

СТОМАТОЛОГИЯ/DENTISTRY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.19> EDN: CVHDVO

МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ В ПЛАЗМЕННЫХ ВОДОРОДНЫХ ПОТОКАХ

Научная статья

Ильясова Н.¹, Кондракова О.В.², Кудюкин А.³, Моос Е.Н.⁴, Слепова Е.В.^{5,*}^{1,2} Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, Рязань, Российская Федерация^{3,4} Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, Рязань, Российская Федерация⁵ ООО «Моя стоматология», Рязань, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kuznecova.e.v.94[at]yandex.ru)

Предложена: 24.06.2026; Принята: 22.07.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

Проблемы физического материаловедения биотканей и биоматериалов приобретают ключевую роль в современной медицинской отрасли и традиционно включено в программы всех конференций инновационного развития, в частности, прогнозирования эффективности возможных при этом технологических процессов. Современные разработки устойчивых к разрыву многослойных структур на основе костных тканей (например, суставов) малоизучены, в особенности отсутствуют данные о поверхности разрыва и критических величинах разрушающего напряжения. В данной работе получены ранее не публиковавшиеся новые результаты наших исследований фактора плазменного воздействия на указанные характеристики на примере модельных образцов, которые на данном этапе иллюстрированы для брекет-систем. Изучение участков поверхностей разрыва производилось с помощью метода атомно-силовой микроскопии (АСМ). Средняя шероховатость основания начального состояния поверхности металлического брекета составила 118,1 нм, а керамического — 64 нм. Было установлено, что после однократного воздействия водородной плазмы средняя шероховатость основания металлического брекета составила 184,4 нм, керамического — 97,4 нм, т.е. увеличилась. А после интенсивного действия значения уменьшились до 118,9 нм и 68 нм соответственно. Впервые полученные результаты могут оказаться полезными в практической медицине, в частности, при реставрации костного скелета.

Ключевые слова: плазменная обработка, водородная плазма, поверхность разрыва, атомно-силовая микроскопия, растровое изображение, брекететы, hydrogen plasma.

MULTILAYER STRUCTURES BASED ON BONE TISSUE IN PLASMA HYDROGEN FLOWS

Research article

Ilyasova N.¹, Kondrakova O.V.², Kudyukin A.³, Moos Y.N.⁴, Slepova E.V.^{5,*}^{1,2} Ryazan State Medical University named after Academician I.P. Pavlov, Ryazan, Russian Federation^{3,4} Ryazan State University named after S.A. Yesenin, Ryazan, Russian Federation⁵ Moya stomatologia LLC, Ryazan, Russian Federation

* Corresponding author (kuznecova.e.v.94[at]yandex.ru)

Suggested: 24.06.2026; Accepted: 22.07.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

Issues relating to the physical science of biological tissues and biomaterials are playing a key role in the modern medical sector and are traditionally included in the agendas of all conferences on innovative development, particularly regarding predicting the effectiveness of the associated technological processes. Current research into tear-resistant multilayer structures based on bone tissue (e.g. joints) remains understudied; in particular, there is a lack of data on tear surfaces and critical values of rupture stress. This work presents previously unpublished new results from our research into the effect of plasma treatment on these characteristics, using model specimens; at this stage, these are illustrated for orthodontic braces. The tear surfaces were examined using atomic force microscopy (AFM). The average surface roughness of the initial state of the metal brace surface was 118.1 nm, and that of the ceramic brace was 64 nm. It was found that, following a single exposure to hydrogen plasma, the average surface roughness of the metal brace was 184.4 nm and that of the ceramic brace was 97.4 nm, i.e. it had increased. Following intensive treatment, however, these values decreased to 118.9 nm and 68 nm, respectively. These results, obtained for the first time, may prove useful in clinical practice, particularly in the restoration of the skeletal system.

Keywords: plasma treatment, hydrogen plasma, tear surface, atomic force microscopy, raster image, braces.

Введение

Проблема физического материаловедения играет одну из ключевых ролей в фармацевтической, косметологической, промышленной, сельскохозяйственной, медицинской отраслях. Материал медико-биологического направления (биологический материал) — это вещество, материал, препарат, изделие, которое функционирует в непосредственном контакте с различными системами и тканями организма. Основопологающей задачей которого является обеспечение его функций, а также оптимизация жизнедеятельности. В настоящее время одним из

первостепенных направлений использования материалов медико-биологического назначения является создание имплантатов и эндопротезирование. Исследование, разработка и технологии получения новых биоматериалов имеет огромное практическое значение, поскольку модернизация структуры веществ предоставляет возможность создания материалов с улучшенными механическими свойствами [2], [3]. В современных исследованиях авторам статьи неизвестны работы, касающиеся изменения поверхности основания брекета, которое должно служить в качестве оцениваемого параметра. На сегодняшний день интерес практикующих врачей стоматологов-ортодонтот состоит в более глубоком исследовании прочности соединения, сцепления [9], [10], [12], так как брекет-системы являются одними из самых применяемых ортодонтических аппаратов в процессе лечения дефектов зубочелюстной системы. Данный аспект проблемы позволяет прогнозировать эффективность тех или иных технологических приемов.

Цель данного исследования — выявить и проанализировать особенности морфологии поверхностей образцов основания металлических и керамических брекетов до и после осуществления обработки потоком водородной плазмы.

Материалы и методы

Для осуществления поставленной цели были проведены исследования участков поверхности на двух брекет-системах одной компании производителя: металлические Victory Series TM (3M Unitek) и керамические Clarity TM (3M Unitek). Известно, что металлические брекеты производят из сплава нержавеющей стали марки 17-4PH (это прочный износостойкий материал, хорошо выдерживающий постоянные нагрузки), а керамические брекеты изготавливают из прочного поликристаллического оксида алюминия (алюмооксидная керамика), плюсом материала является его эстетичность и термостойкость, а также химическая инертность. Основания данных образцов брекетов имеют неровную поверхностьную структуру, углубления, микрорельеф, которые увеличивают площадь соединения с адгезивом, что важно при сцеплении с эмалью зуба. Исследование морфологии участков поверхности брекетов производилось с помощью поверхностного профилирования методом АСМ (атомно-силовая микроскопия) до и после воздействия потока водородной плазмы. Атомно-силовой микроскоп представляет собой сканирующий зондовый микроскоп высокого разрешения, в основе которого лежит измерение силового взаимодействия между изучаемой поверхностью и консольной балкой (кантилевером) с острой иглой (зондом) на свободном конце. Аппарат позволяет определить не только геометрию изучаемой поверхности, но и локальные физико-механические свойства материала на наноструктурном уровне.

На рис. 1 показан образец представленного брекета, закрепленный на предметном столике. При движении кантилевера по исследуемой поверхности разрыва фиксируется ее профиль, из которого формируется растровое изображение [5].

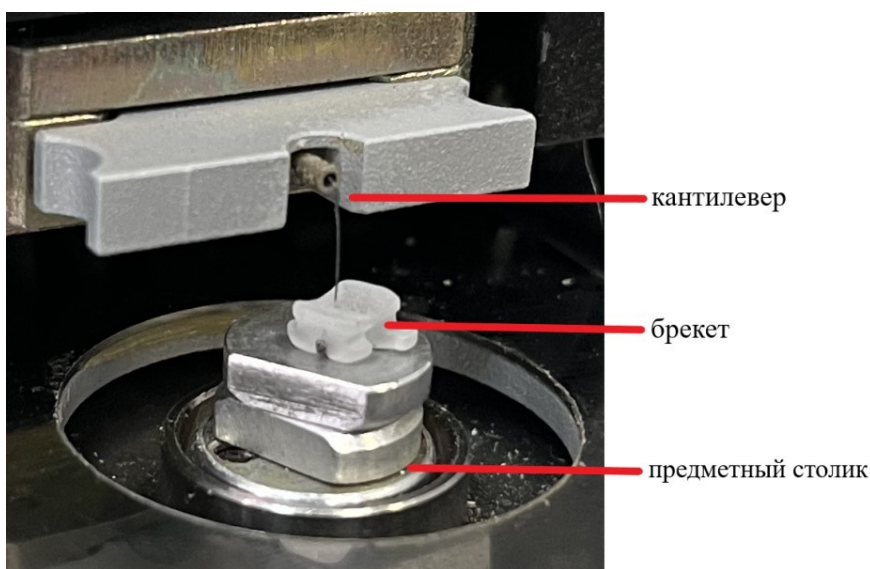


Рисунок 1 - Закрепленный образец брекета на предметном столике сканера и кантилевер сканирующего зондового микроскопа

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.19.1>

У сканирующего зондового микроскопа в арсенале есть опция анализ, которая позволила перевести шероховатость исследуемой поверхности в цифровую характеристику для интерпретации полученных данных.

Обработка брекетов проводилась потоком водородной плазмы. Следует отметить, что результат воздействия которой может быть, как полезным [7], [8], так и разрушительным. В полностью ионизированной водородной плазме среда состоит исключительно из свободных частиц: в качестве положительной компоненты она содержит ионы водорода, т. е. протоны, а отрицательно заряженной компонентой являются электроны. Как известно, массы этих частиц равны $m_p = 1.67 \times 10^{-24}$ г, $m_e = 0.91 \times 10^{-27}$ г. Температура равна 8000 °С. В водородной плазме ионы могут находиться в состояниях H^+ , H_2^+ , H_3^+ . Одними из предполагаемых эффектов воздействия является изменение микрорельефа, образование трещин [1], [11], внедрение водорода и образование соединений в приповерхностном слое [7], [8], а также возможна его модификация за счет изменения фазового состава.

Результаты исследования и обсуждение

Результаты изучения структуры поверхности образцов по вышеописанной измерительной процедуре представлены далее на рис. 2 – 4. По окончании сканирования микроскопом участков поверхностей керамического и металлического брекетов был проведен сравнительный анализ полученных растровых изображений по двум ортогональным направлениям. На всех последующих иллюстрациях показаны линии сканирования кантилевера, вдоль которых измерялась шероховатость.

Данное сканирование велось по линиям 1–5, которые указаны на рис. 2, а, б и 3, а, б. В частности, при сканировании вдоль выбранного направления профиля 1 установлено, что при значении координаты $x = 23-28$ происходит скачок по высоте y в диапазоне значений 0,984–0,986 (рис. 2, в). На рис. 3, в представлен результат при сканировании вдоль профиля 3. Установлено, что наблюдался скачок по высоте y в диапазоне значений 0,955–0,98 при значении координаты $x = 45$.

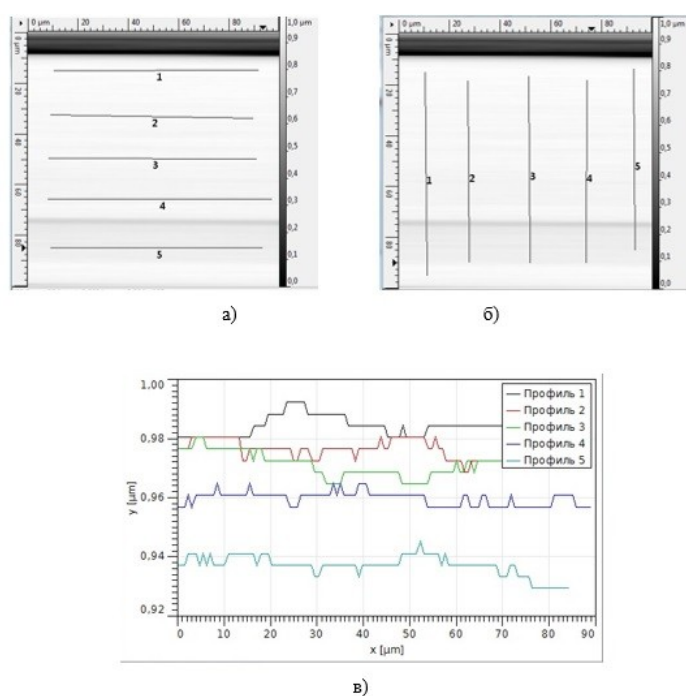


Рисунок 2 - Зависимости высоты рельефа от координаты сканирования по двум ортогональным направлениям (а, б) и график сканирования поверхности основания металлического брекета (в)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.19.2>

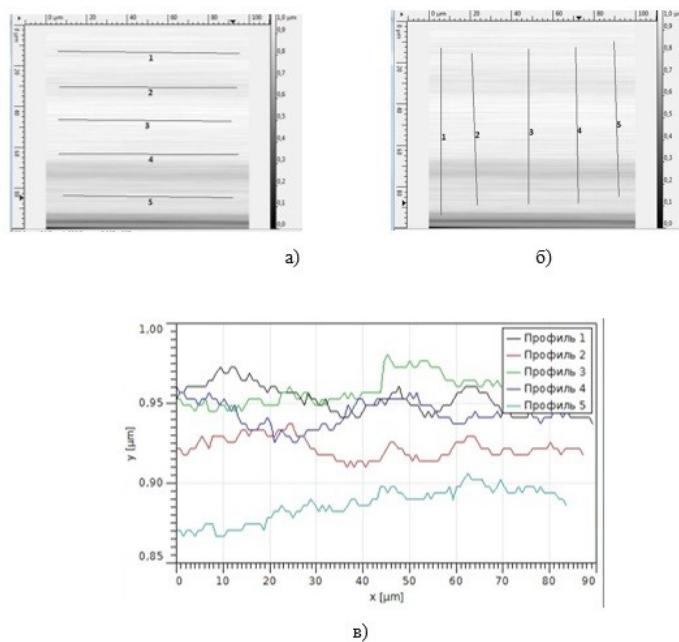


Рисунок 3 - Зависимости высоты рельефа от координаты сканирования по двум ортогональным направлениям (а, б) и график сканирования поверхности основания керамического брекета (в)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.19.3>

Далее, на приведенных иллюстрациях — рис. 4, а, б представлены рельефы поверхностей (в декартовой системе координат), полученные при сканировании основания участков металлического (а) и керамического (б) брекетов в виде 3D-растровых изображений.

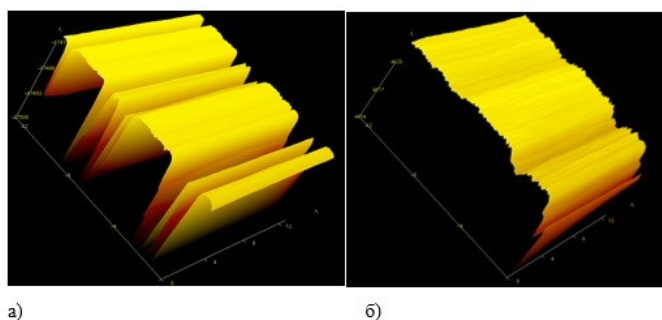


Рисунок 4 - Растровые 3D-изображения поверхностей, полученные после сканирования основания металлического (а) и керамического (б) брекетов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.19.4>

По итогам оценки средняя шероховатость основания металлического брекета составила 118,1 нм, а керамического — 64 нм.

На рис. 5 продемонстрирована диаграмма значений средней шероховатости поверхности основания металлического и керамического брекетов.

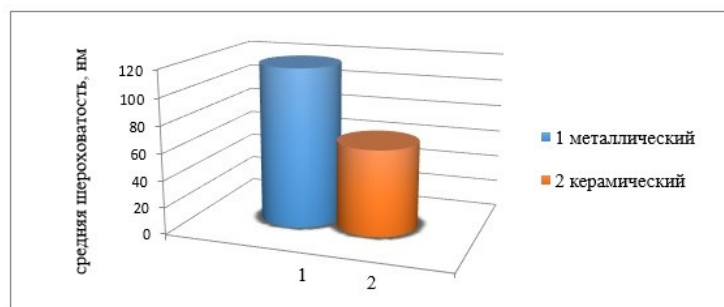


Рисунок 5 - Диаграмма значений средней шероховатости поверхностей основания металлического и керамического брекетов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.19.5>

Судя по полученным сканам после однократного воздействия водородной плазмы на поверхность основания металлического брекета средняя шероховатость составила 184,4 нм (увеличилась), а в результате проведенного интенсивного воздействия значение снизилось и показало результат близкое к исходным 118,9 нм (рис.6,7).

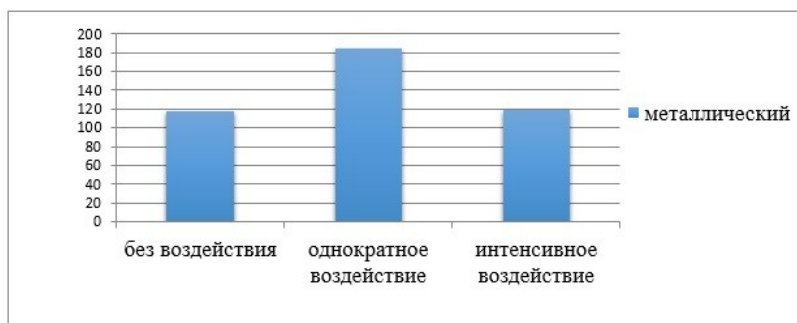


Рисунок 6 - Изменение значений средней шероховатости поверхности основания металлического брекета без воздействия, после однократного и интенсивного воздействия водородной плазмы

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.19.6>

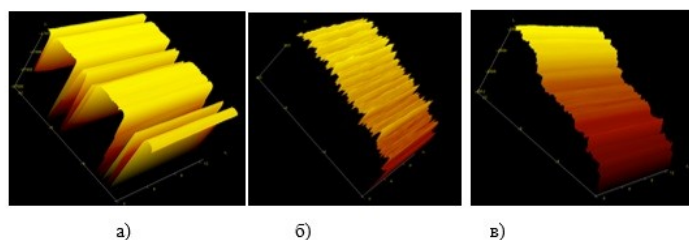


Рисунок 7 - Растровые 3D-изображения поверхностей основания металлического брекета без воздействия (а), полученные после однократного (б) и интенсивного (в) воздействия водородной плазмы

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.19.7>

По итогам, средняя шероховатость поверхности керамического брекета после одномоментного плазменного воздействия показала значение 97,4 нм (увеличилась относительно изначальных характеристик), а после интенсивного воздействия снизилась близко к контрольным значениям параметра — 68 нм (рис.8,9).

Приведенные результаты развитости шероховатости, полученной после однократного применения водородной плазмы, указывает на то, насколько прочным будет процесс сцепления в трехслойных композициях.

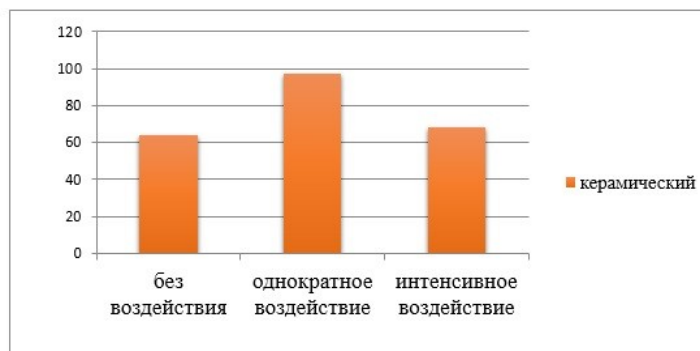


Рисунок 8 - Изменение значений средней шероховатости поверхности основания керамического брекета без воздействия, после однократного и интенсивного воздействия водородной плазмы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.19.8>

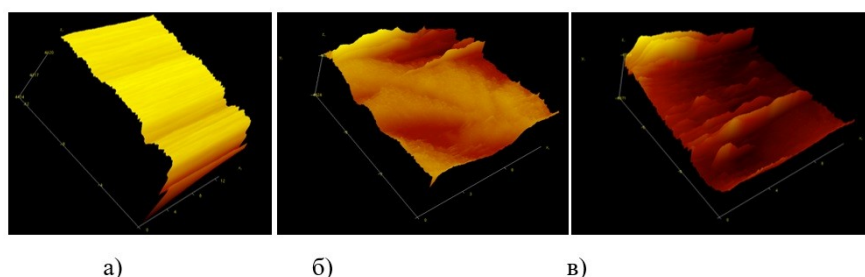


Рисунок 9 - Растровые 3D-изображения поверхностей основания керамического брекета без воздействия (а), полученные после однократного (б) и интенсивного (в) воздействия водородной плазмы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.19.9>

Заключение

На данном этапе нами были предоставлены первые результаты воздействия потока водородной плазмы на поверхность основания брекета. Развитие шероховатости микрорельефа и изменение структуры участков изучаемой поверхности должно неизбежно сказаться на усилиях отрыва, которые нуждаются в существенном уточнении, и эти исследования будут сделаны в будущем. Полученные в работе и представленные в статье результаты могут принести пользу в практической медицине, в частности при реставрации костного скелета [4].

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочитают не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Топорков Д.А. Эффект экранировки вольфрама висмутом под воздействием мощного потока водородной плазмы / Д.А. Топорков, Д.А. Бурмистров, В.А. Барсук // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. — 2024. — № 47 (2).
2. Худайбердиев А.А. Исследование влияния размеров и структуры наночастиц на механические свойства материалов / А.А. Худайбердиев, А.П. Картошкин // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. — 2024. — № 6 (123). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-razmerov-i-struktury-nanochastits-na-mekhanicheskie-svoystva-materialov> (дата обращения: 25.06.24).
3. Хамматова Э.А. Разработка метода наноструктурирования натуральных материалов для повышения механических свойств / Э.А. Хамматова, Л.Н. Абуталипов, В.В. Хамматова // Дизайн и технологии. — 2024. — № 103 (145).
4. Гаврюшенко Н.С. Сравнительная характеристика механикопрочностных свойств углеродного наноструктурного имплантата и нативной кости / Н.С. Гаврюшенко, С.Ю. Батраков, С.Г. Баламетов // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. — 2020. — № 19 (1). — С. 108–115.
5. Морозов И.А. К вопросу определения точки контакта в силовых измерениях методами атомно-силовой микроскопии / И.А. Морозов // Вестник Пермского университета. — 2024. — № 3.



6. Russell J.S. Aesthetic orthodontic brackets / J.S. Russell // J Orthod. — 2005. — № 32 (2). — P. 146–163. — DOI: 10.1179/146531205225021024. — PMID: 15994990.
7. Верховский А.Е. Влияние наводороживания и температуры на служебные характеристики титанового сплава / А.Е. Верховский, К.Г. Гаджиев, Д.С. Уртенов // Международный научно-исследовательский журнал. — 2021. — № 1 (103). — DOI: 10.23670/IRJ.2021.103.1.007
8. Павлов С.Б. Влияние водорода на сталь 09Г2С при повышенных температурах и давлениях / С.Б. Павлов, В.А. Маликов // Международный научно-исследовательский журнал. — 2014. — № 10 (29).
9. Scribante A. Metallic vs ceramic bracket failures after 12 months of treatment: a prospective clinical trial / A. Scribante, M. Pascadopol, P. Gandini [et al.] // Int Dent J. — 2024. — № 74 (6). — P. 1371–1377. — DOI: 10.1016/j.identj.2024.04.023. — EDN: GKPFUB.
10. Илясова Н.В. Сравнительный анализ поверхностей разрыва когезионных связей в многослойных системах / Н.В. Илясова, О.В. Кондракова, А.И. Кудюкин и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2022. — № 15 (1).
11. Салгаева У.О. Структура и физико-химические свойства приповерхностных слоев оптических материалов, модифицированных путем обработки в водородной плазме / У.О. Салгаева, А.Б. Волынцев, С.С. Мушинский // Вестник пермского университета. Физика. — 2021. — № 1.
12. Salama A.A. Evaluation of shear bond strength of orthodontic ceramic and metal brackets with zirconia: effects of adhesive systems and storage conditions / A.A. Salama [et al.] // Clinical oral investigations. — 2026. — Vol. 30. — № 4. — P. 131.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Toporkov D.A. E'ffekt e'kranirovki vol'frama vismutom pod vozdeystviem moshhnogo potoka vodorodnoj plazmy' [The effect of shielding tungsten with bismuth under the influence of a powerful flow of hydrogen plasma] / D.A. Toporkov, D.A. Burmistrov, V.A. Barsuk // VANT. Ser. Thermonuclear fusion. — 2024. — № 47 (2). [in Russian]
2. Khudaiberdiev A.A. Issledovanie vliyaniya razmerov i strukturi nanochastits na mekhanicheskie svoystva materialov [Investigation of the effect of nanoparticle size and structure on the mechanical properties of materials] / A.A. Khudaiberdiev, A.P. Kartoshkin // Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn [Universum: technical sciences: electron. scientific journal]. — 2024. — № 6 (123). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-razmerov-i-struktury-nanochastits-na-mekhanicheskie-svoystva-materialov> (accessed: 25.06.24). [in Russian]
3. Khammatova E.A. Razrabotka metoda nanostrukturirovaniya naturalnikh materialov dlya povsheniya mekhanicheskikh svoystv [Development of a nanostructuring method for natural materials to enhance mechanical properties] / E.A. Khammatova, L.N. Abutalipov, V.V. Khammatova // Dizain i tekhnologii [Design and technology]. — 2024. — № 103 (145). [in Russian]
4. Gavryushenko N.S. Sravnitel'naya kharakteristika mekhanikoprochnostnikh svoystv uglerodnogo nanostrukturnogo implantata i nativnoi kosti [Comparative characteristics of mechanical strength properties of a carbon nanostructured implant and native bone] / N.S. Gavryushenko, S.Yu. Batrakov, S.G. Balametov // Vestnik Smolenskoi gosudarstvennoi meditsinskoi akademii [Bulletin of the Smolensk State Medical Academy]. — 2020. — № 19 (1). — P. 108–115. [in Russian]
5. Morozov I.A. K voprosu opredeleniya tochki kontakta v silovy'x izmereniyax metodami atomno-silovoj mikroskopii [On the issue of determining the point of contact in force measurements by atomic force microscopy] / I.A. Morozov // Bulletin of Perm University. — 2024. — № 3. [in Russian]
6. Russell J.S. Aesthetic orthodontic brackets / J.S. Russell // J Orthod. — 2005. — № 32 (2). — P. 146–163. — DOI: 10.1179/146531205225021024. — PMID: 15994990.
7. Verxovskij A.E. Vliyanie navodorozhivaniya i temperatury' na sluzhebny'e kharakteristiki titanovogo splava [Effect of flooding and temperature on performance characteristics of titanium alloy] / A.E. Verxovskij, K.G. Gadzhiev, D.S. Urtenov // International Research Journal. — 2021. — № 1 (103). — DOI: 10.23670/IRJ.2021.103.1.007 [in Russian]
8. Pavlov S.B. Vliyanie vodoroda na stal' 09G2S pri pov'shenny'x temperaturax i davleniyax [The effect of hydrogen on steel 09G2C at elevated temperatures and pressures] / S.B. Pavlov, V.A. Malikov // International Research Journal. — 2014. — № 10 (29). [in Russian]
9. Scribante A. Metallic vs ceramic bracket failures after 12 months of treatment: a prospective clinical trial / A. Scribante, M. Pascadopol, P. Gandini [et al.] // Int Dent J. — 2024. — № 74 (6). — P. 1371–1377. — DOI: 10.1016/j.identj.2024.04.023. — EDN: GKPFUB.
10. Ilyasova N.V. Sravnitel'ny'j analiz poverxnostej razry'va kogeziionny'x svyazej v mnogoslojny'x sistemax [Comparative analysis of cohesive bond breaking surfaces in multilayer systems] / N.V. Ilyasova, O.V. Kondrakova, A.I. Kudyukin et al. // Scientific and Technical Bulletin of SPbGPU. Physical and Mathematical Sciences. — 2022. — № 15 (1). [in Russian]
11. Salgaeva U.O. Struktura i fiziko-khimicheskie svoystva pripoverxnostny'x sloev opticheskix materialov, modifitsirovanny'x putem obrabotki v vodorodnoj plazme [Structure and physico-chemical properties of near-surface layers of optical materials modified by treatment in hydrogen plasma] / U.O. Salgaeva, A.B. Volyncev, S.S. Mushinskij // Bulletin of Perm University. Physics. — 2021. — № 1. [in Russian]
12. Salama A.A. Evaluation of shear bond strength of orthodontic ceramic and metal brackets with zirconia: effects of adhesive systems and storage conditions / A.A. Salama [et al.] // Clinical oral investigations. — 2026. — Vol. 30. — № 4. — P. 131.