

*Пучка О. В., канд. техн. наук, проф.,  
Бессмертный В. С., д-р техн. наук, проф.,  
Сергеев С. В., аспирант,  
Вайсера С. С., аспирант*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЕНОСТЕКЛА

**oleg8a@mail.ru**

*Эффективность применения теплоизоляционных материалов зависит от их теплофизических характеристик и долговечности эксплуатации материала. По комплексу показателей пеностекло является наиболее перспективным теплоизоляционным материалом. Однако, в реальных условиях эксплуатации, требуется нанесение защитных и декоративных слоев, чтобы материал был защищен от атмосферного воздействия и вписывался в архитектурный облик современных городских застроек. Формирование защитно-декоративных покрытий на поверхности высокопористых материалов является сложной технологической задачей. Одним из направлений решения этого вопроса может служить использование низкотемпературной электродуговой плазмы как высокоэнергетического источника для нанесения покрытий на лицевую поверхность пеностекла. Создание покрытий на готовых изделиях позволит снизить затраты при монтаже теплоизоляционного материала на ограждающие конструкции зданий и сооружений, а также уменьшит нагрузку на фундамент и цоколь.*

***Ключевые слова:** пеностекло, теплоизоляция, плазма, пористость, прочность, водопоглощение, долговечность, термоудар, напыление, оплавление.*

Промышленность строительных материалов, в том числе стекольная, является одной из наиболее энергоемких отраслей индустрии. В связи с этим вопросы внедрения в производство альтернативных источников энергии как у нас в стране, так и за рубежом, являются актуальными [1].

Широкое распространение плазмохимические процессы получили при создании тонкослойных покрытий на металлических и керамических подложках [2].

Плазменная обработка изделий из стекла позволяет создавать на их поверхности защитные и декоративные покрытия, которые повышают их эстетические и функциональные свойства.

Цель исследования состояла в определении возможности получения покрытий на поверхности пеностекла плазмохимическими методами и определении факторов, влияющих на их эксплуатационные характеристики.

Важным показателем для декоративных и, особенно, защитных покрытий, наносимых на поверхность высокопористых материалов, в частности пеностекла, является их сплошность. Это позволяет защитить материал от проникновения влаги в реальных условиях эксплуатации – предохранить их от разрушения при замораживании-оттаивании и, таким образом, обеспечить долговечность теплоизоляционного материала.

Поэтому главными показателями качества плазменных декоративных покрытий являются: прочность сцепления с основой и морозостойкость. Следовательно, необходимо установить именно те факторы, которые ухудшают данные показатели.

В связи с этим актуальной является проблема создания научных основ формирования и повышения эксплуатационных свойств плазменных декоративных покрытий новых композиционных облицовочных материалов.

Для получения защитно-декоративных покрытий на поверхности пеностекла с использованием в качестве энергетического источника низкотемпературной электродуговой плазмы можно применить следующие методы:

- оплавление поверхности подложки (пеностекло) факелом плазмы, когда покрытие образуется за счет стеклофазы подложки;

- оплавление факелом плазмы предварительно нанесенных (напудриванием, шликерным методом и т.д.) на поверхность подложки материалов, когда покрытия образуются за счет стеклофазы покровного слоя или стеклофазы покровного слоя и стеклофазы подложки;

- подача на срез плазменной горелки предварительно сформованных стержней из покровных материалов с последующим напылением расплавленного материала на поверхность подложки;

- подача смеси компонентов покрытия через дозатор в факел плазменной горелки с по-

следующим напылением на поверхность подложки расплавленных частиц.

При плазменной обработке на лицевой поверхности образуется глазурный слой, качество которого будет зависеть от технологических факторов. Кратковременное воздействие плазменного факела вызывает расплавление поверхностных слоев пеностекла и его прогрев в среднем на несколько миллиметров. Однако высокие температуры плазмы, как и любого другого высокотемпературного источника, могут приводить к значительному термоудару и образованию микротрещин в поверхностных слоях. Это существенно снижает прочность сцепления и морозостойкость лицевого слоя с основой и тем самым снижает эксплуатационные свойства самого изделия.

При плазменном напылении происходит расплавление декорирующего материала с образованием частиц определенных размеров, которые в процессе напыления движутся к подложке с достаточно большой скоростью и при этом частично изменяют свои свойства за счет высокотемпературного воздействия плазменного факела.

В виду того, что образование покрытий происходит из расплавленного состояния, важным фактором является хорошее смачивание поверхности расплавом. Другим необходимым условием получения качественного покрытия является обеспечение термической активности частиц, неизменности их химического состава, приобретение частицей необходимой кинетической энергии пластического удара о поверхность и обеспечение образования прочного сцепления частиц между собой и основой. Смачивание различных поверхностей расплавами стекол связано со способностью последних к кристаллизации.

При формировании покрытия напылением выделяют три стадии: удар частицы о поверхность, адгезия и сцепление частиц с основой, адгезия и сцепление частиц между собой. При воздействии кинетической энергии удара частицы деформируются и оказывают давление на поверхность.

При напылении импульсное давление –  $P$  – способствует очистке поверхности подложки в месте удара и приводит материал частицы и подложки в физический контакт. Прочное соединение частицы с подложкой обеспечивает напорное давление, которое действует на протяжении всего времени деформации и затвердевания частицы и по длительности оно на 2 – 3 порядка превосходит длительность импульсного давления. В реальных условиях напорное давление может достигать 49 – 98 МПа при длитель-

ности действия  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  сек. [3]. Расплавленные и твердые частицы в момент их удара о поверхность подвергаются хрупкой или пластической деформации [4,5].

В зоне контакта напыляемой частицы она будет расплющиваться по поверхности подложки. Если время контакта несколько секунд, а толщина пограничных слоев основы и покрытия порядка микрометра, то температура в зоне контакта определяется из выражения [6]:

$$\frac{t_1 - t_2}{t_k - t_2} = \frac{\sqrt{\lambda_2 C_2 \rho_2}}{\sqrt{\lambda_1 C_1 \rho_1}},$$

где  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_k$  – соответственно температура покрытия и основы в зоне контакта.  $K$ ;  $\rho$  – плотность,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\lambda$  – теплопроводность,  $\text{КДж/м}^2 \text{ К}$ .

В общем случае  $t_k$  всегда ближе к температуре того материала, для которого величина  $\sqrt{\lambda C \rho}$  имеет более высокое значение.

Адгезия покрытия с подложкой обусловлена механическим сцеплением покрытия с микронеровностями поверхности, силами межфазного взаимодействия (Ван-дер-Ваальсовыми силами) и химическим взаимодействием соприкасающихся фаз [7, 8].

В процессе формирования покрытия при затвердевании частиц в них и в подложке возникают термические напряжения, достигающие  $10^2$  МПа, которые обусловлены коэффициентом термического расширения покрытия и основы [9,10]. В случае  $\alpha_1 > \alpha_2$  в покрытии возникают растягивающие напряжения, если  $\alpha_1 < \alpha_2$  – сжимающие напряжения. Для тел простой формы (пластина, цилиндр) напряжения 2-го рода рассчитываются на основе положений теории термоупругости [11]:

$$\sigma_1 = \frac{E_1 E_2 (\alpha_1 - \alpha_2) T}{(h_1/h_2) E_1 (1 - \mu_2) + E_2 (1 - \mu_1)},$$

$$\sigma_2 = \frac{E_1 E_2 (\alpha_1 - \alpha_2) T}{E_1 (1 - \mu_2) + (h_1/h_2) E_2 (1 - \mu_1)},$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициент термического расширения покрытия и основы,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $E_1$ ,  $E_2$  – модуль упругости покрытия и основы, Па;  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – коэффициент Пуассона покрытия и основы;  $T$  – температура, К;  $h_1$ ,  $h_2$  – толщина покрытия и основы, м.

С увеличением толщины покрытия в нем накапливаются остаточные напряжения, вследствие этого уменьшается прочность сцепления покрытия с основой. Наименее прочной является зона сцепления между частицами в покрытии, поэтому при разрушении часть покрытия остается на подложке. При увеличении толщины покрытия его теплопроводность снижается, а

прочность сцепления возрастает. Это характерно для покрытий, толщина которых не превышает 0,5-1,0 мм [12,13].

На свойства покрытия влияет расход плазмообразующего газа и величина подводимой мощности. Уменьшение расхода газа повышает тепловую нагрузку на электроды и они интенсивно разрушаются. Увеличение силы тока дуги повышает температуру плазмы, а увеличение расхода газа – снижает ее.

Для проведения экспериментов готовили образцы размером 50 x 50 x 50 мм. Лицевую поверхность пеностекла обрабатывали плазменной горелкой ГН-5р плазмотрона УПУ-8М. Параметры работы плазмотрона были следующие: рабочее напряжение 30-32В, ток - 350А. Плазмообразующим газом служил аргон, расход которого составил 30 л/мин при давлении 0,25 МПа. Расход воды на охлаждение плазменной горелки - 10-12 л/мин. После оплавления лицевой поверхности образцы подвергали последующему технологическому обжигу в муфельной печи при 723 К с выдержкой при максимальной температуре 2 часа. После обжига готовых изделий их испытывали на морозостойкость по ГОСТ 7025-91, прочность сцепления - методом отрыва и пористость - методом “пятна”.

Непосредственное динамическое воздействие потока дуговой плазмы делает оплавленный слой неровным и вспененным. Однако при последующем технологическом обжиге полуфабрикатов с оплавленной лицевой поверхностью происходит релаксация напряжений, заплывание пор и неровностей в оплавленном слое, увеличение диффузионной зоны между подложкой и стеклофазой. В конечном итоге образуется однородный гладкий оплавленный слой, обладающий удовлетворительными эксплуатационными свойствами и качеством. Это является новым вкладом в теорию и практику локальных высокотемпературных технологий декорирования пеностекла.

Исследования показали, что для процессов плазменного оплавления пеностекла наиболее ответственной является 1 стадия – удаление капиллярной влаги с поверхности. На этой стадии возникают условия для появления трещин, а пары остаточной влаги могут привести к самоотслоению оплавленного глазурного слоя. Как показали эксперименты, при оплавлении плазменным факелом поверхности образцов с высокой влажностью, происходит частичное отслоение глазурного слоя от подложки за счет термических напряжений и паров воды, конденсирующихся в порах изделия.

Наиболее равномерное и сплошное покрытие получается в результате оплавления поверхности пеностекла факелом плазмы. Наиболее перспективными являются ангобирование и глазурирование с использованием плазменного факела, так как позволяет иметь широкую цветовую гамму получаемых покрытий. Однако, покрытия, полученные методами напыления, имеют больший декоративный эффект, а значит, и большие перспективы для дизайнерских разработок.

Результаты исследований показали, что при термической обработке поверхностный слой разупрочняется с образованием трещин. Вероятно, это обусловлено возникновением трещиноватого подслоя в оплавленном материале вследствие термоудара. Научно обоснованные методы, снижающие жесткость термоудара в процессе технологической обработки строительных материалов, могут являться общей методологической основой повышения их эксплуатационных свойств. Для этого необходимо исследовать:

- закономерности распределения температурно-временного поля в изделии при локальном нагреве его поверхности;
- закономерности фазовых превращений, макро- и микроструктуру декоративно-защитного покрытия и подложки;
- влияние технологических факторов на эксплуатационные свойства покрытия;
- пути повышения эксплуатационных свойств плазменных покрытий.

Таким образом, доказана возможность получения защитно-декоративных покрытий на поверхности пеностекла плазмохимическими методами, разработаны методы получения покрытий и определены основные факторы, влияющие на свойства покрытий. Отработка технологических режимов и оптимизация параметров нанесения требует дальнейших исследований в этой области.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минько Н.И., Аткарская А.Б., Кеменов С.А. Использование стекла и изделий из него в современном строительстве // Строительные материалы. 2008. №10 С. 91-95.
2. Крапивина С.А. Плазмохимические технологические процессы. Л.: Химия, 1981. 99 с.
3. Демиденко Л.М. Высокоогнеупорные композиционные покрытия. М.: Металлургия, 1979. 216 с.
4. Лесовик Р.В. Комплексное использование хвостов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов // Горный журнал. 2004. №1 С. 76-77.

5. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 266 с.
6. Бессмертный В.С., Пучка О.В., Степанова М.Н. Инновационные технологии получения пеностекла с покрытиями. Saarbrücken, Germany: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH Co. KG. 2012. 120 с.
7. Плазменное декорирование сортовой посуды. / И.И. Немец, В.П. Крохин, В.С. Бессмертный, А.Г. Абдулселимов, А.И. Силко, Т.И. Шитова // Стекло и керамика. 1983. №4. С. 10-11.
8. Wolfgang Grafe, Monika Blank, Fred-Gustav Winsman. Jone naustanchan Glas mittels plasma trahlen // Silikattechnik. 1981. V. 5. P. 132-133.
9. Орлов А.С. Декоративная отделка кирпича оплавлением // Строительные материалы. 1993. № 2 С. 15-17.
10. Буянтуев С.Л., Былкова Н.В., Заяханов М.Е. Плазменная обработка изделий из строительных материалов / Горение и плазмохимия: сб. материалов I Международного симпозиума – Алма-Аты // Казахстан. 2001. С. 126 –129.
11. Комский Г.З., Сааков А.Г. Формирование декоративно-защитного покрытия при плазменном напылении // Стекло и керамика. 1991. № 4. С. 22-24.
12. Минько Н.И., Пучка О.В., Степанова М.Н. Получение неорганических декоративно-защитных покрытий на поверхности пеностекла [Электронный ресурс. CDROM ] Высокотемпературные материалы и технологии XXI века: сб. материалов Международной научно-практической конференции. М.: РХТУ. 2008.
13. Минько Н.И., Пучка О.В., Бессмертный В.С., Мелконян Р.Г. Пеностекло. Научные основы и технология. Воронеж: Изд-во: «Научная книга», 2008. 167 с.