

УДК 691

## ПРЕИМУЩЕСТВО СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПЛАЗМЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

П.В. Балобанов<sup>1</sup>, О.Г. Волокитин<sup>2</sup>, В.В. Шеховцов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>соискатель кафедры прикладная механика и материаловедение, Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия, e-mail: [pv@tsuab.ru](mailto:pv@tsuab.ru)

<sup>2</sup>доктор технических наук, профессор кафедры прикладная механика и материаловедение, Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия, e-mail: [volokitin\\_oleg@mail.ru](mailto:volokitin_oleg@mail.ru)

<sup>3</sup>аспирант кафедры прикладная механика и материаловедение, Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия, e-mail: [shehovcov2010@yandex.ru](mailto:shehovcov2010@yandex.ru)

**Аннотация.** В работе приведено описание плазменных технологий и процессов взаимодействия энергии низкотемпературной плазмы со строительными изделиями. Изучены физические и физико-химические процессы, происходящие при взаимодействии низкотемпературной плазмы с твердым телом.

*Ключевые слова:* низкотемпературная плазма, силикатный расплав, физико-химические процессы, защитно-декоративные покрытия, строительные материалы.

## ADVANTAGE OF SPECIALIZED PLASMA GENERATORS AT PROCESSING BUILDING MATERIALS

Pavel Balobanov<sup>1</sup>, Oleg Volokitin<sup>2</sup>, Valentin Shekhovtsov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Postgraduate of Applied mechanics and materials science, Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia, e-mail: [pv@tsuab.ru](mailto:pv@tsuab.ru)

<sup>2</sup>Ph.D., Professor of Applied mechanics and materials science, Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia, e-mail: [volokitin\\_oleg@mail.ru](mailto:volokitin_oleg@mail.ru)

<sup>3</sup>Postgraduate of Mechanics - Technology Faculty, Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia, e-mail: [shehovcov2010@yandex.ru](mailto:shehovcov2010@yandex.ru)

**Abstract.** The paper describes the plasma technologies and processes of interaction of low-temperature plasma energy with building products. The physical and physicochemical processes occurring during the interaction of a low-temperature plasma with a solid are studied.

*Keywords:* low-temperature plasma, silicate melt, physicochemical processes, protective and decorative coatings, building materials.

**Введение.** Данная работа посвящена описанию разработки новых конструкций плазмотронов сотрудниками Томского государственного архитек-



турно-строительного университета (ТГАСУ) [1-3]. Фундаментальные исследования ученых были направлены на изучение физических и физико-химических процессов, происходящих при взаимодействии низкотемпературной плазмы с твердым телом, развитие теории дугового разряда. Развитие, исследование и разработка электродуговых генераторов плазмы первоначально были связаны с требованиями скоростной авиации и космонавтики. Низкотемпературная плазма оказалась необходимой для моделирования и анализа "теплового барьера" – возникновения плазмы около тел, движущихся в атмосфере со сверхзвуковой скоростью. В последние годы прогресс строительной индустрии сопровождается широким использованием электродуговой плазмы в различных технологических процессах производства качественно новых строительных материалов и изделий [4-8]. Такие свойства электродуговой плазмы, как мощная концентрация энергии в единице объема, высокая температура, определяющая большие скорости теплового воздействия на тела, помещенные в плазму и обеспечивающие протекание химических реакций с высокими скоростями, позволяют создать принципиально новые эффективные технологические процессы и оборудование, характеризующиеся экономичностью с точки зрения материалоемкости, а также экологической чистотой [9-14].

**Цель работы.** Разработка и создание на базе Томского государственного архитектурно-строительного университета специализированных генераторов плазмы для обработки поверхности различных видов строительных материалов.

**Основной материал и результаты исследований.**

Плазменная техника и технология – одна из тех отраслей стройиндустрии, где интересы производства и прикладных исследований наиболее тесным образом переплетаются с фундаментальной наукой. Без понимания и достоверного описания физических процессов, происходящих в термической низкотемпературной плазме, определяемых как многообразием взаимодействия компонентов плазмы, так и многофакторностью внешних воздействий, невозможны ни создание эффективно работающих плазмотронов, ни плазменных технологий.

**Плазменные генераторы с обжатой вынесенной дугой.** Одним из первоначальных этапов работы коллектива по созданию специализированных генераторов плазмы явились разработка и исследование плазмотрона с вынесенной обжатой дугой, предназначенного для обработки малоразмерных строительных изделий (изделия из древесины, кирпичи, плитки и т.п.) с целью получения на их поверхности покрытия. При разработке конструкции генератора учитывались факторы, которые отрицательно сказыва-



ются на сроке службы генератора, а также конструктивные недостатки существующих плазмотронов, которые существенно затрудняют технологию их изготовления и эксплуатацию:

1) при оплавлении строительных изделий пары щелочных металлов K, Na, входящие в состав материала, переносятся потоками плазмы из расплава на поверхность медного сопла-анода и подвергают ее сильному разрушению, что сокращает срок службы анода;

2) достаточно высокая стоимость меди и сложная технология изготовления анодного узла;

3) необходимость создания магнитного поля для перемещения анодного пятна дуги по поверхности сопла требует применения дополнительного электротехнологического устройства – соленоида;

4) затруднительность в возбуждении рабочей дуги при расстояниях между анодом и катодом более 150 мм;

5) большой ток дежурной дуги приводит к быстрому износу формирующего сопла катодного узла;

6) к сожалению, низкая пока еще на современном этапе культура строительного производства и обслуживания требует простоты и надежности конструкций генераторов.

С учетом всех этих факторов, а также на основании проведенных исследований по эрозии графитового электрода-анода была разработана конструкция генератора с вынесенным расходуемым графитовым электродом. Опыт длительной эксплуатации плазмотронов данного типа выявил некоторые недостатки, связанные с нестабильностью привязки анодного пятна в пространстве, что, в свою очередь, снижает качество полученных покрытий. С целью снижения негативных факторов, влияющих на качество получаемых покрытий, разработан плазменный генератор с дополнительной стабилизацией прианодной области дугового разряда. Разработанный генератор выполнен в виде трех водоохлаждаемых вращающихся дисков, оси вращения которых расположены под углом  $60^\circ$  относительно друг друга в одной плоскости, перпендикулярной оси симметрии дугового разряда. При вращении дисков анодного узла со скоростями 100-200 рад/с между дуговым шнуром и диском анода наблюдается, слабосветящаяся пограничная зона, обусловленная диффузной привязкой дугового разряда к анодным дискам. Кроме того, наблюдается локализованное анодное пятно: на одном из трех дисков анода. С помощью скоростной съемки установлено, что диаметр дугового разряда в прианодной области стабилен, а анодное пятно находится в плоскости, проходящей через оси трех дисков (скорость перемещения пятна по боковой поверхности диска совпадает с линейной скоростью вращения образующей диска) до увеличения напряженности электрического



поля прианодной области за счет механического воздействия двух остальных дисков. Новое анодное пятно, как правило, возникает в начале контакта токопроводящего дугового разряда с одним из дисков. Совместимость параметров равностороннего треугольника, образованного внутренним контуром образующих дисков анода и диаметром вписанной в него окружности токопроводящего дугового разряда, равенство скоростей вращения дисков, выполненных из одинакового материала, адекватное условие охлаждения дисков анода, имеющих равный потенциал относительно катода, позволяют с равной вероятностью образовывать анодное пятно на любом из трех дисков анода. При выполнении вышеуказанных условий обеспечивается стабилизация дугового шнура, приемлемая для условий автоматизированного производства плазмированных строительных изделий.

**Плазменный генератор для обработки большемерных строительных изделий.** Описанные выше плазменный генератор имеет узкий диапазон использования. Он может применяться для обработки малоразмерных изделий, обрабатываемая поверхность которых соизмерима с длиной дугового разряда. Естественно, что весьма актуальным является создание автоматизированного технологического процесса обработки большемерных строительных изделий (бетонных и газобетонных плит, панелей, блоков и т.п.). Это, в свою очередь, требует разработки специализированных генераторов плазмы, позволяющих обрабатывать широкую полосу поверхности за один проход.

Коллективом ТГАСУ созданы новые конструкции плазменных генераторов с электромагнитным перемещением дугового разряда, позволяющие обрабатывать изделие шириной 300 мм за один проход. Принцип работы генератора основан на электромагнитном перемещении дугового разряда по обрабатываемой поверхности строительного изделия. С целью обеспечения качественной обработки и получения при этом надежных защитно-декоративных покрытий на строительных изделиях были проведены исследования по:

1. изучению влияния внешнего магнитного поля и тока дуги на скоростные характеристики разряда;
2. установлению вольт-амперной характеристики плазмотрона;
3. определению величины эрозии электродов;
4. исследованию теплообмена плазменных потоков с поверхностью изделий.

На основе экспериментальных данных методом наименьших квадратов определена эмпирическая зависимость скорости перемещения дуги от тока и магнитной индукции. Максимальное относительное расхождение



экспериментальных значений скорости от расчетных значений не превышает 13%. Анализ вольт-амперных характеристик движущейся дуги позволил установить, что при токах 300-400 А кривые начинают выполаживаться и с увеличением тока дуги практически не меняются. Кроме того, с увеличением значений тока соленоида и соответственно магнитной индукции в межэлектродном пространстве при одинаковых значениях тока дуги происходит увеличение рабочего напряжения на дуге, что связано с процессами деионизации дугового разряда, возрастающими с увеличением скорости перемещения. Установлено, что при увеличении скорости перемещения дуги эрозия электродов снижается, причем это характерно для различных токовых режимов работы генератора.

Весьма важным при создании качественных защитно-декоративных покрытий на строительных материалах, обладающих высокой адгезионной прочностью, является величина теплового потока, поступающего от плазмотрона в изделие.

Многолетний опыт сотрудников кафедры прикладной механики и материаловедения ТГАСУ, под руководством профессора, д.т.н., Волокитина Г.Г. позволил реализовать в аппаратурном оформлении и внедрить на предприятия стройиндустрии:

1. Плазменная установка по обработке силикатного кирпича, предназначенная для создания стекловидного защитно-декоративного покрытия на лицевых гранях изделия, обеспечивающего повышенную химическую стойкость, морозостойкость, самоочищаемость, долговечность. Расширена цветовая гамма покрытий за счет предварительной обработки оплаиваемой поверхности водными растворами солей металлов. Плазменная технология обработки силикатного кирпича реализована на предприятиях г. Липецка, Уфы, Томска, Волгограда, Кургана, Сургута, п. Маслянино (Новосибирская обл.).

2. Технологическая линия создания защитно-декоративных покрытий на глиняном кирпиче, внедренная, как производственно-технологический комплекс, предназначена для создания защитно-декоративных покрытий на обожженном кирпиче с помощью низкотемпературной плазмы и представляет собой поточную технологическую линию с основным и вспомогательным оборудованием. В процессе работы линии в автоматическом режиме осуществляются следующие операционные стадии процесса: приготовление специальных паст с красителями, нанесение их на лицевую поверхность кирпича, сушка покрытого пастами кирпича, обработка низкотемпературной плазмой, съем и упаковка обработанных изделий.

3. Автоматизированная плазменная установка «Гермес-010», предназначенная для обработки большеразмерных строительных изделий.





4. Технология плазменной обработки изделий из древесины: термическая обработка деревянных изделий приводит к существенным изменениям в структуре древесины, по мере нагрева из ее состава испаряются смолы, воски, жиры, фенолы, элементы гемицеллюлозы и глюкозы. В результате древесина становится устойчивой к гниению, не подвержена воздействию плесени, поражению различными микроорганизмами и грибом, повышается биологическая стойкость материала. Что не позволяет достичь обычная сушка древесины.

**Вывод.** В результате проведенных исследований установлено, что использование специализированных генераторов плазмы позволяет создавать защитно-декоративные покрытия на различных видах строительных материалов (кирпич, бетон, древесина и т.п.). Технология обработки поверхности строительных изделий реализована на предприятиях РФ. Экспериментальные исследования по нанесению защитного покрытия на поверхность различных пород древесины подтвердили, что обработанная плазмой древесина приобретает новые свойства: огнестойкость, стойкость к атмосферным осадкам, биостойкость. Благодаря высоким физико-механическим свойствам значительно расширяются ее сферы применения как строительного и отделочного материала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Волокитин Г.Г. Электродуговые и электроплазменные устройства для переработки силикатсодержащих отходов / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов, А.И. Хайсундинов // Известия высших учебных заведений. Физика, 2014. – Т. 57. – № 3-3. – С. 109 – 113.

2. Волокитин Г.Г. Исследование процессов, протекающих при плазмохимическом синтезе высокотемпературных силикатных расплавов. Часть 2: Анализ продуктов плавления отходов обогащения молибденовых руд / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, Ю.А. Абзаев, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2014. – № 1 (42). – С. 80 – 84.

3. Волокитин О.Г. Получение силикатных расплавов с высоким силикатным модулем из кварц-полевошпатсодержащего сырья по плазменной технологии / О.Г. Волокитин, В.И. Верещагин, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, В.В. Шеховцов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология, 2014. – Т. 57. – № 1. – С. 73 – 77.

4. Шихова В.А. Получение теплоизоляционных материалов строительного назначения на основе отходов топливно-энергетического комплекса / В.А. Шихова, Е.А. Яценко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки, 2013. – № 4 (173). – С. 63 – 66.

5. Буянтуев С.Л. Технология получения эффективной базальтовой теплоизоляции с помощью низкотемпературной плазмы / С.Л. Буянтуев, Д.Р. Дамдинова, В.Д. Сультимова // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2006. – № 12. – С. 30.





6. Бессмертный В.С. Плазменное глазурование стеновых строительных материалов из бетона / Бессмертный В.С., Дюмина П.С., Бондаренко Н.И. – Белгород, 2014. – 129 с.
7. Волокитин О.Г. Анализ процессов традиционного и плазменного плавления золы ТЭЦ / О.Г. Волокитин, В.И. Верещагин, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, В.В. Шеховцов // Техника и технология силикатов, 2016. – Т. 23. – № 3. – С. 2 – 5.
8. Волокитин Г.Г., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В., Маслов Е.А., Малюга Н.В. Распределение температурных полей при плазменной обработке поверхности древесины / Г.Г. Волокитин, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов, Е.А. Маслов, Н.В. Малюга // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2013. – № 3. – С. 220 – 227.
9. Wallenberger F. T., Bingham P. A. Fiberglass and Glass Technology: EnergyFriendly Compositions and Applications. Springer. 2009. 474 p.
10. Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии. Проблемы и перспективы : монография / Г. Ю. Даутов Г.Ю., А. Н. Тимошевский, А. С. Аньшаков. – : Новосибирск: «Наука», Сиб. предпр. РАН, 2004. - 466 с.
11. Туманов Ю. Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: «Физматлит», 2003. – 759с.
12. Каренгин А.Г. Плазменные процессы и технологии: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 160 с.
13. Волокитин О.Г., Шеремет М.А., Шеховцов В.В., Бондарева Н.С., Кузьмин В.И. Исследование режимов конвективного теплопереноса при получении высокотемпературных силикатных расплавов / О.Г. Волокитин, М.А. Шеремет, В.В. Шеховцов, Н.С. Бондарева, В.И. Кузьмин // Теплофизика и аэромеханика, 2016. – Т. 23. – № 5. – С. 789 – 800.
14. Шеховцов В.В. Использование низкотемпературной плазмы для получения зольных микросфер / В.В. Шеховцов, В.А. Власов, Г.Г. Волокитин, О.Г. Волокитин // Известия высших учебных заведений. Физика, 2016. – Т. 59. – № 9-3. – С. 305 – 308.

УДК 519.233.5

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИСПЕРСИИ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ В ОТСУТСТВИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Н.А. Прохоренко<sup>1</sup>, А.Б. Голованчиков<sup>2</sup>, А.В. Волжская<sup>3</sup>

<sup>1</sup>старший преподаватель кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия, e-mail: [natasha292009@yandex.ru](mailto:natasha292009@yandex.ru)

<sup>2</sup>доктор технических наук, профессор кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия, e-mail: [natasha292009@yandex.ru](mailto:natasha292009@yandex.ru)

<sup>3</sup>бакалавр кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия, e-mail: [pahp@vstu.ru](mailto:pahp@vstu.ru)

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу методики расчета ошибки опыта в отсутствии параллельных экспериментальных исследований. В её основе лежит замена истинных значений  $i$ -того выходного параметра как функции  $i$ -того входной величины на среднее арифметические расчетные значения этого параметра для  $(i-1)$  и  $(i+1)$  точек.