

**Иванова Ольга Александровна<sup>\*1</sup>**

управляющий, индивидуальный предприниматель ООО «Копыловский кирпичный завод», аспирант кафедры прикладной механики и материаловедения, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия  
[olgarik2022@gmail.com](mailto:olgarik2022@gmail.com), ORCID ID: 0009-0008-9539-9339

**Семеновых Марк Андреевич<sup>2</sup>**

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики и материаловедения, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия, [semenovykhmark@gmail.com](mailto:semenovykhmark@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7928-7689

**Скрипикова Нелли Карповна<sup>3</sup>**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и материаловедения, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия, [nks2003@mail.ru](mailto:nks2003@mail.ru), ORCID ID: 0000-0003-3384-9564

**ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ: КАК МЕТОД ДОСТИЖЕНИЯ КЛИНКЕРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В КЕРАМИКЕ**

**Аннотация.** В работе обобщены современные методы формирования защитно-декоративных покрытий на строительных материалах с применением низкотемпературной плазмы. Проанализирована эволюция технологий плазменной обработки и выявлены основные факторы, влияющие на качество и срок службы получаемых покрытий. Показано, что использование плазменного напыления и оплавления способствует существенному увеличению адгезионной прочности покрытия к основанию, улучшению внешнего вида поверхности, уменьшению водопоглощения и росту химической стойкости. Установлено, что за счет локального высокоэнергетического воздействия плазмы обеспечивается формирование плотного, мелкокристаллического поверхностного слоя с пониженной пористостью и высокой однородностью структуры. Это, в свою очередь, повышает износостойкость и морозостойкость обработанных материалов, а также их устойчивость к воздействию агрессивных сред и ультрафиолетового излучения. Отмечено, что предварительная подготовка поверхности и выбор состава напыляемых материалов играют решающую роль в достижении стабильных эксплуатационных характеристик покрытий. Отдельное внимание уделено влиянию режимных параметров процесса — мощности плазменного разряда, скорости перемещения плазмотрона, расстояния до обрабатываемой поверхности и состава плазмообразующего газа — на формирование структуры и физико-химические свойства поверхностного слоя. Показано, что оптимизация данных параметров позволяет целенаправленно регулировать толщину покрытия, его шероховатость и уровень остаточных напряжений.

**Ключевые слова.** плазменная обработка, строительные материалы, защитно-декоративные покрытия, низкотемпературная плазма, плазмотрон, термическое оплавление, стекловидный слой, адгезия, технология отделки.

**Иванова Ольга Александровна<sup>\*1</sup>**

"Копылов кірпіш зауыты" ЖШҚ басқарушысы, жеке кәсіпкер, қолданбалы механика және материалтану кафедрасының аспиранты,  
Томск мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті, Томск, Ресей  
[olgarik2022@gmail.com](mailto:olgarik2022@gmail.com), ORCID ID: 0009-0008-9539-9339

**Семенов Марк Андреевич<sup>2</sup>**

техника ғылымдарының кандидаты, Қолданбалы механика және материалтану кафедрасының доценті, Томск мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті, Томск, Ресей,  
[semenovykhmark@gmail.com](mailto:semenovykhmark@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7928-7689

**Скрипикова Нелли Карповна<sup>3</sup>**

техника ғылымдарының докторы, профессор,  
Қолданбалы механика және материалтану кафедрасының профессоры, Томск мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті, Томск, Ресей, [nks2003@mail.ru](mailto:nks2003@mail.ru), ORCID ID: 0000-0003-3384-9564

**ҚҰРЫЛЫС МАТЕРИАЛДАРЫН ПЛАЗМАЛЫҚ ӨНДЕУ: КЕРАМИКАДА  
КЛИНКЕРЛІК КӨРСЕТКІШТЕРГЕ ЖЕТУ ӘДІСІ РЕТІНДЕ**

*Аннотация.* Жұмыста төмен температуралы плазманы қолдану арқылы құрылыс материалдарының бетінде қорғаныш-декоративтік жабындарды қалыптастырудың заманауи әдістері жинақталып қарастырылған. Плазмалық өңдеу технологияларының даму эволюциясы талданып, алынатын жабындардың сапасы мен қызмет ету мерзіміне әсер ететін негізгі факторлар анықталған. Плазмалық бұрку мен оплавление әдістерін қолдану жабынның негізбен ілінісу беріктігін едәуір арттыруға, бетінің сыртқы көрінісін жақсартуға, су сіңіргіштігін төмендетуге және химиялық төзімділігін арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Плазманың жергілікті жоғары энергиялы әсері нәтижесінде кеуектілігі төмен, құрылымы біртекті және ұсақкристалды тығыз беткі қабаттың қалыптасатыны анықталған. Бұл, өз кезегінде, өңделген материалдардың тозуға және аязға төзімділігін, сондай-ақ агрессивті орта мен ультракүлгін сәулеленуге қарсы тұрақтылығын арттырады. Беткі қабатты алдын ала дайындау және бүркелетін материалдың құрамын дұрыс таңдау жабындардың тұрақты пайдалану сипаттамаларын қамтамасыз етуде шешуші рөл атқаратыны атап өтілген. Процестің режимдік параметрлерінің — плазмалық разряд қуатының, плазмотронның орын ауыстыру жылдамдығының, өңделетін бетке дейінгі қашықтықтың және плазма түзуші газ құрамының — беткі қабаттың құрылымы мен физика-химиялық қасиеттерінің қалыптасуына әсері ерекше қарастырылған. Осы параметрлерді оңтайландыру жабынның қалыңдығын, бетінің кедір-бұдырлығын және қалдық кернеулер деңгейін мақсатты түрде реттеуге мүмкіндік беретіні көрсетілген.

*Кілт сөздер.* плазмалық өңдеу, құрылыс материалдары, қорғаныш-декоративтік жабындар, төмен температуралы плазма, плазмотрон, термиялық оплавление, шынытәрізді қабат, адгезия, әрлеу технологиясы.

**Ivanova Olga Alexandrovna<sup>\*1</sup>**

managing Director, sole proprietor of Kopylovsky Brick Factory LLC, postgraduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Science, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia  
[olgarik2022@gmail.com](mailto:olgarik2022@gmail.com), ORCID ID: 0009-0008-9539-9339

**Semenov Mark Andreevich<sup>2</sup>**

candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Science, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia, [semenovykhmark@gmail.com](mailto:semenovykhmark@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7928-7689

**Skripikova Nelly Karpovna<sup>3</sup>**

doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Science, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia, [nks2003@mail.ru](mailto:nks2003@mail.ru), ORCID ID: 0000-0003-3384-9564

**PLASMA TREATMENT OF BUILDING MATERIALS: AS A METHOD OF ACHIEVING CLINKER PERFORMANCE IN CERAMICS**

**Abstract.** The paper summarizes modern methods for forming protective and decorative coatings on construction materials using low-temperature plasma. The evolution of plasma treatment technologies is analyzed, and the key factors affecting the quality and service life of the resulting coatings are identified. It is shown that the use of plasma spraying and plasma remelting leads to a significant increase in coating adhesion to the substrate, improvement of surface appearance, reduction in water absorption, and enhancement of chemical resistance. It has been established that due to the localized high-energy воздействие of plasma, a dense fine-crystalline surface layer with reduced porosity and high structural homogeneity is formed. This, in turn, increases the wear resistance and frost resistance of the treated materials, as well as their resistance to aggressive environments and ultraviolet radiation. It is noted that surface pretreatment and the selection of the sprayed material composition play a decisive role in achieving stable performance characteristics of the coatings. Special attention is paid to the influence of process parameters—plasma discharge power, plasma torch travel speed, distance to the treated surface, and the composition of the plasma-forming gas—on the formation of the structure and physicochemical properties of the surface layer. It is shown that optimization of these parameters makes it possible to purposefully control the coating thickness, surface roughness, and the level of residual stresses.

**Keywords.** plasma treatment, building materials, protective and decorative coatings, low-temperature plasma, plasmatron, thermal melting, glassy layer, adhesion, finishing technology.

**Введение.** В строительной индустрии сохраняется высокая актуальность разработки технологий, обеспечивающих долговечность, экономичность и эстетическую выразительность защитно-декоративных покрытий. Традиционные способы отделки, включающие применение лицевого кирпича, глазурованной плитки и кремнийорганических красок, обладают рядом ограничений, связанных с высокой себестоимостью, дефицитностью сырья и ограниченной стойкостью к воздействию внешней среды. В связи с этим особый интерес представляет направление, основанное на термической обработке поверхности строительных материалов, при котором стекловидное покрытие формируется непосредственно на изделии без использования дополнительных облицовочных элементов.

Исторически первой технологией стала газопламенная обработка, однако ее широкое применение оказалось ограниченным из-за недостаточной температуры пламени и низкой производительности. Развитие плазменной техники позволило перейти к более

эффективным методам, использующим низкотемпературную плазму с высокой энтальпией теплоносителя. Совершенствование конструкции плазмотронов и увеличение ресурса их работы до 200 часов обеспечили возможность практического применения плазменных технологий в строительстве. Основными направлениями стали плазменное напыление, оплавление поверхности плазменным потоком и комбинированные методы, сочетающие оба способа [1]

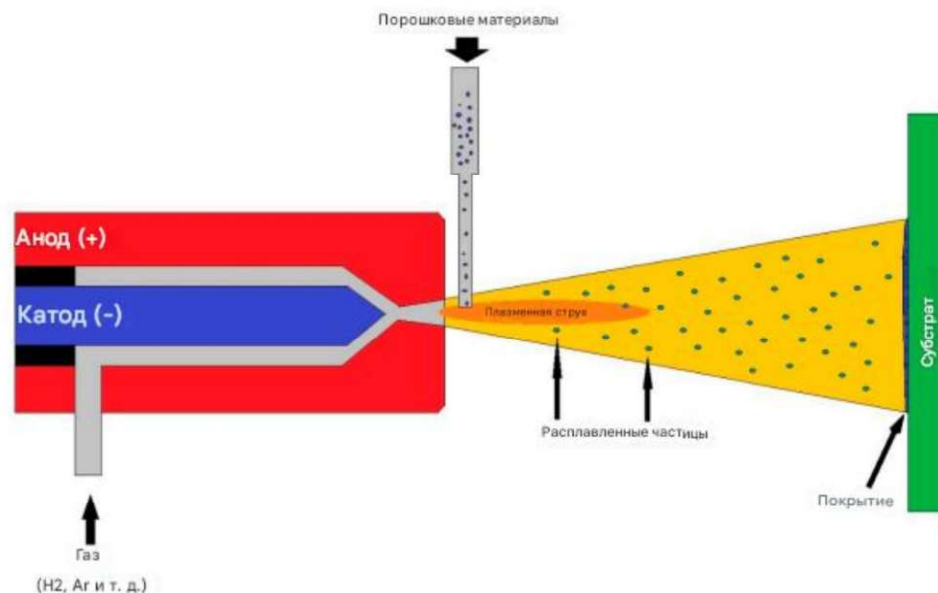


Рисунок 1 - Процесс нанесения покрытия плазменным напылением

**Материалы и методы исследований.** Первые результативные эксперименты по применению плазменного оплавления к строительным материалам, включая тяжелые бетоны, ячеистые бетоны и кирпич, были выполнены в начале 1960-х годов, в частности в 1963 году. Экспериментальные данные показали, что использование плазменной струи позволяет увеличить производительность обработки в 2,5–3 раза по сравнению с традиционными газопламенными способами, одновременно снижая тепловую нагрузку на основной массив материала. Полученные результаты подтвердили высокую перспективность плазменных методов для формирования стеклообразных защитных слоев с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Одним из определяющих критериев эффективности плазменной обработки является адгезионная прочность сформированного покрытия к подложке. Для таких материалов, как силикатный кирпич и керамзитобетон, значения напряжений отрыва находятся в диапазоне 0,9–2,8 МПа. Данный показатель в значительной степени определяется энергетическими параметрами плазмотрона, скоростью перемещения плазменного факела, а также качеством перекрытия соседних проходов. В процессе термического воздействия между покрытием и основным материалом образуется переходный слой, включающий стекловидные и кристаллические фазы, что обеспечивает прочное сцепление и постепенный переход физико-механических свойств [2].

Технология плазменного оплавления предоставляет широкие возможности для варьирования декоративных характеристик покрытий. За счет изменения режимов нагрева и введения различных минеральных компонентов — отходов стекольного

производства, гранита, диопсида, керамзитового песка, а также солей металлов — достигается разнообразие цветовых оттенков и текстур поверхности. Толщина защитного слоя может изменяться в пределах 0,15–2,0 мм. Полученные покрытия отличаются высокой химической инертностью, низким водопоглощением, минимальной открытой пористостью и повышенной морозостойкостью, сохраняя целостность при до 50 циклах замораживания и оттаивания.

Стабильность качества плазменно сформированных покрытий напрямую зависит от соблюдения оптимальных технологических режимов. Рекомендуемая скорость перемещения плазмотрона составляет 0,045–0,2 м/с при рабочей мощности в диапазоне 30–55 кВт. Существенным технологическим условием является предварительное высушивание обрабатываемых изделий до остаточной влажности 1,5–3 %. Нарушение данного требования приводит к возникновению дефектов и локальных разрушений покрытия, обусловленных интенсивным испарением влаги в зоне высоких температур.

Изменения микроструктуры материала под действием плазменной обработки подтверждаются результатами рентгенофазового анализа и электронно-микроскопических исследований. В поверхностном слое фиксируется процесс остекловывания, разложение гидросиликатов кальция, формирование аморфной фазы и частичное закрытие микротрещин. Образовавшаяся структура характеризуется стекловидно-пористым строением и пониженным модулем упругости, что повышает ее сопротивляемость термическим и механическим нагрузкам [3].

Для адаптации плазменной технологии к различным видам строительных материалов целесообразно применение промежуточных слоев с пониженной теплопроводностью, сформированных на основе перлита, керамзита или легких минеральных наполнителей, а также использование специальных паст на жидкостекольной основе. Такой подход позволяет минимизировать риск образования трещин и предотвратить деформационные повреждения, возникающие вследствие термических напряжений и фазовых превращений кварца.

Результаты экспериментальных исследований и практических испытаний свидетельствуют о том, что плазменная обработка является эффективной и экономически обоснованной альтернативой традиционным методам термического воздействия. Технология обеспечивает получение долговечных, химически стойких и декоративно выразительных покрытий, обладающих широкими возможностями применения в архитектурно-художественном оформлении фасадов и внутренних пространств. Использование плазменных методов способствует увеличению срока службы строительных конструкций, снижению материалоемкости и сокращению эксплуатационных затрат [4].

Таким образом, внедрение плазменных технологий в строительную индустрию представляет собой перспективное направление развития современной инженерной практики, ориентированной на повышение качества, энергоэффективности и рационального использования ресурсов, а также на создание новых материалов с улучшенными эксплуатационными и эстетическими характеристиками.

**Результаты и их обсуждение.** В рамках настоящего исследования была поставлена задача изучения изменений физико-механических свойств керамических изделий, содержащих различные количества отходов горных пород — альбитофира, а также отходов нефтедобычи. Основной целью работы являлось повышение прочностных и эксплуатационных характеристик керамических образцов путем их обработки низкотемпературной плазмой.

Нефтяные шламы относятся к категории сложных многокомпонентных отходов, формирующихся на этапах добычи, транспортировки и переработки углеводородного

сырья. Они представляют собой устойчивые эмульсионные системы, включающие нефтепродукты, воду, твердые механические примеси (глинистые частицы, оксиды металлов, песок) и остаточные химические реагенты. Значительная вариативность состава и свойств нефтяных шламов в зависимости от источника образования существенно осложняет процессы их переработки и утилизации.

Альбитофир является мелкозернистой вулканической породой, в минеральном составе которой преобладает альбит. Материал отличается высокой прочностью, соответствующей марке М1400, крайне низким водопоглощением и повышенной стойкостью к абразивному износу. Существенным преимуществом альбитофира является его высокая морозостойкость, достигающая до 300 циклов замораживания и оттаивания, что обеспечивает устойчивость к экстремальным температурным условиям эксплуатации.

В технологии производства клинкерной керамики альбитофир используется в качестве отощителя — структурной добавки, регулирующей процессы усадки и спекания глинистой массы. Его введение в шихту способствует формированию плотной, мелкопористой структуры керамического черепка в процессе обжига, что приводит к снижению водопоглощения и повышению механической прочности готовых изделий.

Эффективность применения альбитофира в значительной степени определяется его гранулометрическим составом. Использование мелкодисперсных фракций с размером частиц менее 0,5 мм обеспечивает равномерное распределение добавки в глиняной массе и способствует формированию оптимальной структуры материала. Напротив, применение более крупных зерен может приводить к увеличению пористости и снижению прочностных характеристик изделий.

Клинкерная керамика представляет собой высококачественный строительный материал, получаемый в результате специальной технологии переработки минерального сырья. Производственный процесс основан на использовании тщательно подобранной смеси тугоплавких и легкоплавких глин с минеральными добавками, подвергаемой высокотемпературному обжигу при 1000–1150 °С. Интенсивное спекание при данных температурах приводит к формированию плотной мелкопористой структуры, определяющей уникальные эксплуатационные свойства клинкера. Технология изготовления требует строгого контроля всех стадий — от подготовки шихты с заданной гранулометрией до точного соблюдения температурно-временных режимов обжига. Минеральные добавки, включая альбитофир, выполняют функцию отощителей и оказывают существенное влияние на процессы спекания и структуру конечного продукта, при этом размер частиц добавок напрямую отражается на плотности и пористости материала [5].

К основным эксплуатационным характеристикам клинкерной керамики относятся крайне низкое водопоглощение, как правило не превышающее 4–6 %, и высокая прочность на сжатие, достигающая и превышающая 100 МПа. Эти показатели обеспечивают материалу исключительную долговечность, высокую морозостойкость и устойчивость к механическим нагрузкам. Низкая пористость обуславливает его стойкость к воздействию агрессивных сред, температурным перепадам и циклическому замораживанию-оттаиванию. Эстетические свойства клинкера проявляются в насыщенной цветовой палитре, преимущественно терракотовых тонов, а также в высокой точности геометрических форм.

Область применения клинкерной керамики охватывает широкий спектр строительных задач, требующих повышенной надежности и износостойкости. Материал широко используется для изготовления лицевого кирпича, тротуарной плитки, напольных и облицовочных покрытий. Способность воспринимать значительные

механические нагрузки и сопротивляться истиранию делает клинкер особенно востребованным в зонах интенсивной эксплуатации. Современные исследования направлены на разработку новых составов сырьевых смесей и совершенствование технологических режимов с целью дальнейшего улучшения свойств и расширения сфер применения данного высокотехнологичного материала.

В ходе экспериментальной части исследования в качестве исходного сырья использовались:

1. Красножгущееся глинистое сырье Воронинского месторождения (далее “Красная”);
2. Светложгущееся глинистое сырье Суворовского месторождения, сорт “Рыжая” (Кайла);
3. Отходы горных парод (далее “Альбитофир”);
4. Отходы нефтедобычи;

В эксперименте были исследованы 3 разных состава в виде балочек и с различным содержанием перечисленных сырьевых компонентов. На начальном этапе мы лишь сформовали и обожгли данные составы, их экспериментальные данные и результаты их первичных исследований приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1 - Экспериментальные составы шихты. Без плазменной обработки

Маркировка	Сырьевые материалы, %				Тобж, °С
	Красная (Воронино)	Глина Рыжая (Кайла)	Альбитофир	Нефтяные отходы	
ЭН-15-5	42,5	37,5	15	5	1150
ЭН-15-10	40	35	15	10	1150
К-ЛК	45	40	15	-	1100

Составы исследуемых масс рассчитывались на сухое вещество (приведены к 100%), компоненты смешивались в воздушно-сухом измельченном состоянии (проход молотой глины через сито 1.0).

Образцы формовались в виде балочек с размером 68x32x16мм и образцы в виде плиток размером 110x110x16мм, сушились в течении 24 часов на воздухе и не менее 6 часов в сушильном шкафу при температуре 105±5° С. Обжиг проводился в муфельных печах при температуре 1100°С, 1150°С и выдержкой 6 часов. Для определения керамических свойств данных сырьевых составов были определены следующие характеристики:

1. Линейные усадки - l, %;
2. Водопоглощение - W, %;
3. Остаток на сите №004;
4. Цвет.

Результаты проведенных исследований керамических свойств обожжённых образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2- Результаты испытаний экспериментальных составов. Без плазменной обработки

Маркировка	Линейка усадка, %			W, %
	Возд, %	Огн, %	Общ.	
ЭН-15-5	2,63	4,58	7,1	5,25
ЭН-15-10	5,13	3,65	8,6	6,88
К-ЛК	6,00	3,23	9,03	2,98



Рисунок 2 - Экспериментальные образцы. До обработки плазмой

В таблице 3, определялась площадь образцов, фиксировалась нагрузка на шкале прессы, выполнен расчет прочности при сжатии, и выведен средний показатель прочности по разным составам шихты.

Таблица 3 – Результаты испытаний образцов на прочность

№	Шифр образца	Площадь образца, см <sup>2</sup>	Нагрузка, кН	Прочности при сжатии, МПа	Средняя прочность при сжатии, МПа
1	К-ЛК 1	16,94	58,6	104,66	103,3
2	К-ЛК 2		186,9	110,36	
3	К-ЛК 3		163,1	96,3	
4	ЭН-15-5 1		147	86,8	76,7
5	ЭН-15-5 2		128,8	76,0	
6	ЭН-15-5 3		114,3	67,2	
7	ЭН-15-10 1		172,1	78,5	69,3
8	ЭН-15-10 2		78,9	57,9	
9	ЭН-15-10 3		136	71,5	

Результаты испытаний по прочности показывают, альбитофир способствует спеканию и прочности, в связи с образованием плотной мелкопористой структуры, но стоит обратить внимание, что с увеличением в составе шихты органических примесей (нефтяных шламов) спекание черепка происходит в меньшей степени, что наглядно видно по снижению прочности образцов с данным составом.

Основным негативным фактором выступает пиролиз углеводородов в интервале температур 300–600°C, в результате которого образуются мелкодисперсные углеродистые продукты — сажа и кокс. Эти термически устойчивые вещества формируют на поверхности глинистых частиц изолирующий барьер, препятствующий непосредственному контакту минеральных компонентов и блокирующий

диффузионные процессы, необходимые для начала спекания и фазообразования. Дополнительным осложнением является газовыделение при окислении остаточных углеводов в зоне спекания, создающее в пластичной матрице черепка систему изолированных пор и капилляров. Эти газовые включения не только увеличивают общую пористость материала, но и создают внутреннее давление, противодействующее уплотнению керамической массы. Кроме того, присутствие углеводородной фазы нарушает однородность структуры сырца, создавая локальные зоны с различным спекающим поведением, что приводит к образованию напряжений и микротрещин. Следствием этих процессов становится формирование рыхлой, недостаточно уплотненной структуры с повышенным водопоглощением и пониженной механической прочностью, что особенно критично для клинкерной керамики, где требуются минимальная пористость и максимальная плотность черепка.

Современные требования к строительным материалам диктуют необходимость повышения их долговечности, декоративности и эксплуатационной надежности при одновременном снижении производственных затрат и экологической нагрузки. В этой связи актуальным направлением исследований является разработка и совершенствование технологий модификации поверхности строительных изделий методами высокоэнергетического воздействия, в частности, обработкой низкотемпературной плазмой[6].

Плазменная обработка обеспечивает возможность локального изменения структуры поверхностного слоя без существенного нагрева внутреннего объема материала. В результате на поверхности образуется остеклованный или кристаллизованный слой, обладающий повышенной плотностью, химической стойкостью и гидрофобными свойствами. Такие преобразования потенциально приводят к улучшению эксплуатационных характеристик материала — в первую очередь, прочности сцепления, износостойкости, морозостойкости и снижению водопоглощения.

Несмотря на значительное количество экспериментальных и теоретических работ в области плазменной технологии, влияние режимов обработки (мощности плазматрона, скорости перемещения, расстояния до поверхности и параметров предварительной подготовки образцов) на физико-механические свойства строительных материалов требует дополнительного изучения. Особенно важным представляется исследование взаимосвязи между степенью остекловывания поверхностного слоя и такими показателями, как предел прочности при изгибе и коэффициент водопоглощения, поскольку именно эти характеристики определяют долговечность и устойчивость материалов к циклическим воздействиям внешней среды.

Результаты исследования позволяют уточнить технологические режимы, обеспечивающие оптимальное сочетание защитных и эксплуатационных свойств покрытия, что представляет практический интерес для строительной индустрии и производства отделочных материалов нового поколения.

В результате обработки образцов состава К–ЛК плазмой на их поверхности сформировался выраженный темный глянцевый слой. На фотографиях видно, что данный слой имеет чёрный или почти чёрный оттенок и отличается характерным блеском, что делает его хорошо заметным на фоне исходного материала. Он выглядит как плотная застывшая корочка, образовавшаяся непосредственно в зоне контакта плазмы с поверхностью образца.

Покрытие распределено неравномерно: на некоторых участках наблюдаются более объёмные наплывы, тогда как другие зоны выглядят тоньше и ровнее. Это указывает на неодинаковую степень воздействия плазмы на разные части поверхности. Границы обработанной области хорошо прослеживаются — необработанная часть образца

сохраняет естественный красновато-коричневый цвет и матовую текстуру, тогда как плазменный слой резко контрастирует с ней по цвету и блеску.

При сравнении трёх образцов можно отметить, что характер сформировавшегося слоя у всех похожий, однако степень наплывов и площадь покрытия слегка различаются. Это отражает небольшие вариации условий обработки или положения образцов относительно плазменного потока.



Рисунок 3 - Экспериментальные образцы. После обработки плазмой

В таблице 4 приведены исследования образцов с плазменной обработкой, на водопоглощение.

Таблица 4 – Результаты исследований образцов после плазменной обработки

Наименование	W% (Водопоглощение)
К-ЛК	2,32

Из данных таблицы №4 мы можем наблюдать выраженное снижение водопоглощения всех исследованных образцов после плазменной обработки. Выраженный эффект наблюдается у материала К-ЛК, где водопоглощение сократилось с 2,98 до 2,32 %, то есть на 22,1 %. Эти данные отражают устойчивую тенденцию к снижению проницаемости и пористости поверхностного слоя в результате плазменного воздействия.

Характер отмеченного эффекта объясняется формированием на поверхности образцов остеклованного слоя с пониженной открытой пористостью. Под действием высокотемпературного плазменного потока происходят размягчение, частичное плавление и последующее переуплотнение поверхностных частиц, что приводит к залечиванию микротрещин и сокращению количества капиллярных пор. Дополнительно фиксируемое уменьшение водопоглощения свидетельствует о снижении капиллярной всасывающей способности и повышении барьерных качеств модифицированного слоя. В таблице 5 приведены данные по изменению показателя прочности для образцов с плазменной обработкой.

Таблица 5 – Результаты испытаний образцов на прочность

№	Шифр образца	Площадь образца, см <sup>2</sup>	Нагрузка, кН	Прочности при сжатии, МПа
1	К-ЛК 1	16,94	71,2	132,78945632

Наряду с уменьшением водопоглощения мы можем наблюдать увеличение прочности обработанных образцов, что согласуется с механизмами структурного преобразования при плазменной обработке. Высокие скорости нагрева и последующего охлаждения способствуют формированию аморфно-кристаллической структуры с более плотной упаковкой частиц. Повышение прочности объясняется улучшением когезии и адгезии поверхностного слоя, а также перераспределением внутренних напряжений вследствие уплотнения матрицы. Образующийся стекловидный слой действует как армирующее покрытие, принимающее часть эксплуатационных нагрузок и препятствующее развитию дефектов.[7]

**Выводы.** Таким образом, совокупность полученных данных подтверждает, что плазменная обработка является эффективным способом модификации строительных материалов, обеспечивающим одновременное снижение водопоглощения и увеличение прочностных характеристик. Формирование плотного, слабо пористого, стекловидного слоя обеспечивает повышение долговечности материалов, улучшает их устойчивость к циклическим воздействиям влаги и температур и расширяет возможности их применения в условиях повышенных эксплуатационных требований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмедов А.А. Плазменные технологии в строительстве. — Москва: Стройиздат, 2018. — 236 с.
2. Кузнецов В.Г., Синицын Ю.А. Физико-химические основы формирования плазменных покрытий. — Санкт-Петербург: Наука, 2015. — 312 с.
3. Иванов В.П., Лебедев С.Н. Плазменное напыление и оплавление строительных материалов. // Вестник строительной науки. — 2019. — № 4. — С. 45–52.
4. Семенов Ю.П., Морозов А.В. Влияние параметров низкотемпературной плазмы на структуру бетонных поверхностей. // Строительные материалы. — 2021. — № 7. — С. 30–35.
5. Иванова О. А., Семеновых М. А., Скрипникова Н. К. Исследование свойств клинкерной керамики на основе легкоплавкого и тугоплавкого сырья Сибирского региона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27, № 2. С. 174 – 184.
6. Румянцев А.Н., Герасимов И.В. Термическая модификация цементных композитов с использованием плазменных источников. — Екатеринбург: УрФУ, 2020. — 154 с.
7. Skripikova N.K., Semenovych M.A. Development of plasma technologies for surface vitrification of construction materials. // Journal of Building Physics. — 2022. — Vol. 45, No. 8. — P. 1103–1116.

#### REFERENCES

1. Akhmedov A.A. Plazmennyye tekhnologii v stroitel'stve [Plasma technologies in construction]. Moskva: Strojizdat, (2018). S. 236. – (In Rus)

2. Kuznecov V.G., Sinicyn Yu.A. Fiziko-khimicheskie osnovy formirovaniya plazmennyyh pokrytij [Physico-chemical bases of plasma coatings formation]. Sankt-Peterburg: Nauka, 2015. 312 s. – (In Rus)
3. Ivanov V.P., Lebedev S.N. Plazmennoe napylenie i oplavlenie stroitel'nyh materialov [Plasma spraying and melting of building materials]. Vestnik stroitel'noj nauki, (2019). № 4. S. 45–52. – (In Rus)
4. Semenov Yu.P., Morozov A.V. Vliyanie parametrov nizektemperaturnoj plazmy na strukturu betonnyh poverhnostej [Influence of low-temperature plasma parameters on the structure of concrete surfaces]. Stroitel'nye materialy, (2021). № 7. S. 30–35. – (In Rus)
5. Ivanova O.A., Semenovyx M.A., Skripnikova N.K. Issledovanie svojstv klinkernoj keramiki na osnove legkoplavkogo i tugoplavkogo syr'ya Sibirskogo regiona [Investigation of the properties of clinker ceramics based on low-melting and refractory raw materials of the Siberian region]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta, (2025). T. 27, № 2. S. 174–184. – (In Rus)
6. Rumyancev A.N., Gerasimov I.V. Termicheskaya modifikaciya cementnyh kompozitov s ispol'zovaniem plazmennyyh istochnikov [Thermal modification of cement composites using plasma sources]. Ekaterinburg: UrFU, (2020). S. 154. – (In Rus)
7. Skripikova N.K., Semenovyx M.A. Development of plasma technologies for surface vitrification of construction materials. Journal of Building Physics, (2022). Vol. 45, No. 8. P. 1103–1116.