XXV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова: Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине.

Секция «Радиационные технологии. Синхротронные, нейтронные и ядерно-физические методы диагностики и модификации материалов»

Численное моделирование температурного поля в системе графитовых тиглей при электродуговом синтезе карбидов и боридов металлов

Д. Е. Стовпец¹,* Г. А. Блейхер¹,[†] А. Я. Пак^{2‡}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, инженерная школа ядерных технологий, научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга Россия, 634028, Томск, пр. Ленина, д. 2, стр. 4.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, инженерная школа энергетики, лаборатория перспективных материалов энергетической отрасли Россия, 634034, Томск, ул. Усова, д.7

(Поступила в редакцию 07.04.2025; подписана в печать 14.04.2025)

Увеличивающийся спрос на материалы, обладающие уникальными физическими свойствами, создаёт необходимость в новых способах получения подобных материалов. Одним из перспективных является метод синтеза веществ с помощью энергии дугового разряда, генерируемого в условиях атмосферы, таким способом возможно получение карбидов и боридов различных металлов. Этот метод выделяется возможностью реализации в открытой воздушной среде и относительно небольшим временем рабочего процесса. Одной из задач, которая возникает при разработке технологий на основе этого метода, является выявление наиболее подходящих рабочих режимов работы установки. Решение этой задачи только экспериментальным путём является весьма ресурсозатратным. Наиболее целесообразный подход состоит в привлечении численного моделирования.

В предлагаемой статье представлена численная модель тепловых процессов в электродуговом реакторе, построенная на основе уравнения теплопроводности, с поверхностным источником тепловыделения. С привлечением экспериментальных измерений определён коэффициент теплоотдачи между элементами реактора, а также продемонстрирована работоспособность разработанной численной модели и способа задания поверхностного источника тепловыделения. Численная модель будет применяться для оптимизации параметров дугового источника плазмы в задачах практической реализации синтеза материалов с помощью описанного здесь метода.

РАСS: 02.30.Jr, 02.60.Cb, 44.10.+i, 52.80.Mg УДК: 537.523.5, 519.635.6. Ключевые слова: численное моделирование, температурные поля, дуговой разряд, уравнение теплопроводности.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастает спрос на материалы, обладающие уникальными физическими и химическими свойствами, которые можно получить с помощью различных методов синтеза. Среди подобных материалов следует отметить соединения бора и углерода с некоторыми металлами (Ті, Сг, Si, Мо и т.п.), которые находят широкое применение в атомной энергетике, аэрокосмической промышленности, высокоточной оптике, а также в электронике и электротехнике [1–3].

Разработаны различные способы получения карбидов и боридов металлов. Наиболее распространёнными среди них являются осаждение из газовой фазы, борои карботермическое восстановление, а также плазменные методы синтеза в условиях вакуума. Также в последнее время опубликованы результаты, свидетельствующие о возможности синтеза вышеуказанных материалов путём спекания порошков с применением энергии электродугового разряда [4, 5]. Этот способ обладает рядом преимуществ по сравнению с отмеченными выше и представляется весьма перспективным, так как он характеризуется высокой производительностью и реализуется в обычных атмосферных условиях.

При электродуговом синтезе материалов спекаемые порошки насыпаются в графитовый тигель, который закрыт крышкой и помещён в ещё один внешний тигель, служащий теплоизолятором. Электрическая дуга воздействует на поверхность крышки. Так как процесс происходит в атмосферных условиях, то мы имеем дело с дугой высокого давления [6]. Поэтому в разрядном промежутке генерируется плотная низкотемпературная плазма с характерной температурой 6000–12000 К. Горение дуги поддерживается за счёт интенсивной термо-

^{*} des30@tpu.ru

[†] bga@tpu.ru

[‡] ayapak@tpu.ru

электронной эмиссии с поверхности анода, разогревающегося примерно до 3000 К. Поэтому тугоплавкие материалы, в частности, графит, используются для электродов. Также для зажигания подобных разрядов применяют вольфрам, молибден, цирконий и тантал [7–9].

Воздействие дуги на крышку внутреннего графитового тигля, являющегося катодом, происходит через появляющееся и исчезающее, а также быстро и беспорядочно перемещающееся катодное пятно. Понятие катодного пятна объединяет две различные в физическом отношении области. Одной из них является поверхность материала, которая может быть нагрета в области пятна до температур, намного превышающих температуру кипения. Во второй области локализована прикатодная плазма, которая образуется в процессе формирования пятна или непрерывно генерируется в результате испарения [10]. Согласно различным теоретическим и экспериментальным исследованиям концентрация частиц в области прикатодной плазмы может составлять $n \sim 10^{17} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$, степень ионизации α – от 10 до 100%, температура электронов (в энергетических единицах) $T_e = 1 - 2$ эВ, а ионов — $T \sim 0.5 - 2 \ \mathrm{эB}$. Плазменный поток разлетается из области пятна со скоростью порядка 10^6 см/с. Появление катодного пятна при генерации дугового разряда обусловлено необходимостью переноса больших токов через поверхность относительно холодного и практически неэмитирующего проводника [11]. Подобный перенос происходит за счёт высокой концентрации энергии в малой области на поверхности катода (характерный размер пятна $r \sim 10^{-1} - 10^{-3}$ см). Перенос тока осуществляется как ионами, так и электронами.

Одна из задач, которую необходимо решить для реализации электродугового синтеза — определение оптимальных параметров обработки с точки зрения достижения высокой производительности и энергоэффективности. Здесь под параметрами обработки понимаются ток и напряжение дугового источника плазмы, а также длительность процесса. Их выявление исключительно экспериментальным путём требует значительных материальных и временных ресурсов. Поэтому было решено задействовать численное моделирование тепловых процессов в обрабатываемой системе. В этой связи целью исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, является создание численной модели тепловых процессов в вышеописанной системе тиглей, которая станет инструментом для расчёта эволюции температурных полей и, соответственно, определения наиболее подходящих рабочих параметров для успешной реализации электродугового синтеза карбидов и боридов металлов в процессе спекания порошковых материалов. Проверка адекватности разработанной модели производится путём сравнения рассчитанных и измеренных в экспериментах значений температуры.

1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РЕАКТОРА

На рис. 1 представлена упрощённая схема лабораторного электродугового реактора постоянного тока, в котором реализуется синтез карбидов и боридов различных металлов.

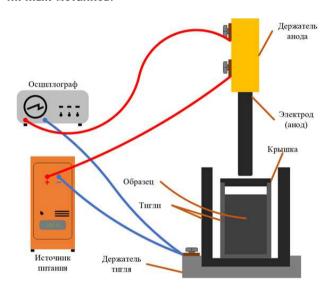


Рис. 1. Упрощенная схема лабораторного электродугового реактора

Здесь в качестве источника питания установки используется сварочный однофазный инвертор. Он состоит из первичного низкочастотного выпрямителя, инвертора, высокочастотного трансформатора, вторичного высокочастотного выпрямителя и дросселя. Регулятором обеспечивается настройка значения выходного тока источника питания с индикацией текущего значения. Оборудование включает в себя два токоведущих держателя, на которых установлены графитовый электрод, выполняющий роль анода, и система графитовых тиглей. Во внутреннем тигле находятся спекающиеся порошки. Внешний тигель служит для теплоизоляции. Держатель тиглей изготовлен из алюминия, к нему подключен отрицательный вывод источника питания. Эта установка является полностью автоматизированной, управление может производиться как в ручном режиме, так и с помощью специального программного обеспечения на компьютере, подключённого к установке. Измерение электрических параметров процесса производится осциллографом. Рабочий цикл реализуется в процессе горения дугового разряда постоянного тока в полости внешнего графитового тигля. Разряд инициируется путём перемещения анода вдоль оси тигля до контакта с графитовой крышкой, зажигание дуги происходит при разведении анода с крышкой. Графитовая крышка в данном случае является катодом. В табл. 1 и 2 представлены материальные и геометрические параметры системы «тигли на держателе», а также электрические характеристики источни-

	Материал	Высота, мм	Толщина стенок, мм	Диаметр, мм	Длина, мм	Ширина, мм
Держатель	Al	15	-	40 (Отверстие под тигель)	200	100
Внутренний тигель	Графит С-500	20	3	16	=	-
Внешний тигель	Графит С-500	40	8	22	-	-

Таблица 1. Материалы и геометрические размеры системы «тигли на держателе»

Таблица 2. Электрические характеристики реактора

Напряжение, В	Сила тока, А	Мощность, кВт
220	20-220	До 8.8

ка питания. Измерение температуры в тиглях и держателе производилось с помощью вольфрам-рениевой термопары.

2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Одним из важнейших управляющих параметров модели является плотность мощности q, передаваемая от дугового разряда (дуги) поверхностным слоям крышки внутреннего тигля. Как было сказано ранее, действие дугового разряда на обрабатываемую поверхность состоит в прохождении через неё электрического тока, формируемого в дуге, т.е. в области катодных пятен. Энергетическое воздействие дугового разряда на обрабатываемую поверхность выражается в выделении тепла в приповерхностной области облучаемого изделия за счёт прохождения там электрического тока. Мощность Q дугового разряда в текущей области локализации катодного пятна равна Q = UI, где U и I напряжение и ток дугового разряда. Так как катодные пятна перемещаются вдоль поверхности с большой скоростью, так что скорость распространения тепла за счёт теплопроводности в поверхностных слоях обрабатываемого изделия меньше, чем скорость перемещения катодного пятна, то величину плотность мощности, передаваемой от дугового источника, в любой точке на поверхности крышки внутреннего тигля, можно усреднить по всей её поверхности с площадью S, т.е. q = Q/S. Это допущение позволяет описывать процесс распространения тепла в системе тиглей с помощью уравнения теплопроводности в цилиндрической системе координат с азимутальной симметрией:

$$c(Z,t)\rho(Z,t)\frac{\partial T(Z,R,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z}\lambda(Z,R)\frac{\partial T(Z,R,t)}{\partial Z} + \frac{1}{R}\lambda(Z,R)\frac{\partial T(Z,R,t)}{\partial R} + \frac{\partial}{\partial R}\lambda(Z,R)\frac{\partial T(Z,R,t)}{\partial R}$$
(1)

Здесь T — температура в системе, λ — коэффициент теплопроводности, c — теплоёмкость, ρ — плотность. Расчётная область для этой задачи показана на рис. 2.

Начальные условия: $T(Z,R,0)=300~{\rm K}$. Для определения граничных условий поверхность расчётной области задачи была разбита на 4 участка (рис. 2):

- Участок 1: $\lambda(Z,R) \frac{\partial T(Z,R,t)}{\partial Z} = -q + Q_{rad}$, где Z=0:
- ullet Участок 2: $\lambda rac{\partial T(Z,R,t)}{\partial R} = Q_{rad}$, где R=r радиус тигля:
- ullet Участок 3: $\lambda rac{\partial T(Z,R,t)}{\partial Z}=Q_{rad}$, где Z=h высота системы «тигли на держателе»;
- Участок 4: $\lambda \frac{\partial T(Z,R,t)}{\partial R}=0$, где R=0 (симметрия);

здесь $Q_{rad}=\varepsilon\sigma(T(t)^4-T_{env}^4)$ — плотность потока теплового излучения с поверхностей внешнего тигля и крышки, ε — приведённая степень черноты, σ — постоянная Стефана-Больцмана, T_{env} — температура окружающей среды.

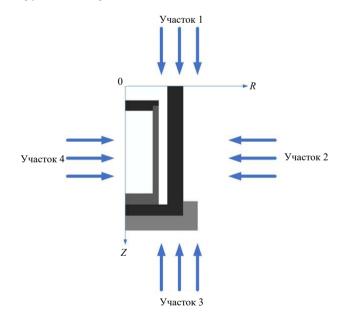


Рис. 2. Представление расчётной области модели в цилиндрической системе координат с азимутальной симметрией

Описание оттока тепла с плотностью мощности q_{td} от графитовых тиглей в пластину-держатель является важной частью решаемой задачи. Поскольку при проведении экспериментов между дном внешнего тигля и поверхностью держателя находится тонкая теплоизолирующая прокладка, теплообмен между этими

элементами оказывает серьёзное влияние на распределение тепловых полей во всех остальных частях расчётной области. Эта прокладка не выделена в расчётной области, поэтому для описания процесса теплообмена в зоне контакта дна внешнего тигля с пластинойдержателем к уравнению теплопроводности (1) было добавлено условие Ньютона-Рихмана:

$$q_{td} = \alpha (T_1 - T_2) \tag{2}$$

где T_1 и T_2 — температура на дне внешнего тигля и на поверхности держателя в зоне контакта с тиглем соответственно, α — коэффициент теплоотдачи. С другой стороны, тепловой поток от тигля к держателю проходит через вещество внешнего тигля в области, примыкающей к его дну, за счёт теплопроводности и может быть описан законом Φ урье:

$$q_t = -\lambda \cdot \operatorname{grad} T.$$

При допущении непрерывности теплового потока на границе дна тигля и поверхности держателя, т.е. $q_{td}=q_t$, имеем:

$$\alpha(T_1 - T_2) = -\lambda \cdot \operatorname{grad} T \tag{3}$$

Для включения условия (2) в расчётную задачу необходимо знать коэффициент теплоотдачи α . Он был найден экспериментально. Для этого с помощью термопары были измерены значения T_1 (температура тигля у границы с держателем) и T_2 (температура держателя у границы с тиглем), по которым определена величина $\operatorname{grad} T$ (градиент температур на поверхности тигля у границы между тиглем и держателем). Был проведён эксперимент, в процессе которого на пустую систему графитовых тиглей, установленную на держателе, воздействовал дуговой разряд с параметрами из табл. 2. Процесс нагрева системы также фиксировался тепловизионной камерой. По результатам съёмки были определены соответствующие значения T_1 , T_2 , $\operatorname{grad} T$. Точки измерения температур обозначены на рис. 3.

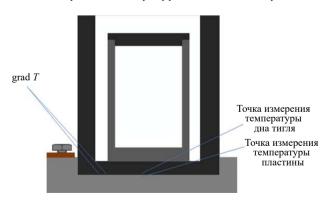


Рис. 3. Точки измерения температур в эксперименте по определению коэффициента теплоотдачи

С помощью зафиксированных в эксперименте значений температуры и уравнения (3) был вычислен коэффициент теплоотдачи, он составил 13259 Br/m^2 .

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РЕАКТОРА

Задача (1), дополненная системой начальных и граничных условий, решалась с помощью программного комплекса «Comsol Multiphysics». В нём задействован метод конечных элементов. Основной идеей этого метода является представление о том, что любую непрерывную величину, в данном случае температуру, можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определённых на конечном числе элементов; кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значения непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области [12]. Была создана 3D-модель системы графитовых тиглей на алюминиевом держателе, необходимая для расчётов в «Comsol Multiphysics». Полученная модель и сформированная сетка конечных элементов системы представлены на рис. 4. Так как наибольший интерес вызывает

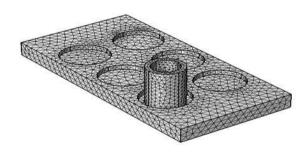


Рис. 4. 3D-модель системы «графитовые тигли-держатель» с сеткой конечных элементов

распределение температурного поля внутреннего тигля и его крышки, то число конечных элементов в системе тиглей больше, чем в держателе.

Расчёт температуры и её экспериментальные измерения производились с рабочими параметрами из табл. 3 для случая с пустым внутренним тиглем.

Таблица 3. Рабочие параметры разряда, использованные в расчётах и эксперименте

Напряжение, В	Сила тока, А	Мощность, кВт
35	150	60

На рис. 5 показаны точки, в которых проводились измерения. Графики эволюции рассчитанной и измеренной температуры в двух точках системы «тигли на держателе» (точка 1 — внешняя стенка внутреннего тигля, точка 2 — внутренняя стенка внешнего тигля) представлены на рис. 6.

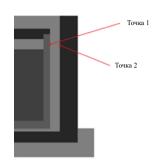


Рис. 5. Точки для проведения измерений и расчётов

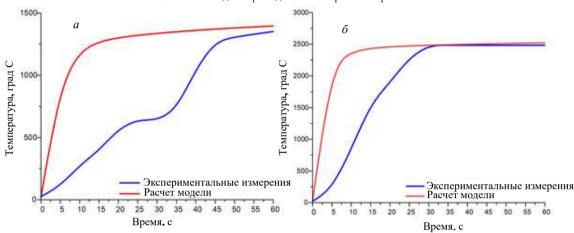


Рис. 6. Эволюция температуры в точке 1 (а) и в точке 2 (б)

На рис. 6, α , δ видно, что в течение некоторого времени от начала включения дугового источника плазмы температура в системе растёт, а затем достигает некоторого установившегося значения и дальше практически не изменяется. Установление происходит тогда, когда мощность, получаемая системой от дугового источника, уравнивается с мощностью теплового излучения с внешних поверхностей системы.

Разница в полученных значениях измеренной и рассчитанной температуры на стадии установления составляет приблизительно 30–70°С. Её можно считать незначительной по сравнению с абсолютными значениями температуры. Это обстоятельство демонстрирует достаточно высокую точность численной модели.

Различия значений длительности достижения стационарного режима нагрева в расчётах и измерениях объясняется тем, что разработанная модель не учитывает некоторые происходящие в системе процессы, на которые также затрачивается энергия, из-за чего процесс нагрева системы в модели происходит быстрее, чем в реальном эксперименте. Было рассчитано пространственное распределение температуры в системе тиглей на этапе установившейся температуры. Оно представлено на рис. 7.

Здесь видно, что, во-первых, стенки тиглей прогреваются равномерно, а во-вторых, температура внутрен-

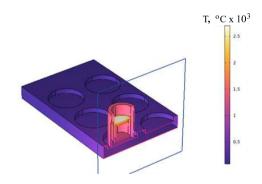


Рис. 7. Пространственное распределение температур в системе (в разрезе)

него тигля примерно на 1000°С выше, чем внешнего. Полученная картина распределения температуры в графитовых тиглях свидетельствует о равномерном нагреве системы, что хорошо согласуется с данными тепловизионной съёмки, представленными научной группой в предыдущих работах [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана численная модель тепловых процессов в системе «тигли на держателе» под действием дугового источника плазмы. Проведена верификация раз-

работанной модели на примере системы без добавления в неё синтезируемых порошков путём сравнения рассчитанной эволюции температуры в некоторых локальных областях тиглей с результатами измерений. Она показала адекватность численной модели реальным условиям экспериментов, а также справедливость допущения о возможности применять в расчётах значения плотности мощности энергетического воздействия, полученные на основе усреднения полной мощности дугового разряда по поверхности малой крышки внут-

реннего тигля, через которую в систему «тигли на держателе» передаётся энергия извне. Разработанная численная модель будет применяться для оптимизации параметров дугового источника плазмы в задачах практической реализации синтеза материалов с помощью описанного здесь метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Государственного задания ВУЗам (проект № FSWW-2025-0003).

- [1] Nishimura Y., Gubarevich A., Yoshida K., Okamoto K. // Open Ceramics. 21 (2025).
- [2] Zhao J., Seo D., Corbett J., Bokarev D.V. // Journal of Alloys and Compounds. **334**. 100 (2002).
- [3] Kang X., Zhang G., Chou K. // Journal of Materials Research and Technology. **35**. 100 (2025).
- [4] *Васильева Ю.З., Пак А.Я.* //Материаловедение. Энергетика. **27**. 62 (2021).
- [5] Svinukhova A., Yankovsky S., Misyukova A., Pak, A. // Solid Fuel. 58. 210 (2024).
- [6] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
- [7] Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразряд-

- ных процессов. М.: Наука, 1980.
- [8] Ховатсон А. Введение в теорию газового разряда. М.: Атомиздат, 1980.
- [9] *9. Меккер Г.* Электрические дуги и термическая плазма. М.: ИЛ, 1961.
- [10] *Кесаев И.Г.* Катодные процессы электрической дуги. М.: АН СССР, 1968.
- [11] *Любимов Г.А., Раховский В.И.* // Успехи физических наук. **125**. 665 (1978).
- [12] Галлагер Р. Метод конечных элементов. М.: Мир, 1984.
- [13] Povalyaev P.V., Pak A.Y., Frantsina E.V., Egorova V.V. // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. **123**. 106795 (2024).

Numerical modeling of temperature field in the system of graphite crucibles during electric arc synthesis of metal carbides and borides

D. E. Stovpets 1,2,a , G. A. Bleykher 1,b , A. Ya. Pak 2,c

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Engineering School of Nuclear Technology, B.P. Weinberg Research and Education Center ²National Research Tomsk Polytechnic University, Engineering School of Power Engineering, Laboratory of Advanced Materials of the Power Industry Tomsk, 634034, Russia

E-mail: ades30@tpu.ru, bga@tpu.ru, cayapak@tpu.ru

The increasing demand for materials with unique physical properties creates the need for new methods of obtaining such materials. One of the most promising is the method of synthesis of substances using energy of arc discharge generated in atmospheric conditions, in this way it is possible to obtain carbides and borides of various metals. This method is distinguished by the possibility of realization in open air environment and relatively short duration of working process. One of the problems that arise in the development of technologies based on this method is to find the most appropriate operating parameters of the set. The solution of this problem only by experiment is very resource-consuming. It is advisable to use numerical modeling here. The proposed paper describes a numerical model of thermal processes in an electric arc reactor based on the heat conduction equation with a surface heat source. Using experimental measurements the heat transfer coefficient between the reactor elements is determined. The operability of the developed numerical model and the method of setting the surface heat source is demonstrated. The numerical model will be used to optimize the parameters of the arc plasma source in the practical implementation of materials synthesis using the method described here.

PACS: 02.30.Jr, 02.60.Cb, 44.10.+i, 52.80.Mg

Keywords: numerical modelling, temperature fields, arc discharge, heat conduction equation. Received 07 April 2025.

Сведения об авторах

- 1. Стовпец Даниил Евгеньевич студент; e-mail: des30@tpu.ru.
- 2. Блейхер Галина Алексеевна доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (382) 260-63-39 (2861), e-mail: bga@tpu.ru.
- 3. Пак Александр Яковлевич доктор тех. наук, зав. лабораторией; тел.: (382) 270-17-77 (2316), e-mail: ayapak@tpu.ru.