

УДК 631.365

Исследование плазменной технологии получения силикатных тугоплавких расплавов*

**А.А. Никифоров, Е.А. Маслов, Н.К. Скрипникова,
О.Г. Волокитин**

*Томский государственный архитектурно-строительный
университет*

E-mail: maslov_eugene@mail.ru

Рассматривается принципиально новая установка для получения силикатных тугоплавких расплавов с использованием высококонцентрированных тепловых потоков. Разработана математическая модель, описывающая температурные поля в гарнисажном слое в процессе взаимодействия плазменного потока с частицами тугоплавкого силикатного материала. Приведены типичные численные результаты распределения температуры в различных сечениях гарнисажного слоя. Проведено сравнение численных и экспериментальных данных и получено их удовлетворительное соответствие.

Ключевые слова: плазменная установка, силикатный тугоплавкий расплав, высококонцентрированные источники тепла, гомогенизатор, численное исследование, гарнисажный слой.

Потребность различных отраслей промышленности в строительных материалах, в том числе теплоизоляционных, стеклокристаллических и т. п., постоянно возрастает. Как правило, технологии производства этих материалов базируются на предварительном получении расплава из природного минерального сырья — базальтов, диабазов, габбро, диоритов, которые, имея низкие температуры плавления до 1800 К, с энергетической точки зрения предпочтительны. Однако немаловажным сдерживающим фактором увеличения производства являются дорогостоящее топливо и сырье, а также экологическая проблема, возникающая из-за несовершенства процессов образования расплава.

Для устранения вышеперечисленных недостатков имеется ряд предпосылок: использование в качестве сырьевой базы отходов энергетической и горнорудной промышленности, которые являются минеральным остатком, содержащим в своем составе до 50÷60 % SiO₂, и, соответственно, несмотря на высокую (до 2000÷2300 К) температуру плавления, являются пригодными для получения силикатного расплава; использование высококонцентрированных источников тепла, которые за счет высоких температур до 3000÷5000 К резко снижают время образования расплава и соответственно снижают вероятность вредных выбросов в атмосферу.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант МК 1110.2008.8).

Целью настоящей работы является создание комбинированного источника тепла плазма–джоулев нагрев для получения расплава из тугоплавких силикатосодержащих материалов и определение его теплофизических параметров, обеспечивающих реализацию высококонцентрированных тепловых потоков, а также изучение закономерности распределения температурного поля в гарнисажном слое концентратора тепловых потоков.

На рис. 1. представлена схема экспериментальной установки, предназначенной для получения расплава из тугоплавких силикатосодержащих материалов [1]. Установка состоит из следующих основных узлов: источника питания постоянного тока 10 типа АПР–404 мощностью до 120 кВт, плазмотрона с вынесенной областью энерговыделения 1, концентратора тепловой энергии 2, выполненного в виде водоохлаждаемого цилиндра, дозирующего устройства для подачи дисперсного материала 3, гомогенизатора 4, в дно которого вмонтирован графитовый анод 5, сливного желоба 6.

Принцип работы установки основан на взаимодействии высококонцентрированных потоков плазмы 8 с порошкообразным тугоплавким силикатосодержащим материалом (золы, отходы горючих сланцев, топазовые руды), в результате которого осуществляется нагрев дисперсных частиц с последующим образованием расплава 9. Образующийся расплав поступает в гомогенизатор 4. Благодаря тому, что расплав при высоких температурах обладает электропроводностью, ток дугового разряда плазмотрона 1 протекает по объему расплава 9, одновременно обеспечивая джоулев нагрев. В процессе работы плазмотрона расплавленные частицы осаждаются на стенке водоохлаждаемого концентратора 2, образуя гарнисажный слой 7, который, обладая низкой теплопроводностью, защищает стенки концентратора от разрушения. На границе раздела твердой и жидкой фаз гарнисажного слоя устанавливается температура, равная температуре плавления сырья, при этом избыточный расплав также осаждается в гомогенизатор 4. Этот процесс в теплофизической постановке термического воздействия на образованный слой гарнисажа может быть представлен следующим образом на рис. 2 [2, 3, 4].

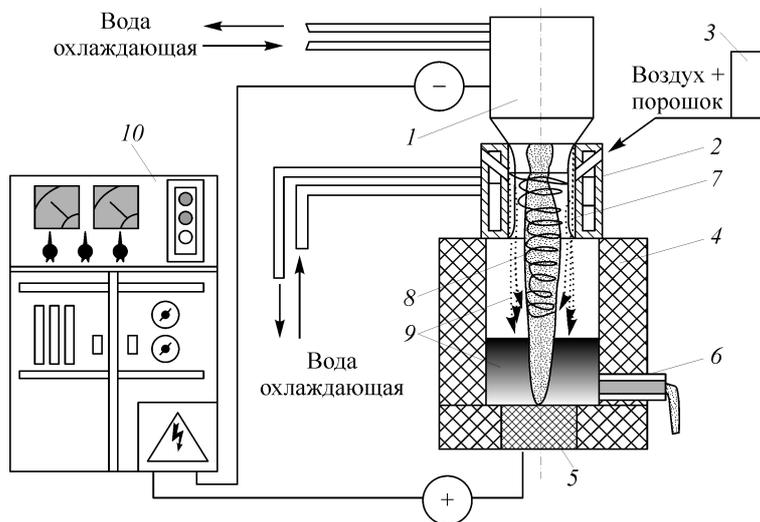
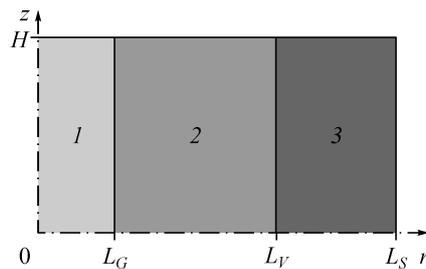


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с комбинированным источником тепла для получения расплава: 1 — плазмотрон, 2 — концентратор тепловой энергии, 3 — дозирующее устройство для подачи сырья, 4 — гомогенизатор, 5 — анод графитовый, 6 — желоб сливной, 7 — слой гарнисажный, 8 — дуга плазменная, 9 — расплав, 10 — источник питания.

Рис. 2. Область решения задачи: плазменный шнур (1), окружающая среда — воздух (2), гарнисажный слой (3).



В этой схеме приняты следующие обозначения: z, r — цилиндрические оси координат, $0z$ — ось плазменного шнура (столба дуги), H — продольный размер области, L_s — поперечный размер области решения, L_G — расстояние от оси плазменного шнура до границы раздела между плазменным шнуром и окружающей средой, L_V — расстояние от оси плазменного шнура до границы раздела между окружающей средой и гарнисажным слоем.

Температурное поле в любой точке гарнисажного слоя, расположенного вблизи цилиндрической полости радиусом L_G , формируется под влиянием теплового источника q_G — плазменного шнура. Изменение энергетических режимов источника питания АПР-404 позволяло реализовывать удельные тепловые потоки в диапазоне $q_G = (1\div 3) \cdot 10^6$ Вт/м² (см. табл.). Начальная температура в полости и в массиве принимается равной температуре окружающей среды $T_0 = 300$ К. Вектор теплового потока, порожденный плазменным шнуром, действует в радиальном направлении в течение времени τ_K . Предварительно устанавливались рабочие режимы плазменного генератора и теплофизические параметры дугового разряда.

Подаваемое тангенциально через дозирующее устройство 3 порошкообразное сырье является по своей природе псевдожидкостью, которое при вращении прижимается в виде некоторого слоя к внутренней расплавленной поверхности гарнисажа, взаимодействует с ней и в виде пленки расплава стекает в гомогенизатор 4.

В общем случае математически задача описания процесса переноса тепла от плазменного шнура через воздушную прослойку и гарнисажный слой формулируется в сопряженной постановке, с учетом условий сопряжения на границе раздела сред воздушная прослойка–гарнисажный слой. В работе [5] показано, что в рассматриваемых условиях при протяженности воздушной прослойки $(15\div 20) \cdot 10^{-3}$ м и плотности теплового потока от плазменного шнура $q_G = (1\div 3) \cdot 10^6$ Вт/м² потери тепла в прослойке пренебрежимо малы (менее 10 %). Поэтому возможна постановка задачи переноса тепла от плазменного шнура к поверхности гарнисажного слоя без учета воздушной прослойки.

Задача распределения температурного поля по текущему радиусу r за время действия τ_K теплового потока q_G сводится к решению нестационарного уравнения теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями.

Уравнение энергии

$$\rho c_p \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$0 < r < L_s, \quad 0 < t \leq \tau_K.$$

Таблица

Рабочий режим и теплофизические параметры плазмотрона

№ режимов	Мощность плазмотрона, кВт	Сила тока, А	Напряжение, В	Удельный тепловой поток, Вт/м ²
1	24	200	120	$1 \cdot 10^6$
2	36	200	180	$1,5 \cdot 10^6$
3	56	400	140	$2,4 \cdot 10^6$

Начальное условие

$$t = 0, \quad 0 \leq r \leq L_S: \quad T(r, t) = T_0. \quad (2)$$

Граничные условия:

$$t > 0, \quad r = L_V: \quad -\lambda_S \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = q_G, \quad (3)$$

$$t > 0, \quad r = L_S: \quad T_S(r, t) = T_0. \quad (4)$$

В математической модели (1)–(4) приняты следующие обозначения: r, z — цилиндрические координаты, t — время, T — температура, ρ — плотность, c — коэффициент удельной теплоемкости, λ — коэффициент теплопроводности. Индексы “G”, “S” относятся к характеристикам плазменного шнура и гарнисажного слоя.

Для численного решения поставленной задачи использовался метод контрольных объемов [6]. Дифференциальное уравнение (1) аппроксимировалось неявной трехточечной схемой. Диффузионные члены аппроксимировались центральной схемой второго порядка. Система линейных алгебраических уравнений решалась методом трехточечной прогонки. Метод и алгоритм численного решения тестировались на последовательности сгущающихся сеток. Численные исследования проводились при сеточных параметрах, дальнейшее уменьшение которых не приводило к заметным отклонениям результатов вычислений.

Численное исследование процесса теплообмена между плазменным шнуром, окружающей средой и гарнисажным слоем проведено при следующих значениях параметров: начальной температуры — $T_0 = 300$ К, плотности теплового потока плазменного шнура — $q_G = (1 \div 3) \cdot 10^6$ Вт/м². Теплофизические характеристики гарнисажного слоя: $c_V = 1,2$ кДж/(кг·град), $\lambda_V = 0,17$ Вт/(м·град), $\rho_V = 1,2$ кг/м³, $c_S = 890$ Дж/(кг·град), $\lambda_S = 1,4$ Вт/(м·град), $\rho_S = 2200$ кг/м³. Геометрические характеристики: $L_G = 0,005$ м, $L_V = 0,015$ м, $L_S = 0,02$ м.

Расчеты выполнялись при изменении плотности теплового потока $q_G = 1 \div 3 \cdot 10^6$ Вт/м², при радиусе рабочей зоны концентратора $3 L_S = 0,02$ м.

Для проверки численных результатов экспериментально с использованием платино–родиевой термопары определена температура на глубине 1 мм при плотности теплового потока $q_G = 1,5 \cdot 10^6$ Вт/м². Отличие численных и экспериментальных данных в указанных условиях незначительно, менее 20 % (см. рис. 3, кривая 5).

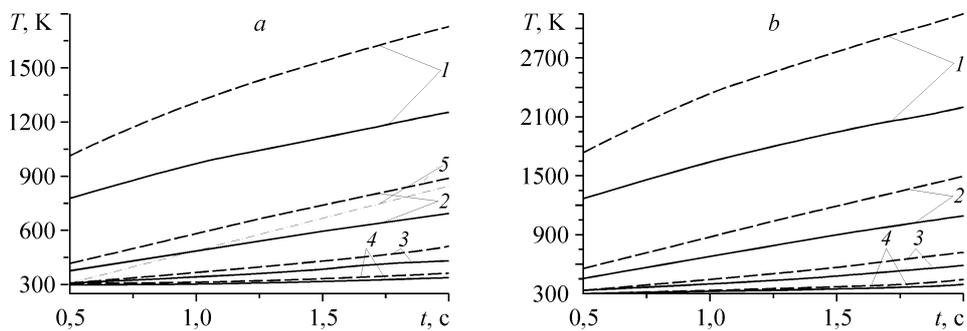
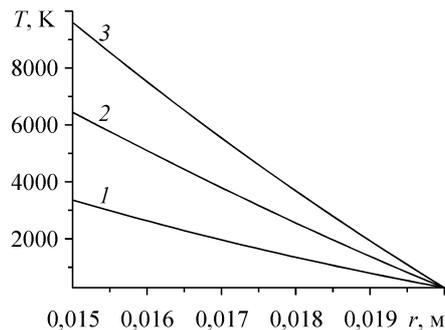


Рис. 3. Изменение температуры гарнисажного слоя в различных сечениях со временем.

$q_G = 1 \cdot 10^6$ (a), $2 \cdot 10^6$ (b) Вт/м² (сплошные линии), $q_G = 1,5 \cdot 10^6$ (a), $3 \cdot 10^6$ (b) Вт/м² (пунктирные линии). На поверхности (1), на глубине 1 (2), 2 (3), 3 (4) мм, показание термопары, заделанной на 1 мм от нагреваемой поверхности при $q_G = 1,5 \cdot 10^6$ Вт/м².

Рис. 4. Распределение температурного поля в гарнисажном слое при различной интенсивности теплового потока q_G : $1 \cdot 10^6$ (1), $2 \cdot 10^6$ (2), $3 \cdot 10^6$ (3) Вт/м².



Для определения максимально возможного диапазона температуры гарнисажного слоя при изменении удельного теплового потока $q_G = (1 \div 3) \cdot 10^6$ Вт/м² использовалось стационарное решение поставленной задачи (1)–(4), которое описывается следующим аналитическим выражением [2]:

$$T(r) = \frac{q_V L_V^2}{4\lambda_S} \left(2 \ln \left(\frac{r}{L_S} \right) + \frac{L_S^2}{L_V^2} - \frac{r^2}{L_V^2} \right) - \frac{q_G L_V}{\lambda_S} \ln \left(\frac{r}{L_S} \right) + T_0, \quad (5)$$

где q_V — внутренний источник тепловыделения.

Используя аналитическое решение (5) поставленной задачи (1)–(4) при аналогичных значениях теплофизических и геометрических параметров и при изменении плотности теплового потока $q_G = (1 \div 3) \cdot 10^6$ Вт/м², получены стационарные распределения температурного поля в гарнисажном слое (рис. 4).

В результате численных расчетов математической модели (1)–(4) при изменении теплового потока $q_G = 2 \div 3 \cdot 10^6$ Вт/м², реализуемое поле температур гарнисажного слоя соответствует плавлению материала ($T = 1800 \div 2000$ К) на глубину 2 мм от границы раздела фаз воздух — гарнисажный слой. При удалении в глубину материала 2–5 мм значение температуры ($T < 1000$ К) соответствует интервалу сохранения физических свойств твердого тела (см. рис. 3). Анализ стационарного распределения температурного поля также подтверждает снижение температуры ($T < 1000$ К) при удалении от оси плазменного шнура на 19,5 мм.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена работоспособность экспериментальной установки и определены ее технологические параметры. Полученные результаты численного моделирования позволяют сделать вывод о том, что реализуемое поле температур соответствует условиям получения расплава на границе воздух–гарнисажный слой, при этом сохраняется теплозащитный гарнисажный слой на металлической стенке концентратора тепловой энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волокитин О.Г., Гайслер Е.В., Никифоров А.А., Скрипникова Н.К. Установка для получения минерального расплава плазменным нагревом. — Заявка на изобретение 2007123894. РФ, МПК С03В37/04, С03В37/06. Приоритет от 25.06.2007, № 026022. — 6 с.
2. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. — М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 426 с.
3. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. — Л.: Энергия, 1976. — 352 с.
4. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1976. — 528 с.
5. Скрипникова Н.К., Петраченко В.В., Жарова И.К. Взаимодействие плазменных потоков с поверхностью строительных материалов // Нетрадиционные технологии в строительстве: Материалы Межд. научно-техн. семинара, Ч. 1. — Томск: Изд-во ТГАСУ, 1999. — С. 90–99.
6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.

Статья поступила в редакцию 20 октября 2008 г.