диссертационной работе можно отметить следующее:

1. В литературном обзоре отсутствуют сведения о текущем состоянии исследований влияния ионной имплантации на физические свойства полимерных материалов.

2. В диссертации отсутствует отдельный раздел, посвященный описанию методики проведения измерений и обработки полученных результатов. Описание измерительных процедур разбросано по всему тексту. Это усложняет восприятие полученных результатов и затрудняет их сравнительный анализ.

3. В работе недостаточно подробно описаны детали эксперимента по исследованию полученных образцов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. В частности, не указано осуществлялась ли процедура компенсации положительного электрического заряда, накапливающегося на поверхности образцов (нейтрализация заряда)? Не описано, проводилась ли очистка поверхности образцов перед проведением измерений, и каков был шаг сканирования? Также отсутствует информация о том, как проводилась калибровка шкалы энергии связи?

4. Одним из важнейших аспектов проведения анализа состава материалов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии является качественная и количественная самосогласованность спектров всех химических элементов, присутствующих в образце. Все пики, соответствующие различным химическим связям, использованные при аппроксимации одного элемента, должны присутствовать и при аппроксимации другого. Однако в представленной диссертации данное требование не всегда соблюдается. Согласно проведенному анализу, РФЭС спектр высокого разрешения N1s свидетельствует о присутствии групп, содержащих атом азота в C-N, C=N и C≡N связях. В то же время, при аппроксимации спектра C1s пики, соответствующие данным связям, не используются.

5. В качестве недостатка работы следует отметить отсутствие в структуре диссертации обобщающих разделов или параграфов, посвященных обсуждению полученных результатов. Представленный материал местами носит констатирующий характер. В частности, не представлено объяснение, почему зависимость концентрации гидроксильных групп от времени ионно-плазменной обработки образцов СВМПЭ носит экстремальный характер (рис. 3.23), а в случае полиуретана (рис. 3.27) данная зависимость описывается кривой с насыщением? Кроме того, диссертант никак не объясняет механизм деформации и разрушения карбонизированного слоя. Автору следовало бы сопоставить собственные данные с результатами аналогичных исследований других отечественных и зарубежных ученых, чтобы нагляднее продемонстрировать научную новизну и теоретическую значимость работы.

6. В работе указано, что складчатый рельеф, формирующийся в процессе ионно-пучковой обработки, зависит от механических свойств и структуры полимера, однако никаких подтверждающих экспериментальных данных не

представлено. Исследования проведены только для полиуретана. Представлены АСМ-изображения складчатого рельефа, сформированного при различных энергиях ионов и флюенса, однако количественный анализ указанных зависимостей в работе отсутствует.

7. Не ясно, каким образом метод атомно-силовой микроскопии был использован для определения механических свойств карбонизированного слоя.

8. В работе не обсуждается, как наличие дефектов поверхности карбонизированного слоя (складчатый рельеф и трещины) влияет на характер взаимодействия белковых молекул с поверхностью полимеров.

9. Для большинства рисунков и графиков условные обозначения почему то приведены в тексте диссертации, а не в подрисуночных подписях, что затрудняет восприятие текста. Сложно проводить сравнение влияния ионно-пучковой обработки различных образцов (полипропилен, полиуретан, СВМПЭ) в условиях, когда длительность обработки указана секундах (рис. 3.23) или флюенсах (рис. 3.27), а время выдержки на воздухе указано в минутах (рис. 3.28). Вместо десятичных запятых в работе используются точки.

Сделанные замечания, однако, не снижают общую положительную оценку работы, ее научную и практическую значимость.

Соответствие результатов диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа по цели, задачам, методам исследования, содержанию, научной новизне и практической значимости соответствует п. 1 паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки).

Апробация работы

Работа достаточно хорошо апробирована. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на многих международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ в российских и зарубежных журналах, из них 8 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в том числе 7 - в изданиях индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Заключение по диссертации

Диссертационная работа Чудинова Вячеслава Сергеевича является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную тему на высоком научном уровне. В ней содержится решение ряда актуальных задач, вносящих существенный вклад в развитие теоретических представлений о физических механизмах, лежащих в основе изменения физических свойств полимерных материалов в процессе ионно-плазменной обработки, а также о методах повышения биосовместимости полимерных имплантатов.

По уровню решаемых задач, научной новизне, теоретической и практической значимости, объему полученных результатов диссертационная работа Чудинова Вячеслава Сергеевича «Физические свойства углеродного нанослоя, сформированного ионно-плазменной обработкой на полимерных материалах» удовлетворяет всем требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Настоящий отзыв на диссертацию Чудинова Вячеслава Сергеевича «Физические свойства углеродного нанослоя, сформированного ионно-плазменной обработкой на полимерных материалах» обсужден и одобрен на заседании Лаборатории физики поверхностных явлений ИФПМ СО РАН («12» ноября 2026 г., протокол № 1). Отзыв составлен на основании диссертации, автореферата и публикаций Чудинова В.С.

Отзыв составил:
Заведующий лабораторией Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина
Сибирского отделения Российской академии наук,
профессор, доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

_____ / Панин Алексей Викторович /

12.11.2026

Подпись А.В. Панина заверяю
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН
кандидат физико-математических наук

_____ / Матолыгина Наталья Юрьевна /

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук.
Почтовый адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4
Телефон: (3822) 49-18-81
Официальный адрес эл. почты: root@ispms.tomsk.ru
Официальный сайт: http://www.ispms.ru

Я, Панин Алексей Викторович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Чудинова Вячеслава Сергеевича, и их дальнейшую обработку.

_____ / Панин Алексей Викторович /