

**Материаловедение
и технологии материалов
Materials science and materials technology**

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК: 666.3

doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-61-71

**ПОВЫШЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕХНИЧЕСКОЙ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЫ
ВЧ РАЗРЯДОВ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ**

Игорь Константинович Некрасов¹✉, Ильдар Шаукатович Абдуллин², Карим Шамилевич Мастюков³

¹ ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет", Казань, Россия

² ООО «Плазма-ВСТ», Казань, Россия

³ ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Казань, Россия

¹ igor05071997@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0975-0285>

² plasma.vst@gmail.com

³ olushax231@gmail.com

Аннотация

В статье приведено исследование воздействия плазмы высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного давления на техническую корундовую керамику с целью повышения адгезионной прочности, предела прочности и модуля упругости при изгибе. Показано, что краевой угол смачивания водой керамических изделий после воздействия плазмой уменьшался с 83 до 21°, предел прочности при изгибе повышался на 27 %, модуль упругости

при изгибе – на 6 %. С помощью АСМ-исследования поверхности корундовой керамики обнаружено, что в результате воздействия плазмы ВЧЕ разряда пониженного давления происходило изменение зеренной структуры, а также увеличение адгезионной прочности.

Ключевые слова: корундовая керамика, плазма, разряд, давление.

Ссылка для цитирования:

Некрасов И.К. Повышение физических и механических характеристик технической корундовой керамики с помощью плазмы ВЧ разрядов пониженного давления / И.К. Некрасов, И.Ш. Абдуллин, К.Ш. Мастюков // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 3. – С. 61-71. doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-61-71.

Original article

Open Access Article

**INCREASING THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS
OF TECHNICAL ALUMINA CERAMICS USING LOW-PRESSURE
HIGH-FREQUENCY DISCHARGE PLASMA**

Igor Konstantinovich Nekrasov¹✉, Ildar Shaukatovich Abdullin², Karim Shamilevich Mastuykov³

¹ Kazan Federal University, Kazan, Russia

² Plasma-VST LLC, Kazan, Russia

³ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia

¹ igor05071997@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0975-0285>

² plasma.vst@gmail.com

³ olushax231@gmail.com

Abstract

The paper presents a study of the effect of low-pressure high-frequency (HF) discharge plasma on technical alumina ceramics in order to increase bending adhesive strength, tensile strength and modulus of elasticity. It is shown that the marginal angle of wetting ceramic products with water after plasma exposure decreased from 83 to 21°, the bending strength increased by 27 %, and the bending modulus of elasticity

increased by 6 %. Using AFM studies of the surface of alumina ceramics, it is found out that as a result of exposure to plasma from a low-pressure discharge, the grain structure changes, as well as adhesive strength increases.

Keywords: alumina ceramics, plasma, discharge, pressure.

Reference for citing:

Nekrasov IK, Abdullin ISh, Mastuykov KSh. Increasing the physical and mechanical characteristics of technical alumina ceramics using low-pressure high-frequency discharge plasma. Transport Engineering. 2025;3:61-71. doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-61-71.

Введение

Керамика на основе корунда (α - Al_2O_3 модификация) имеет широкое распространение в различных отраслях промышленности. Это обусловлено высокой стойкости к истиранию, твердостью (9 по шкале Мооса), коррозионной стойкостью, теплостойкостью и низкой по сравнению со сталью плотностью. Корундовая керамика применяется для термоизоляции и электроизоляции, в перегрузочном, транспортном, обогащительном и горно-шахтном оборудовании (камеры сушки, транспортеры непрерывного потока, разгрузочные, вибрационные желоба, воздушные сепараторы, промывочные барабаны, трубопроводы, колена труб, загрузочные лотки грохота, кузова самосвалов) и в другом промышленном оборудовании [1, 2].

Одним из преимуществ производимой корундовой керамики является ее низкая адгезия поверхности, что позволяет транспортировать различные материалы без налипания, отводить загрязнения с поверхности барабанов и труб. Однако низкая адгезия увеличивает риск откола керамики от подложки при внешнем воздействии. В связи с этим является актуальным разработка методов модификации поверхности корундовой керамики с регулируемой адгезией

(фронтальная сторона керамики обладает гидрофобностью, а тыльная сторона – гидрофильностью).

Известны различные методы модификации корундовой керамики, к которым можно отнести радиационные, лазерные [3], ионно-плазменные [3–6], методы добавления специализированных добавок в процессе спекания керамики [7, 8], которые позволяют существенно улучшить механические характеристики корундовой керамики. Однако большинство данных методов имеют либо высокую стоимость обработки, либо низкую производительность.

Методом обработки, обладающим высокой производительностью и низкой стоимостью обработки, является модификация поверхности плазмой высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного давления [9–13].

В связи с этим является актуальным применение обработки плазмой ВЧ разряда пониженного давления поверхности корундовой керамики с целью регулируемого увеличения адгезионной прочности подложки к керамике, а также ее прочностных свойств, таких как предел прочности на изгиб и модуль упругости при изгибе.

Материалы, модели, эксперименты и методы

В качестве корундовых керамических материалов использовались футеровочные корундовые плоские плитки ($22 \times 39 \times 4,5$ мм) производства АО «НЭВЗ-керамикс». Физико-механические характеристики керамики представлены в табл. 1.

Плазменная модификация производилась в установках ВЧ индукционного (ВЧИ)

(рис. 1а, 2а) и ВЧ емкостного (ВЧЕ) (рис. 1б, 2б) разрядов пониженного давления. Основными характеристиками разряда являлись плотность ионного тока на образец – до $1,5 \text{ А/м}^2$ [11], энергия ионов 50-100 эВ [11], температура нагрева керамических изделий не превышала 40°C для ВЧЕ разряда и 600°C для ВЧИ разряда.

Physical and mechanical characteristics of lining ceramics

№	Наименование	Единица измерения	Нормированное значение по ТУ
1	Содержание Al_2O_3	%	≥ 95
2	Кажущаяся плотность	г/см ³	$\geq 3,75$
3	Модуль упругости при изгибе	ГПа	≥ 300
4	Предел прочности при статическом изгибе	МПа	≥ 350
5	Микротвердость	ГПа	≥ 16
6	Трещиностойкость	МПа·м ^{1/2}	$\geq 3,5$
7	Продольная скорость распространения звука	м/с	$\geq 10\ 300$
8	Твердость	НРА	≥ 78
9	Ударная вязкость	кДж/м ²	≥ 3

За входные параметры разряда принимались расход газа от 0,08 до 0,18 г/с, подаваемая в разряд мощность от 1,5 до 2,0 кВт, длительность обработки от 20 до 60 минут, в качестве плазмообразующего газа использовался аргон. Выбор экспериментальных режимов плазменной модификации для проведения исследований осуществляли на основе результатов собственных исследований взаимодействия керамических материалов с плазмой ВЧЕ и ВЧИ разрядов пониженного давления. Режимы модификации представлены в табл. 2.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) проводилась на сканирующем зондовом микроскопе *Bruker Dimension FastScan* в режиме численного наномеханического картирования, в качестве зондов использовались кантеливеры *Bruker scanAssyst air* с радиусом закругления 5 нм.

Исследование предела прочности на статический изгиб проводилось на основе ГОСТ 24409 на универсальной испытательной машине *Shimadzu Autograph AGS-50* кН, расстояние между опорами составляло 30 мм, скорость нагружения – 2 мм/мин.

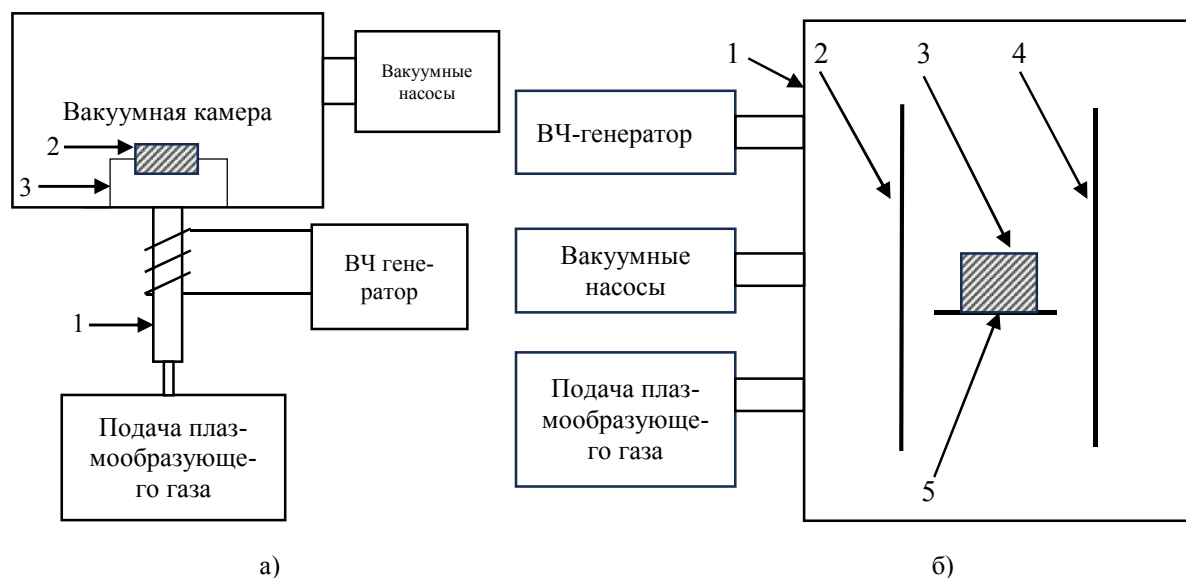


Рис. 1. Блок-схема процесса обработки в ВЧИ разряде (а) и блок-схема процесса обработки в ВЧЕ разряде (б). На рис. (а) обозначены: 1 – плазматрон, 2 – керамическая плитка, 3 – крепления. На рис. (б) обозначены: 1 – вакуумная камера, 2,4 – электроды, 3 – керамическая плитка, 5 – полка для размещения плиток

Fig. 1. Block diagram of the processing process in ICP discharge (a) and block diagram of the processing process in CCP discharge (b). In the figure (a) are labeled: 1 - plasmatron, 2 - ceramic tile, 3 - fasteners. Figure (b) denotes: 1 - vacuum chamber, 2,4 - electrodes, 3 - ceramic tile, 5 - shelf for tile placement

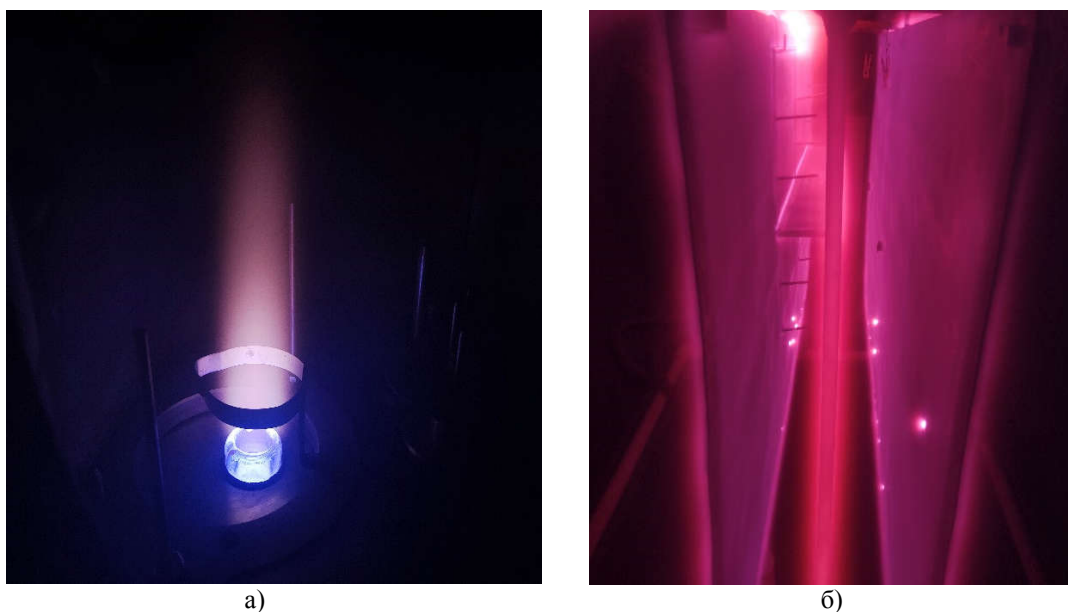


Рис. 2. ВЧИ разряд пониженного давления (а) и ВЧЕ разряд пониженного давления (б)
 Fig. 2. ICP low-pressure discharge and CCP low-pressure discharge (b)

Таблица 2

Режимы плазменной модификации в ВЧЕ разряде пониженного давления

Table 2

Plasma modification modes in low-pressure high-frequency discharge

№	Тип разряда	Мощность, кВт	Плазмообразующий газ	Расход газа, г/с	Длительность обработки, мин
1	ВЧЕ	1,8	Аргон	0,18	45
2	ВЧИ	1,75	Аргон	0,12	20
3	ВЧИ	1,5	Аргон	0,08	20
4	ВЧЕ	2,0	Аргон	0,18	60
5	Исходный	-	-	-	-
6	ВЧЕ	1,5	Аргон	0,18	60

Для определения статического краевого угла смачивания исходной и плазмобработанной керамики набиралась доза воды объёмом 2 мкл предварительно подготовленным шприцом-дозатором и поме-

щалась на поверхность керамики при температуре окружающей среды в 23° С. Величина угла определялась программой *Autocad*.

Результаты

Для исследования влияния плазмы ВЧЕ разряда пониженного давления на адгезионные характеристики корундовой керамики проведены эксперименты по определению силы взаимодействия зонда с поверхностью с помощью АСМ-исследования (рис. 3), а также по определению краевого угла смачивания.

Зонд представлял собой острую иглу с радиусом наконечника в 5 нм, расположенную на упругой консоли (кантилевер). По мере приближения к поверхности керамики возникали силы притяжения или отталкивания за счет межмолекулярных

сил, которые заставляли кантилевер изгибаться. Силы притяжения возникали в случае наличия адгезионной связи поверхности керамики к зонду.

На рис. 3 изображена карта сил адгезии для керамической плитки без плазменной обработки. Из рисунка видно, что на подавляющей части поверхности доминировала сила отталкивания (максимальное значение 12,4 нН), свидетельствующая об отсутствии адгезионной прочности. Присутствуют отдельные участки с наличием адгезионных сил, однако их вклад незначителен в общую картину. Данная карта

показала низкую адгезионную прочность поверхности исходной корундовой керамики к подложке.

На рис. 3а–ж, л изображены карты сил адгезии для различных режимов обработки ВЧ плазмой пониженного давления согласно табл. 2. Для всех режимов плазменной модификации наблюдалось повышение адгезии, однако для режима № 3 табл. 2 силы адгезии незначительны (максимальное значение составляло 6,6 нН, рис. 3д). Это можно объяснить низкой плотностью потока ионов, бомбардирующих образец в результате низкого значения потока (расхода) газа [13]. Для всех режимов обработки наблюдались области с низкой адгезионной прочностью. Одна-

ко, эти области в большинстве случаев расположены в межзеренном пространстве, являвшихся аморфными. Наблюдались целые отдельные зерна с низкой адгезионной прочностью (рис. 3д, л). Скорее всего, это связано с процессом изготовления керамических изделий, в результате которого не достигалось равномерного смешивания, измельчения, спекания всех исходных компонентов.

Наибольшие значения сил притяжения (76,3 нН) достигались для режима № 4 (рис. 3ж). Однако наибольшая равномерность адгезионных сил в сочетании с высокой силой притяжения зонда достигается при обработке режимом № 1 (рис. 3а).

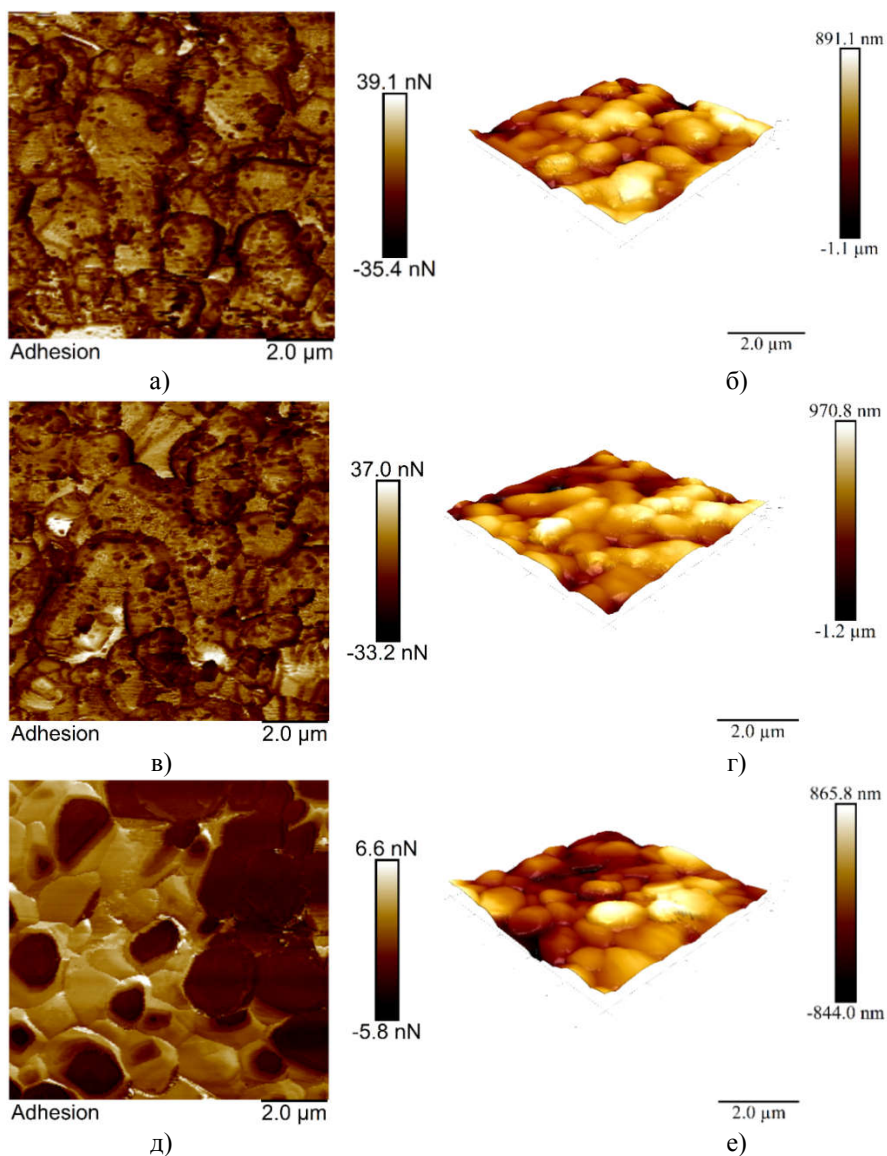


Рис. 3. АСМ-фотографии поверхности керамики. Нумерация рисунков согласно табл. 2: а, б – режим № 1; в, г – режим № 2; д, е – режим № 3;

Fig. 3. AFM-photographs of the ceramic surface. Figure numbering according to Table 2: : a, b – mode №1; v, g – mode №2; d, e – mode №3; zh, z – mode №4; i, k – initial (№5); l, m – mode №6

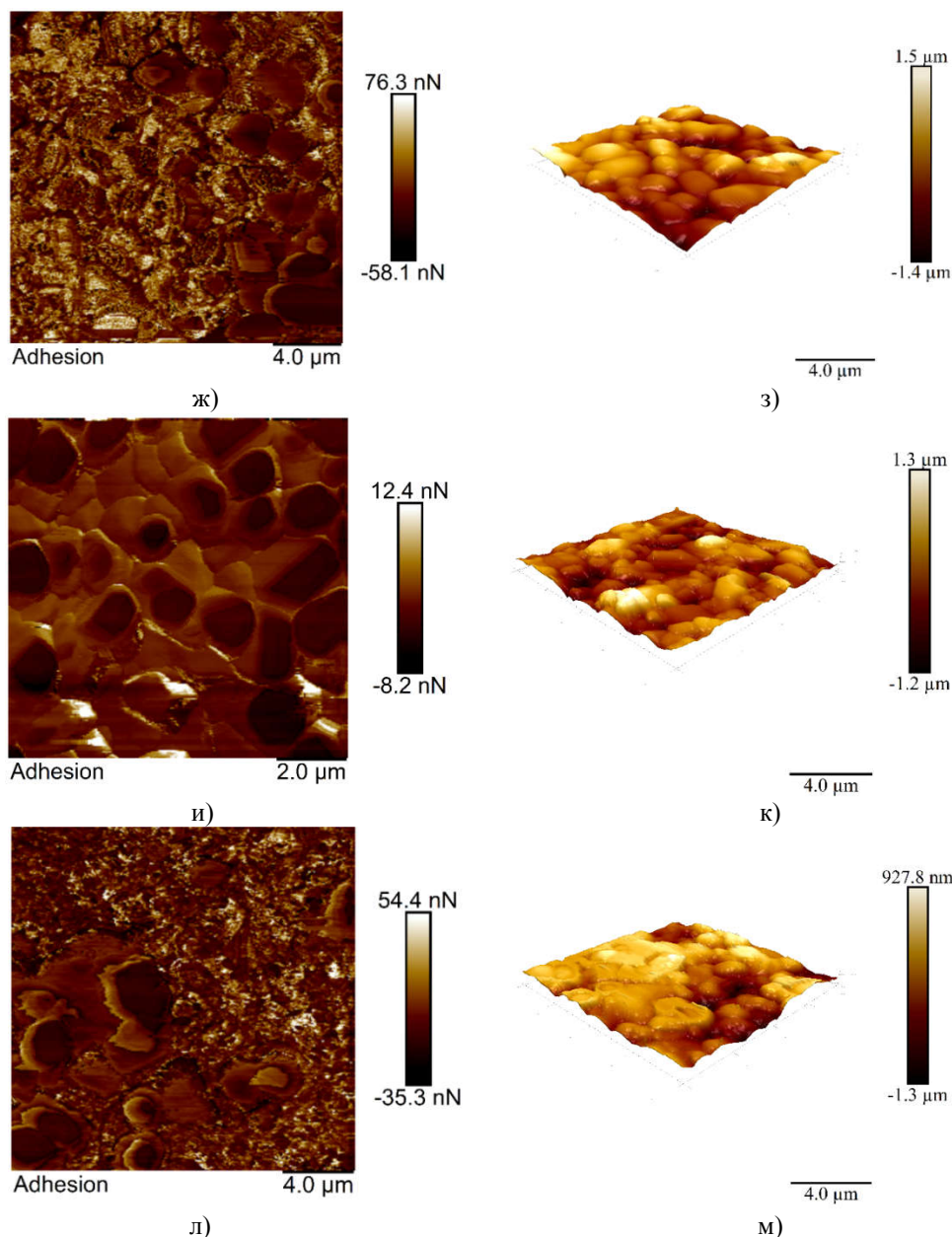


Рис. 3 (продолжение). АСМ-фотографии поверхности керамики. Нумерация рисунков согласно табл. 2:

ж, з – режим № 4; и, к – исходный № 5; л, м – режим № 6

Fig. 3. (continuation). AFM-photographs of the ceramic surface. Figure numbering according to Table 2: zh, z – mode №4; i, k – initial (№5); l, m – mode №6

На рис. 3б-м представлены микрофотографии поверхности керамических изделий с помощью АСМ-исследования в зависимости от режима плазменной обработки. На рис. 3к (исходный образец) наблюдалась значительная неравномерность распределения зерен по размерам. Для всех режимов обработки наблюдалась равномерное распределение зерен по размерам, а также отсутствие острых граней у зерен. Это могло происходить за счет проплавления зерен на поверхности керамики за счет имплантации ионами с энергиями

30...100 эВ [13], генерируемых из ВЧ разряда пониженного давления.

Следующим этапом в исследовании изменения адгезионных сил поверхности корундовой керамики после плазменной модификации являлось измерение краевого угла смачивания. На рис. 4 представлено сравнение растекание капли воды для исходной керамики (а) и обработанной (б) в режиме № 1 табл. 2. На рис. 5 представлена графическая зависимость краевого угла смачивания для различных режимов модификации с исходным образцом с течением времени. Для всех режимов

наблюдалось уменьшение краевого угла смачивания. После плазменной обработки наблюдалось увеличение краевого угла смачивания с 7...10° в первый час после обработки до 21...29° через сутки после

обработки. Это связано с релаксацией долгоживущих радикалов, образованных в процессе обработки, на поверхности керамики.

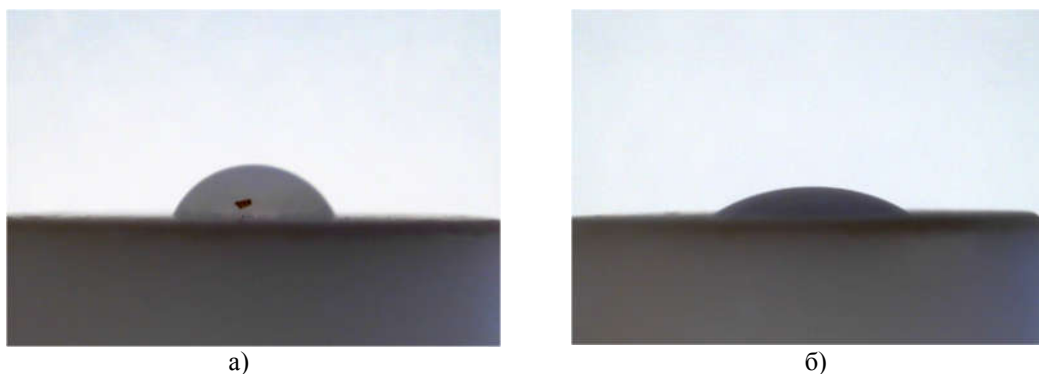


Рис. 4. Определение угла смачиваемости у необработанного образца (а) и обработанного образца (б) (режим №4 табл. 2). Увеличение x2,5
 Fig. 4. Determination of wettability angle of untreated sample (a) and treated sample (b) (mode №4 of Table 2). Magnification x2.5

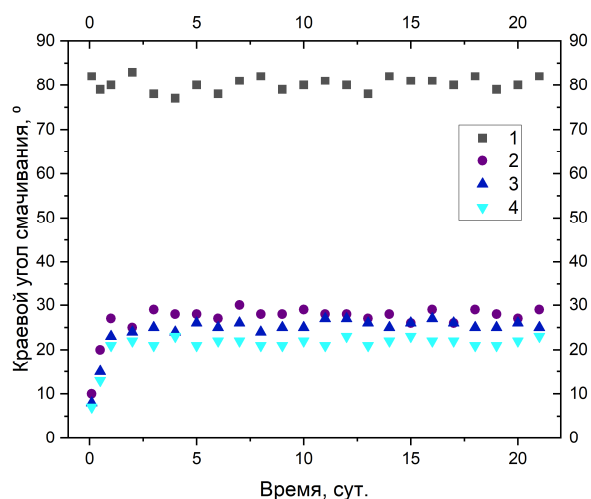


Рис. 5. Зависимость краевого угла смачивания от времени. 1 – исходный, 2 – режим №1 (табл. 2), 3 – режим №2 (табл. 2), 4 – режим №4 (табл. 2).
 Fig. 5. Dependence of wetting edge angle on time. 1 - initial, 2 - mode No.1 (Table 2), 3 - mode No.2 (Table 2), 4 - mode No.4 (Table 2).

Важнейшим преимуществом корундовой керамики является ее высокая прочность. В связи с этим поставлена задача по увеличению данного свойства, а именно предела прочности при изгибе и модуля упругости при изгибе.

Результаты испытаний представлены на рис. 6 и табл. 3. По результатам испытаний наилучшим режимом обработки определен режим № 4 табл. 2. Согласно данным работы [13], при расходах газа бо-

лее 0,08 г/с существенно увеличивается тепловой поток на поверхность обрабатываемых изделий. В сочетании с высокой мощностью, подаваемой в разряд, к поверхности тела подается значительное количество энергии, что позволяет производить проплавления зерен, находящихся на поверхности, что видно из результатов АСМ-исследования (рис. 3). Такие проплавления зеренной структуры позволяют заполнить нанопоры и нанотрещины на

поверхности керамики, что позволяет увеличить стойкость в внешнем воздействии. Данное утверждение подтверждает наблюдение незначительного укрупнения

размеров зерен на поверхности керамики (рис. 3а, в, д, ж, л) по сравнению с исходным образцом (рис. 3и).

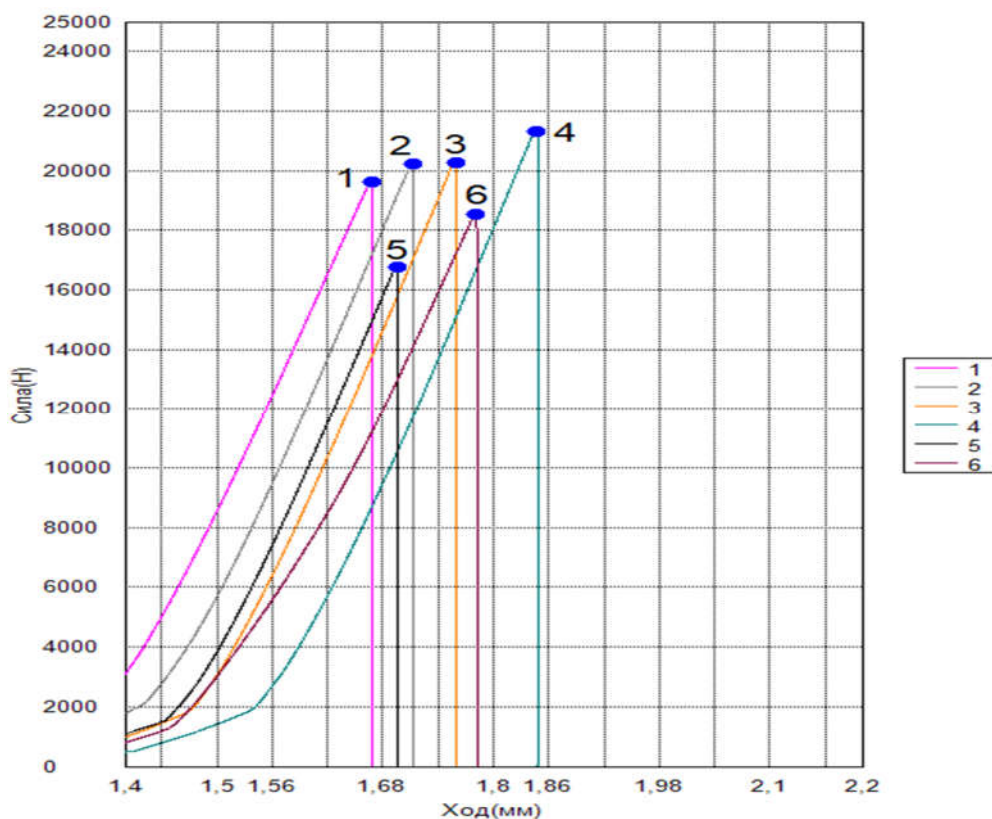


Рис. 6. Определение предела прочности при изгибе в зависимости от режима плазменной модификации согласно табл. 2: 1- режим №1; 2 – режим №2; 3 – режим №3; 4 – режим №4; 5 – исходная (№5); 6 – режим №6.

Fig. 6. Determination of the bending strength limit depending on the plasma modification mode according to Table 2: 1 - mode No. 1, 2 - mode No. 2, 3 - mode No. 3, 4 - mode No. 4, 5 - initial (No. 5), 6 - mode No. 6.

По результатам исследований адгезионной прочности и предела прочности при изгибе режим, позволивший добиться улучшения обоих из упомянутых выше параметров, являлся режим № 4 табл. 2. Важным условием повышения предела прочности при изгибе и модуля упругости при изгибе являлось равномерное воздействие плазмы на всю поверхность керамического изделия. Для реализации данного условия применялась методика размещения изделий согласно рис. 7а. Однако в результате подобного размещения изделий повышалась адгезионная прочность со

всех сторон керамики, включая лицевую (рис. 4–5).

Для регулирования адгезионной прочности, а именно придания лиофобного эффекта с лицевой стороны керамического изделия, применялась повторная обработка с размещением согласно рис. 7б. В таком случае тыльная сторона керамики плотно прилегала к полке-оснастке и не подвергалась плазменному воздействию. Обработка производилась в плазме пропан-бутана, что гарантировало образовывание лиофобного покрытия [13].

Определение предела прочности при изгибе и модуля упругости в зависимости от режима плазменной модификации согласно табл. 2

Table 3

Determination of bending strength and modulus of elasticity depending on the mode of plasma modification according to Table 2

Режим, №	Нагрузка	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, МПа
1	19606,8	353,49	5412,50
2	20222,0	364,58	5759,85
3	20281,1	365,65	5823,11
4	21300,5	384,02	5831,06
5	16762,4	302,21	5481,02
6	18530,5	334,08	5483,05

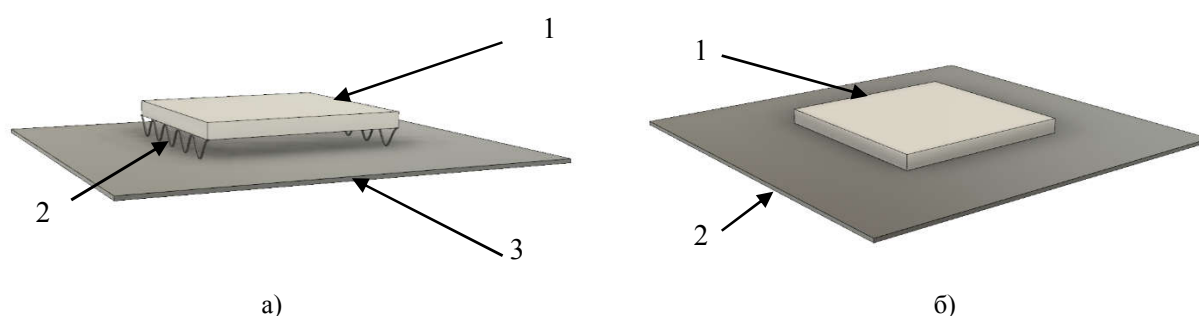


Рис. 7. Размещение керамических изделий в процессе обработки в плазме ВЧЕ разряда пониженного давления. а – обработка керамики для повышения механической прочности и адгезионной прочности всей поверхности: 1 – керамика, 2 волнообразная проволока, 3 – полка-оснастка. б – обработка керамики с целью придания лиофобного эффекта лицевой стороне изделия: 1 – керамика, 2 – полка-оснастка

Fig. 7. Placement of ceramic products in the process of treatment in the plasma of HCE discharge of reduced pressure. a) - Ceramics treatment to increase mechanical strength and adhesion strength of the whole surface: 1 - ceramics, 2 - wavy wire, 3 - shelf-fitting. b) - Ceramic treatment to give a lyophobic effect to the face of the product: 1 - ceramic, 2 - shelf support

Обсуждение/Заключение

АСМ-исследования, а также измерение угла смачиваемости показали возможность повышения адгезионной прочности поверхности корундовой керамики. Наибольший эффект увеличения адгезионных сил от модификации плазмой ВЧЕ разряда пониженного давления проявлен в первые сутки после проведения обработки. Спустя 1...2 суток угол смачивания выходит на плато, но оставался значительно ниже по сравнению с исходным образцом керамики.

Испытания по определению предела прочности при статическом изгибе для ре-

жима № 4 показали увеличение на 27 % по отношению к контрольному образцу, а модуля упругости при изгибе – на 6 % по отношению к контрольному образцу.

Таким образом, модификация поверхности технической корундовой керамики плазмой ВЧЕ разряда пониженного давления позволяет расширить спектр ее применений в различных отраслях промышленности за счет увеличения адгезионной прочности к подложкам из различных материалов, а также за счет увеличения механических характеристик керамики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абызов А. М. Оксид алюминия и алюмооксидная керамика (Обзор). Часть 1. Свойства Al_2O_3 и промышленное производство дис-

персного Al_2O_3 / А.М. Абызов //Новые огнеупоры. 2019. №. 1. С. 16-23.

2. Федотов А. В. Перспективы применения керамических материалов для потребностей АПК / А.В. Федотов, А.С. Дорохов, Д.А. Ковалев // Технический сервис машин. 2021. № 2. С. 91-102.
3. Масляев С. А. Повреждаемость оксида алюминия мощными импульсными потоками ионов, плазмы и лазерного излучения / С.А. Масляев // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 3. С. 5-17.
4. Костенко В. А. Исследование микро- и нанотвердости алюмооксидной керамики после обработки мощными импульсными ионными пучками / В.А. Костенко // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР; под общ. ред. В.Г. Лихачева. Томск, 2018. Т. 1. № 2. С. 102-105
5. Romanov I. G. High-power pulsed ion beam modification of the surface properties of alumina ceramics / I. G. Romanov, I.N. Tsareva // Technical Physics Letters. 2001. Т. 27. С. 695-697
6. Гынгазов С. А. Поверхностная модификация корундовой керамики ионным пучком аргона / С.А. Гынгазов // Перспективные материалы. 2018. № 8. С. 61-71
7. Степанов Е. И. Влияние добавок ультрадисперсного Al₂O₃ на физико-механические свойства корундовой керамики / Е. И. Степанов, М.В. Григорьев, В.И. Кирко // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2008. Т. 1. № 2. С. 162-167.
8. Маликова Е. В. Влияние добавок оксидов иттрия и магния на характеристики корундовой

бронекерамики / Е.В. Маликова // Огнеупоры и техническая керамика. 2013. № 4-5. С. 35-39.

9. Абдуллин И.Ш. Особенности формирования слоя положительного заряда при модификации изделий в струе высокочастотного ёмкостного разряда в условиях динамического вакуума / И. Ш. Абдуллин, В. С. Желтухин, И. К. Некрасов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. 2024. № 1. с. 30-40.
10. Гришанова И.А. Влияние природы и состава плазмообразующей среды на физико-механические свойства высокомодульных полиэтиленовых волокон / И.А. Гришанова, Е.А. Сергеева, С.В. Илюшина, М.Ф. Шаехов // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 10. С. 231-236.
11. Abdullin I.S. Modification of the surface of high-modulus polyethylene with low-energy low-intensity ion streams: theory and experiment / I.S. Abdullin, V. S. Zheltuhin, I.K. Nekrasov, F.R. Sagitova // PPR. 2022. Т. 23. № 4. Pp. 525-543
12. Abdullin I.S. Experimental and Theoretical Study of the Interaction of a Low-Energy Ion Flow with Chemical Fibers / I.S. Abdullin, V. S. Zheltuhin, I.K. Nekrasov, F.R. Sagitova // High Energy Chemistry. 2023. Т. 57. №1, pp.132-136.
13. Абдуллин И.Ш. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. / И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, Н.Ф. Кашапов - Казань: Изда-во Казан. ун-та, 2000, 348 с.

REFERENCES

1. Abyzov AM. Aluminum oxide and aluminum oxide ceramics (review). Properties of Al₂O₃ and industrial production of dispersed Al₂O₃. *Novye Ogneupory (New Refractories)*. 2019;1:16-23.
2. Fedotov AV, Dorokhov AS, Kolev DA. Prospects of using ceramic materials for the needs of agriculture. *Machinery Technical Service*. 2021;2:91-102.
3. Maslyayev SA. Damage to aluminum oxide by powerful pulsed streams of ions, plasma and laser radiation. *Physics and Chemistry of Materials Treatment*. 2015;3:5-17.
4. Kostenko VA. Study of micro- and nanohardness of alumina ceramics after treatment with powerful pulsed ion beams. *Collection of selected papers of TUSUR scientific session*. Tomsk. 2018;1(2):102-105.
5. Romanov IG, Tsareva IN. High-power pulsed ion beam modification of the surface properties of alumina ceramics. *Technical Physics Letters*. 2001;27:695-697.
6. Gyngazov SA. Surface modification of alumina ceramics by argon ion beam. *Perspektivnye Materialy*. 2018;8:61-71.

7. Stepanov EI, Grigoriev MV, Kirko VI. Influence of ultrafine Al₂O₃ additives on the physical and mechanical properties of alumina ceramics. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2008;1(2):162-167.
8. Malikova EV. Influence of yttrium and magnesium oxides additives on the characteristics of alumina armor ceramics. *Refractories and Technical Ceramics*. 2013;4-5:35-39.
9. Abdullin ISh, Zheltukhin VS, Nekrasov IK. Features of forming a layer of positive charge during modification of products in a high-frequency capacitive discharge jet under dynamic vacuum conditions. *Physics and Chemistry of Materials Treatment*. 2024;1:30-40.
10. Grishanova IA, Sergeeva EA, Ilyushina SV, Shaekhov MF. Influence of the nature and composition of the plasma-forming medium on the physical and mechanical properties of high-modulus polyethylene fibers. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta*. 2010;10:231-236.
11. Abdullin IS, Zheltukhin VS, Nekrasov IK, Sagitova FR. Modification of the surface of high-modulus polyethylene with low-energy low-

intensity ion streams: theory and experiment. PPOR. 2022;23(4):525-543.

12. Abdullin IS, Zheltukhin VS, Nekrasov IK, Sagitova FR. Experimental and theoretical study of the interaction of a low-energy ion flow with chemical fibers. High Energy Chemistry. 2023;57(1):132-136.

13. Abdullin IS, Zheltukhin VS, Kashapov NF. High-frequency plasma-jet processing of materials at low pressures. Theory and practice of application. Kazan: Kazan University Publishing House; 2000.

Информация об авторах:

Некрасов Игорь Константинович – заместитель директора, специалист в области высокочастотного разряда пониженного давления; Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, аспирант, тел/факс: (917) 289-21-15.

Абдуллин Ильдар Шаукатович – доктор технических наук, научный руководитель ООО «Плаз-

Nekrasov Igor Konstantinovich – Deputy Director, Specialist in the field of low-pressure high-frequency discharge; Kazan Federal University, Postgraduate Student, tel/fax: (917) 289-21-15.

Abdullin Ildar Shaukatovich – Doctor of Technical Sciences, Scientific Director of Plasma-VST LLC,

ма-ВСТ», специалист в области высокочастотного разряда и обработки металлов, тел/факс: (960) 084-80-84.

Мастюков Карим Шамилевич – магистрант, оператор Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ), тел/факс: (927) 445-55-04.

Specialist in the field of high-frequency discharge and metalworking, tel/fax: (960) 084-80-84.

Mastyukov Karim Shamilevich – Master's Degree Student, Operator of Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (KAI). tel/fax: (927) 445-55-04.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 13.02.2025; одобрена после рецензирования 20.02.2025; принята к публикации 27.02.2025. Рецензент – Химухин С.Н., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 13.02.2025; approved after review on 20.02.2025; accepted for publication on 27.02.2025. The reviewer is Khimukhin S.N., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher at the Institute of Materials Science of the Khabarovsk Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.