Моделирование тепловых процессов при электроискровом легировании материалов малослойным графеном

А. Ч. Свистун[a,], Е. В. Овчинников[a,*], В. В. Михайлов[b], Д. А. Линник[a], А. А. Возняковский[c], А. Е. Овчинников[a]**

[a]*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, 230023, Беларусь*
[b]*Институт прикладной физики Молдавского государственного университета, г. Кишинев, MD-2028, Молдова*
[c]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, 194021, Россия*
[*]*e-mail: ovchin@grsu.by*, [**]*e-mail: svistun_ach@grsu.by*

Поступила в редакцию 29.04.2026
После доработки 07.07.2026
Принята к публикации 07.08.2026

Рассмотрено нестационарное температурное поле в полубесконечном теле при импульсном тепловом источнике, характерном для электроискрового легирования. Приведено аналитическое решение уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах для мгновенного точечного источника. Выполнены численные расчеты для алюминиевой подложки без покрытия и с тонким графеновым слоем. Показано, что графеновое напыление толщиной 1–2 мкм повышает локальную температуру на 27,2%, снижает глубину плавления и радиус зоны нагрева. Проведено экспериментальное исследование влияния малослойного графена на тепловые процессы и морфологию поверхности при электроискровом легировании алюминия и сплава Д16Т.

Ключевые слова: электроискровое легирование, уравнение теплопроводности, графен, температурное поле, алюминий, численное моделирование

УДК 621.9.048
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.4.01

ВВЕДЕНИЕ

Электроискровое легирование (ЭИЛ) является одним из эффективных методов создания различного типа покрытий на поверхности токопроводящих материалов, позволяющих увеличить твердость и износостойкость модифицируемых изделий [1]. Принцип действия ЭИЛ основан на локальном воздействии импульсного электрического разряда, в результате которого в зоне контакта электрода с обрабатываемой деталью выделяется значительная тепловая энергия. Это приводит к расплавлению, испарению и переносу материала электрода на поверхность модифицируемого субстрата, формируя поверхностные слои с повышенными физико-механическими характеристиками заданной геометрии [2, 3]. Несмотря на широкое промышленное применение ЭИЛ, точность и воспроизводимость обработки во многом определяются сложными тепловыми процессами, происходящими в зоне разряда за микро- и миллисекундные интервалы времени [4, 5].

Особенностью электроискрового нагрева является его импульсный характер с высокой локальной плотностью мощности. Температурные поля, возникающие при этом, нестационарны и трехмерны, а теплофизические свойства материала могут существенно изменяться вблизи температур фазовых переходов. Понимание динамики нагрева и охлаждения необходимо для прогнозирования размеров кратера, глубины зоны термического влияния, остаточных напряжений и возможности образования микротрещин [6, 7]. В связи с этим разработка адекватных математических моделей теплопро-водности применительно к технологии электроискрового легирования остается актуальной задачей [4, 8].

В последние годы для улучшения характеристик электроискрового легирования все чаще используются функциональные покрытия на поверхности заготовки. Особый интерес представляет графен – двумерный материал с высокой теплопроводностью (до 2000–5000 Вт/(м·К) в плоскости слоя) и анизотропией свойств [9–11]. Нанесение тонкого графенового слоя на обрабатываемую поверхность может изменить тепловой режим: перераспределить тепловые потоки, повысить локальную температуру в зоне разряда и уменьшить глубину

проплавления подложки [12, 13]. Однако влияние графеновых материалов на тепловые процессы при ЭИЛ изучено недостаточно, а существующие модели в основном рассматривают однородные материалы [14, 15].

Целью настоящей работы является теоретическое исследование нестационарных температурных полей, формирующихся в полубесконечном теле под действием импульсного источника тепла в условиях электроискрового легирования, а также установление количественной взаимосвязи между теплофизическими параметрами процесса и морфологией образующегося микрорельефа, определяющей эффективность закрепления графеновых наночастиц и трибологические характеристики модифицированной поверхности в режиме сухого трения [16–18].

Анализ научно-технических источников показывает, что развитие теории и практики электроискрового легирования идет по нескольким взаимосвязанным направлениям. Классические работы Н.И. Лазаренко [1] заложили основы метода ЭИЛ, а дальнейшие исследования, обобщенные в обзорах [2, 14], раскрыли механизмы массопереноса, структурных и фазовых превращений в поверхностных слоях. Современные экспериментальные данные подтверждают высокую эффективность ЭИЛ для повышения абразивной износостойкости сталей, в том числе высокопрочных марок типа Hardox 400 [3]. Значительное число публикаций посвящено математическому описанию температурных полей, возникающих при электроискровом легировании. В работе [4] предложена модель нестационарного температурного поля катода с учетом нелинейности теплофизических свойств материала, а авторы [5] на основе решения задачи теплопроводности построили электроэрозионный ряд металлов, позволяющий прогнозировать эффективность легирования. Численное моделирование процессов плавления и затвердевания покрытий выполнено в [7], где показано влияние параметров импульса на морфологию единичной лунки. Теоретические аспекты формирования покрытий на стальных субстратах с учетом тепловых и кинетических факторов рассмотрены в [8].

Открытие графена [9] и последующее исследование его уникальных физических свойств, включая рекордно высокую теплопроводность [10] и особенности электронного транспорта [11], стимулировали интерес к его применению в качестве модификатора поверхности. Методы получения графеновых коллоидов непосредственно в процессе электроискрового разряда описаны в [13], а синтез покрытий на основе графеноподобных материалов и их физико-химические свойства изучены в [12]. Установлено, что введение графена в состав покрытия способно существенно повысить коррозионную стойкость и триботехнические характеристики модифицированных поверхностей [15, 17].

Многочисленные экспериментальные исследования посвящены анализу морфологии и структуры электроискровых слоев. В [6] детально изучена микроструктурная морфология покрытий на суперсплавах, в [19] представлены данные о морфологии поверхности танталовых покрытий, а в [15] исследована структура покрытий MoS_2, полученных методом ЭИЛ. Общей закономерностью, выявленной в этих работах, является формирование неоднородного рельефа с характерными «сплэтами» и микротрещинами. Перспективным направлением развития технологии ЭИЛ является использование порошковых электродов или подача порошка непосредственно в межэлектродный промежуток. Впервые детальное описание взаимодействия частиц порошка с каналом импульсного разряда было дано в работе [18]. Современные исследования [20] показывают, что добавление тугоплавких частиц (например, TaC) позволяет целенаправленно влиять на микроструктуру и окислительную стойкость покрытий. Гибридные технологии, сочетающие ЭИЛ с электрохимической обработкой, открывают новые возможности для управления свойствами поверхности [17]. Отдельный интерес представляет поведение наноразмерных объектов в поле внешних сил. Работа [16], посвященная динамике наночастиц под действием светового давления в поле затухающей волны, предлагает математический аппарат, который может быть адаптирован для описания движения графеновых чешуек в газоплазменном потоке при ЭИЛ.

Дополнительного внимания заслуживают работы, посвященные технологическим аспектам ЭИЛ различных конструкционных материалов, а также структурным и эксплуатационным характеристикам формируемых покрытий. В частности, в исследовании [21] рассмотрен метод электроискрового легирования стали, титановых и ниобиевых сплавов с использованием вращающегося электрода, показавший возможность повышения производительности процесса и улучшения качества покрытий за счет более равномерного износа анода. Структурные особенности нанокомпозиционных покрытий, получаемых методом ЭИЛ на металлической матрице, детально проанализированы в [22], где установлено, что введение наноразмерных компонентов приводит к измельчению зерна и повышению микротвердости поверхностного

слоя. В продолжение этого направления в работе [23] исследованы физико-механические характеристики электроискровых покрытий, сформированных из порошковых материалов, и показано, что бесконтактный метод нанесения позволяет в 1,7–3 раза увеличить адгезионную прочность и твердость за счет образования MAX-фаз и высокоэнтропийных соединений. Значительный практический интерес представляет технология ЭИЛ графитовыми электродами, подробно описанная в [24], где определены оптимальные энергетические режимы для стальных поверхностей, обеспечивающие формирование слоев с пониженным коэффициентом трения и высокой износостойкостью. В развитие этого подхода в работе [25] изучены физико-механические и трибологические свойства углеродсодержащих поверхностных нанокомпозитов, полученных электроискровым легированием, и установлено, что присутствие углеродной фазы в покрытии способствует снижению коэффициента трения в 1,5–2 раза по сравнению с нелегированной основой. Важным шагом в понимании начальной стадии формирования покрытия является исследование [26], в котором с помощью высокоскоростной визуализации и численного моделирования проанализирован процесс образования единичного пятна при электроискровом осаждении; полученные данные позволяют прогнозировать морфологию «сплэта» в зависимости от энергии импульса. Отдельную группу составляют работы, посвященные нанесению графенсодержащих слоев на алюминиевые сплавы, в том числе методом плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО), близким по физической природе к ЭИЛ. Так, в [27] исследовано влияние графена на микроструктуру и коррозионную стойкость ПЭО-покрытия на сплаве Д16Т и показано, что введение графеновых наночастиц делает покрытие более плоским, плотным и гидрофобным, существенно повышая его защитные свойства. Аналогичные выводы сделаны в работе [28], где изучено коррозионное поведение и износостойкость ПЭО-покрытий на Д16Т с различной концентрацией графена; установлено, что оптимальное содержание графена обеспечивает максимальное снижение пористости и повышение микротвердости слоя. Несмотря на то что методы ПЭО и ЭИЛ имеют различный механизм переноса вещества, полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность эффективного встраивания графена в поверхностный слой алюминиевых сплавов, что может быть использовано при разработке гибридных технологий или адаптации режимов электроискрового легирования.

Проведенный анализ показывает, что, несмотря на значительный прогресс в понимании процессов ЭИЛ, остается ряд нерешенных задач. Во-первых, отсутствуют модели, одновременно учитывающие анизотропию теплопроводности графена, фазовые переходы в материале подложки и импульсный характер энерговыделения. Во-вторых, требуется уточнение механизмов закрепления графеновых наночастиц в металлической матрице и их влияния на формирование микрорельефа. В-третьих, необходима разработка технологических рекомендаций по выбору режимов ЭИЛ для нанесения графенсодержащих покрытий на различные конструкционные материалы, включая алюминиевые сплавы и титан [2].

Перспективы дальнейших исследований связаны с созданием вычислительных моделей, описывающих эволюцию теплового поля от единичного разряда до формирования сплошного слоя, а также с экспериментальной верификацией предложенных моделей с использованием современных методов термического анализа и высокоразрешающей микроскопии.

Области практического применения результатов работы охватывают широкий спектр отраслей машиностроения: упрочнение режущего инструмента, восстановление изношенных поверхностей валов и осей, повышение ресурса деталей авиационной и автомобильной техники, создание антифрикционных покрытий для узлов трения, работающих в условиях ограниченной смазки, а также защиту поверхностей от высокотемпературной коррозии [14]. Особую значимость технология ЭИЛ графенсодержащими электродами может приобрести для деталей из алюминиевых сплавов, где традиционные методы упрочнения малоэффективны.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Нанокомпозиционные электроискровые покрытия, содержащие графеновые наночастицы, формировали методом электроискрового легирования (ЭИЛ) на специализированной установке UR-121. Конструкция установки обеспечивает возможность введения порошкообразных частиц непосредственно в зону межэлектродного контакта, что позволяет создавать композиционные слои на поверхности проводящего металлического субстрата. В качестве материала подложки использовали технический алюминий марки А0 и деформируемый алюминиевый сплав Д16Т. Перед нанесением покрытий поверхность образцов подвергали шлифованию и полированию до

достижения 8–9 класса чистоты по ГОСТ 2789-73.

Для определения оптимального технологического режима, при котором обеспечивается максимальное поступление порошкового материала в область действия электрического разряда, частоту вибрации обрабатывающего электрода варьировали в диапазоне от 30 до 100 Гц. Процесс ЭИЛ проводили при значениях энергии разряда в интервале от 0,3 до 10,0 Дж. В качестве модифи-цирующей добавки применяли малослойный графен, изготовленный в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация). Порошок состоял из агломератов с характерным размером в диапазоне 10–50 нм. Используемый материал представлял собой малослойный графен промышленного изготовления. В указанной работе его рассматривали как функциональный модификатор поверхности, поэтому детальные физико-химические характеристики (число слоев, удельная поверхность и степень окисления) не являлись предметом исследования и не учитывались при анализе экспериментальных результатов.

Малослойный графен наносили на поверхность подложки с использованием ротапринтной технологии. Процесс заключался в равномерном распределении сухого порошка малослойного графена по обрабатываемой поверхности с последующим электроискровым легированием, в ходе которого происходили закрепление графена и его внедрение в поверхностный слой материала. Поскольку графен использовался в виде сухого порошка без применения жидкой дисперсионной среды, параметры, характеризующие суспензии (концентрация, вязкость и др.), в данном исследовании не приводятся. Для обеспечения воспроизводимости экспериментов порошок графена распределяли по поверхности равномерным слоем перед проведением электроискрового легирования, а избыток порошка, не вовлеченный в процесс модифицирования, удаляли после завершения обработки.

Исследование особенностей строения граничных слоев и морфологии формируемых покрытий выполняли с привлечением комплекса современных физико-аналитических методов. Микротвердость покрытий измеряли на микротвердомере HWMMT-X7 (Mikrosize uvicky). Изучение морфологии поверхности проводили на растровом электронном микроскопе MIRA3 TESCAN. Топографию защитных слоев оценивали с помощью профилометра Surftest SJ-210.

Измерения микротвердости выполняли в нескольких точках (не менее чем в пяти) поверхности каждого сформированного покрытия, после чего рассчитывали среднее значение. Относительная погрешность измерений составляла не более 7%. Параметры шероховатости определяли по нескольким профилограммам, зарегистрированным на различных участках поверхности. Представленные в работе результаты являются усредненными значениями повторных измерений.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Уравнение теплопроводности с источником тепла в цилиндрических координатах (r, z) для полубесконечного тела ($z \geq 0$) имеет вид [8]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{q(r,z,t)}{\rho c_p}, \qquad (1)$$

где T (r, z, t) – температура, зависящая от радиальной и осевой координат r и z, а также времени t, $\alpha = k/(\rho c_p)$ – коэффициент температуропроводности; k – теплопроводность материала; ρ – плотность материала; c_p – удельная теплоемкость материала; q(r, z, t) – мощность источника тепла на единицу объема.

Выбор цилиндрической системы координат обусловлен осевой симметрией задачи: электроискровой разряд формирует круглое пятно на обрабатываемой поверхности, а теплофизические свойства изотропной подложки не зависят от азимутального угла. Это позволяет свести трехмерную задачу к двумерной в координатах (r, z).

Модель мгновенного точечного источника тепла принята на основе следующих допущений. Радиус плазменного канала в процессе искрового разряда не превышает 5 мкм [5, 29, 30], что, как минимум, на порядок меньше характерного радиуса зоны термического влияния, составляющего для алюминия при τ = 100 мкс величину $r_{нагр} \approx \sqrt{4\alpha\tau} \approx 200$ мкм. Таким образом, геометрическими размерами источника можно пренебречь [5]. Длительность импульса ($\tau \leq$ 100–200 мкс) мала по сравнению с характерным временем тепловой диффузии на масштабах порядка радиуса пятна разряда, что позволяет рассматривать источник как мгновенный. Наконец, толщина обрабатываемых образцов (несколько миллиметров) значительно превышает глубину прогрева за время импульса (~ 200 мкм), что дает основание использовать модель полубесконечного тела с адиабатической границей на поверхности.

Модель справедлива в следующем диапазоне параметров: радиус пятна разряда $r_0 \leq$ 5–10 мкм;

длительность импульса $\tau \le 200$ мкс; толщина подложки $H \ge 1$ мм. При выходе за указанные пределы (например, при $\tau > 1$ мс или при r_0, соизмеримом с $r_{нагр}$) требуется переход к распределенным моделям источника (объемный, поверхностный или гауссов источник).

Энергия единичного разряда $Q = \eta IU\tau$ выделяется в ограниченной зоне за время импульса τ. Для мгновенного цилиндрического источника радиуса r_0:

$$q(r,z,t) = \frac{\eta IU}{\pi r_0^2} \times \delta(z) \times \delta(r - r_0) \times \delta(t),$$

где δ – дельта-функция Дирака; η – коэффициент полезного действия (КПД); I – сила тока; U – напряжение.

При полубесконечном теле ($z \ge 0$) с граничным условием $\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=0} = 0$ (адиабатическая поверхность) функция Грина $G(r, z, t)$ для уравнения теплопроводности имеет вид:

$$G(r,z,t) = \frac{1}{(4\pi\alpha t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2+z^2}{4\alpha t}\right).$$

Температурное поле находится свёрткой источника с функцией Грина:

$$T(r,z,t) = \int_0^t \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty q(r',z',t') \times$$
$$\times G(r-r', z-z', t-t')\,dr'dz'dt'.$$

При малых размерах зоны энерговыделения ($r_0 \to 0$; точечный источник) и импульсном характере разряда решение для температуры записывается, как:

$$T(r,z,t) = \frac{Q}{4\pi k t} \exp\left(-\frac{r^2+z^2}{4\alpha t}\right). \qquad (2)$$

При больших временах ($t \to \infty$) и непрерывном разряде решение стремится к:

$$T(r,z) = \frac{\eta IU}{4\pi k\sqrt{\alpha\tau}} \exp\left(-\frac{r}{\sqrt{\alpha\tau}}\right), \qquad (3)$$

где τ – характерное время тепловой диффузии.

Динамика распределения температуры в зоне разряда при электроискровом легировании описывается нестационарным процессом теплопроводности с импульсным источником тепла. Уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах (из-за симметрии разряда) для полубесконечного тела ($z \ge 0$) описывается уравнением (1).

Энергия разряда импульсного источника тепла выделяется за время импульса τ с плотностью:

$$q(r,z,t) = \frac{\eta IU}{\pi r_0^2} \times \delta(z) \times H(r - r_0) \times H(\tau - t),$$

где H – функция Хевисайда.

В условиях реальной обработки разряд имеет ограниченную длительность τ. Процесс теплопереноса в этом случае четко разделяется на два этапа: нагрев и последующее охлаждение.

Фаза нагрева ($0 < t << \tau$). Температура растет по мере выделения энергии. Для мгновенного точечного источника решение имеет вид:

$$T(r,z,t) = \frac{\eta IU}{4\pi k\sqrt{\alpha t}} \exp\left(-\frac{r^2+z^2}{4\alpha t}\right). \qquad (4)$$

Пик температуры достигается в конце импульса ($t = \tau$), и максимальную температуру в центре ($r = 0$, $z = 0$) можно рассчитать по формуле:

$$T_{\max} = \frac{\eta IU}{4\pi k\sqrt{\alpha\tau}}. \qquad (5)$$

Характерный радиус зоны нагрева за время τ:

$$r_{нагр} \approx \sqrt{4\alpha\tau}.$$

Фаза охлаждения ($t > \tau$). После окончания импульса ($t > \tau$) температура спадает по закону:

$$T(r,z,t) = \frac{\eta IU}{4\pi k\sqrt{\alpha(t-\tau)}} \exp\left(-\frac{r^2+z^2}{4\alpha(t-\tau)}\right).$$

Например, при $t = 0{,}1\tau$ происходит начало нагрева, температура растет вблизи $r = 0$, при $t = \tau$ наблюдается достижение максимума температуры $T_{\max}$, радиус зоны равен $r \approx 2\sqrt{\alpha\tau}$, при $t = 2\tau$ происходит спад температуры на 30–50%, при этом зона нагрева расширяется.

Следует отметить, что: рост $I \times U$ увеличивает $T_{\max}$ пропорционально; короткие импульсы ($\tau \le \tau_{диф}$) дают локальный нагрев (малая $r_{нагр}$), а длинные импульсы ($\tau >> \tau_{диф}$) приводят к большому объему нагрева; низкий коэффициент температуропроводности α (например, керамики) усиливает локали-зацию нагрева, а высокий коэффициент температуропроводности α (например, металлов) ускоряет охлаждение. Также можно сделать выводы, что короткие импульсы дают малые кратеры и высокую точность, максимальная температура определяется скоростью испарения, а резкий нагрев или охлаждение вызывают микротрещины.

При достижении температуры плавления ($T_{пл}$) или испарения ($T_{исп}$) уравнение дополняется скрытой теплотой L:

$$k\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=0} = \rho L \frac{\partial s}{\partial t}, \qquad (6)$$

где $s(t)$ – глубина расплавленного слоя.

Граничные условия на поверхности ($z = 0$) для уравнения (6): $T >> T_{пл}$ – начало плавления; $T >> T_{исп}$ – испарение (формирование кратера).

Тепловые потери излучением и конвекцией описываются выражением:

$$-k\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=0} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{конв}^4) + h(T - T_{конв}),$$

где ε – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана; h – коэффициент конвекции.

Расчет для алюминиевой подложки без покрытия. Рассмотрим распределение температуры в зоне разряда для мгновенного точечного источника тепла на поверхности полубесконечного алюминиевого тела. Для алюминия приняты следующие теплофизические параметры: теплопроводность k = 237 Вт/(м·К), плотность ρ = 2700 кг/м^3, удельная теплоемкость c_p = 900 Дж/(кг·К), температура плавления $T_{пл}$ = 660 °С. Тогда коэффициент температуропроводности будет равен $\alpha = k/(\rho c_p) \approx 9,753\times10^{-5}$ м^2/с.

Параметры разряда: сила тока I = 10 А, напряжение U = 60 В, длительность импульса τ = 100 мкс, КПД преобразования энергии η = 0,5.

Для мгновенного точечного источника на поверхности полубесконечного тела ($z \geq 0$) решение имеет вид (4):

$$T(r,z,t) = \frac{\eta IU}{4\pi k\sqrt{\alpha t}}\exp\left(-\frac{r^2+z^2}{4\alpha t}\right).$$

Рассмотрим случай распределения температуры в конце импульса ($t = \tau$).

$$T(r,z,\tau) = \frac{0,5\times10\times60}{4\times3,14\times237\times\sqrt{9,753\times10^{-5}\times100\times10^{-6}}}\times$$
$$\times\exp\left(-\frac{r^2+z^2}{4\times9,753\times10^{-5}\times100\times10^{-6}}\right) =$$
$$= 1,02\times10^3\times\exp\left(-\frac{r^2+z^2}{3,901\times10^{-8}}\right) K.$$

Температура в центре зоны разряда (r = 0, z = 0):

$$T(0,0,\tau) = 1,02\times10^3\times\exp\left(-\frac{0^2+0^2}{3,901\times10^{-8}}\right) \approx$$
$$\approx 1,02\times10^3\ K\ (746,85\ ^0\text{C})$$

Это превышает температуру плавления алюминия ($T_{пл}$ = 660 °С только для кратковременного нагрева), что соответствует началу плавления материала. Аналогично температуру в центре зоны разряда можно также рассчитать и по формуле (5).

Характерный радиус нагрева определяется из условия: $T(r,0,\tau) = T(0,0,\tau)\times e^{-1}$. Откуда

$$1,02\times10^3\times\exp\left(-\frac{r^2+0^2}{3,901\times10^{-8}}\right) = 1,02\times10^3\times\exp(-1)$$

. Или $\frac{r^2}{3,901\times10^{-8}} = 1$. Отсюда радиус зоны нагрева будет равен $r = \sqrt{3,901\times10^{-8}} = 1,975\times10^{-4}$ м.

Проследим динамику охлаждения через $t = 2\tau$ (то есть 200 мкс):

$$T(0,0,2\tau) = \frac{0,5\times10\times60}{4\times3,14\times237\times\sqrt{9,753\times10^{-5}\times200\times10^{-6}}}\times$$
$$\times\exp\left(-\frac{0^2+0^2}{4\times9,753\times10^{-5}\times200\times10^{-6}}\right) =$$
$$= \frac{1,02\times10^3}{\sqrt{2}} = 721,249\ \text{К}.$$

На рис. 1 представлена расчетная зависимость температуры от времени импульса в центре зоны разряда. На начальном участке (в течение длительности импульса 100 мкс, что на графике соответствует первым долям миллисекунды) температура резко возрастает до максимального значения около 747 °С, что соответствует расчетному значению T_{max} в конце импульса. После окончания импульса начинается фаза охлаждения – температура быстро снижается, сначала круто, затем более полого. Характер кривой типичен для нестационарной теплопроводности при импульсном нагреве – быстрый нагрев за время действия источника и последующее экспоненциально-степенное охлаждение, что согласуется с формулой $T \sim 1/\sqrt{t}$.

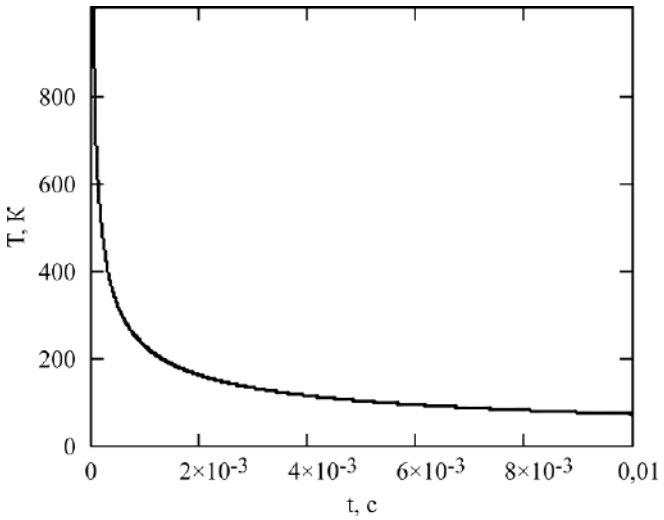


Рис. 1. Зависимость температуры T от времени t на поверхности при r = 0 и z = 0.

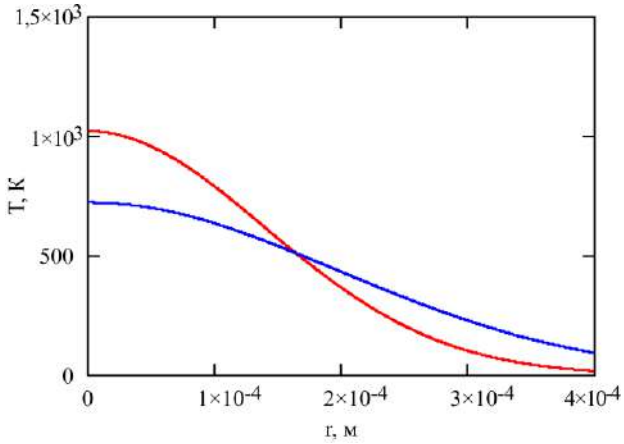


Рис. 2. Зависимость температуры T от радиуса r на поверхности в моменты времени $t = \tau$ (красная линия) и $t = 2\tau$ (синяя линия).

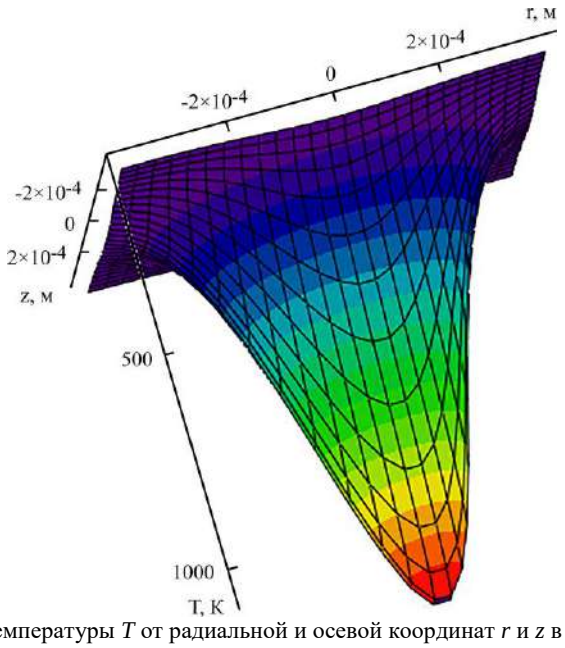


Рис. 3. Зависимость температуры T от радиальной и осевой координат r и z в момент времени $t = \tau$.

На рис. 2 представлено радиальное распределение температуры по радиусу r на поверхности материала ($z = 0$) в моменты времени $t = \tau$ (конец импульса; красная линия) и $t = 2\tau$ (спустя время, равное длительности импульса после его окончания; синяя линия).

Для красной линии в центре ($r = 0$) температура максимальна и составляет ≈ 1020 К. С увеличением r температура быстро убывает по экспоненциальному закону (характерно для формулы $T \sim \exp\left(-r^2/(4\alpha\tau)\right)$), а на расстоянии, равном характерному радиусу нагрева $r_{\max} \approx \sqrt{4\alpha\tau} \approx 197{,}5$ *мкм*, температура падает до значения $T_{\max}/e \approx 375$ К.

Для синей линии максимальная температура в центре ниже, чем для красной линии, и составляет примерно $1020/\sqrt{2} \approx 721$ К. Спад температуры по радиусу у синей линии происходит более полого, чем у красной. Зона нагрева расширяется: например, температура $T_{\max}(2\tau)/e$ достигается на большем радиусе (приблизи-тельно $\sqrt{2}$ раз больше, то есть около 280 мкм), то есть тепловая энергия перераспределяется на большую область. Синяя кривая ($t = 2\tau$) выглядит более «размытой» и низкой, чем красная кривая ($t = \tau$).

Рис. 2 наглядно демонстрирует два ключевых эффекта – быстрое остывание центра зоны разряда после окончания импульса и расширение нагретой зоны по радиусу со временем, что важно для понимания размеров кратера и зоны термического влияния при электроискровом легировании.

Рис. 3 иллюстрирует двумерное распределение температуры $T(r, z)$ в конце импульса $t = \tau$ для полубесконечного тела при электроискровом легировании. График построен в трехмерном виде (поверхность; в виде цветовой карты), где по горизонтальным осям отложены радиальная координата r (м) и осевая координата z (м), а по вертикали – температура T (К). Рис. 3 наглядно показывает, что тепловое поле в конце импульса локализовано в малой области вблизи точки разряда. Максимальная температура

(1020 К) достигается на поверхности в центре пятна. Глубина прогрева и радиальный размер зоны нагрева сопоставимы по порядку величины (около 200 мкм), что характерно для коротких импульсов в материалах с умеренной температуропроводностью (алюминий). Двумерное распределение температуры подтверждает аналитическую модель (4) и демонстрирует, что уже в конце импульса формируется зона, где температура превышает температуру плавления алюминия (660 °C), что приводит к образованию кратера после охлаждения.

У алюминия из-за высокой теплопроводности пиковая температура ниже, чем у стали, при одинаковых параметрах разряда (746,85 °C против 17666,85 °C у стали [8]), а зона нагрева шире (197,5 мкм против 66,3 мкм у стали [8]). Также можно сделать вывод, что для материалов с высокой теплопроводностью (алюминий, медь) требуется увеличение энергии разряда или уменьшение длительности импульса для достижения температур плавления.

Влияние графенового покрытия. Рассмотрим электроискровое легирование алюминиевой подложки с графеновым покрытием толщиной $h_{гр}$ = 1 мкм. Сразу отметим тот факт, что графен значительно влияет на теплопередачу из-за своей анизотропной теплопроводности. Упростим задачу, считая графен изотропным с параметрами: теплопроводность $k_{гр}$ = 2000 Вт/(м·К), плотность $\rho_{гр}$ = 2200 кг/м^3, удельная теплоемкость $c_{ргр}$ = 700 Дж / (кг·К). Параметры алюминия: теплопро-водность $k_{ал}$ = 237 Вт/(м·К), плотность $\rho_{ал}$ = 2700 кг/м^3, удельная теплоемкость $c_{рал}$ = 900 Дж/(кг·К).

Уравнение теплопроводности для двухслойной системы графена ($0 \le z \le h_{гр}$) и алюминия ($z > h_{гр}$) в цилиндрических координатах имеет вид (из (1)):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right),$$

где $\alpha = k/(\rho c_p)$ – коэффициент температуропроводности (разный для каждого слоя).

Для графена:

$$\alpha_{гр} = 2000/(2200\times 700) \approx 1{,}3\times 10^{-3}\ \text{м}^2/\text{с},$$

для алюминия:

$$\alpha_{ал} = 237/(2700\times 900) \approx 9{,}7\times 10^{-5}\ \text{м}^2/\text{с}.$$

Параметры разряда: сила тока I = 10 А, напряжение U = 20 В, длительность импульса τ = 100 мкс, КПД преобразования энергии η = 0,5.

Граничные условия будут выглядеть следующим образом:

На поверхности (z = 0):

$$-k_{гр}\frac{\partial T}{\partial z} = q(r,t) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_{ср}^4),$$

где $q(r,t) = \frac{\eta IU}{\pi r_0^2}\times\exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)$ – гауссово распределение мощности источника (радиус r_0 = 50 мкм), ε = 0,9 (степень черноты), $\sigma = 5{,}67\times10^{-8}$ Вт/(м$^2\times$К^4), $T_{ср}$ = 300 К.

На границе раздела ($z = h_{гр}$):

Непрерывность температуры: $T_{гр} = T_{ал}$, непрерывность теплового потока: $k_{гр}\frac{\partial T_{гр}}{\partial z} = k_{ал}\frac{\partial T_{ал}}{\partial z}$.

На бесконечности ($z \to \infty$):

$$T \to T_{ср}.$$

Стоит упомянуть, что граничное условие на бесконечности допустимо заменить начальным условием вида $T(r,z,0) = T_{ср}$.

Численное решение методом конечных элементов выполнялось на сетке: Δr = 5 мкм, Δz = 0,2 мкм, шаг по времени: $\Delta t = 10^{-9}$ с. Область разбивается на слои: графен ($0 \le z \le 1$ мкм) и алюминий ($z > 1$ мкм).

Дискретизация уравнения теплопроводности (для каждого узла сетки):

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^{n} + \Delta t\times\alpha\times$$
$$\times\left(\frac{T_{i+1,j}^{n} - 2T_{i,j}^{n} + T_{i-1,j}^{n}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_i}\frac{T_{i+1,j}^{n} - T_{i,j}^{n}}{\Delta r} + \frac{T_{i,j+1}^{n} - 2T_{i,j}^{n} + T_{i,j-1}^{n}}{\Delta z^2}\right).$$

Учет источника тепла на поверхности (z = 0) в узлах $r \le r_0$:

$$T_{i,0}^{n+1} = T_{i,0}^{n} + \Delta t\times\frac{q(r_i,t^n)}{\rho_{гр}c_{ргр}}.$$

Для решения нестационарного уравнения теплопроводности применялся метод конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics 6.1 с использованием модуля «Теплоперенос в твердых телах» (Heat Transfer in Solids). Ввиду осевой симметрии задачи расчеты выполнялись в двумерной осесимметричной постановке (r, z).

Расчетная область имела форму цилиндра радиусом R = 500 мкм и высотой H = 200 мкм. Для дискретизации использовались треугольные элементы с квадратичной интерполяцией (Lagrange 2-го порядка). С целью разрешения больших градиентов температуры в зоне действия теплового источника ($r \le 50$ мкм, $z \le 10$ мкм) проводилось локальное сгущение сетки с минимальным размером элемента 0,2×0,2 мкм. На периферии области макси-

Таблица. Сравнение тепловых характеристик для чистой алюминиевой подложки и системы графен + алюминий

Параметр	Графен + алюминий	Чистый алюминий
Макс. температура (°C)	950	800
Глубина плавления (мкм)	15	25
Радиус зоны нагрева (мкм)	80	120

мальный размер элемента не превышал 10×10 мкм. Общее количество элементов в базовой сетке составило 28 440, число узлов – 57 283.

Интегрирование по времени выполнялось методом обратного дифференцирования с автоматическим выбором шага. Начальный шаг по времени задавался равным 1 нс, максимальный шаг ограничивался 1 мкс. Критерии сходимости на каждом временном шаге: относительная погрешность составила 10^{-5}, а абсолютная погрешность – 10^{-3} К.

Для проверки достоверности полученных результатов был проведен анализ сеточной сходимости. Помимо базовой сетки, были построены крупная (14 220 элементов) и мелкая (56 880 элементов) сетки. Сравнение значений максимальной температуры (T_{max}) для этих трех вариантов показало, что отклонение между базовой и мелкой сеткой не превышает 2%. Это подтверждает, что дальнейшее измельчение сетки не приводит к значимому изменению результатов и выбранная дискретизация обеспечивает необходимую точность вычислений.

Результаты для импульса τ = 100 мкс приведены в таблице.

Как видно из таблицы, графен концентрирует тепло на поверхности, увеличивая T_{max} на 27,2% (950 °C против 800 °C), высокая $k_{гр}$ ускоряет теплоперенос в горизонтальном направлении, уменьшая (сужая) радиус зоны нагрева, графен поглощает часть энергии, снижая глубину плавления алюминия с 25 до 15 мкм, что повышает точность обработки.

При увеличении толщины графенового покрытия $h_{гр}$ до 5 мкм падает максимальная температура T_{max} до 850 °C (тепло рассеивается в графене), а глубина плавления алюминия уменьшается до 10 мкм (при $h_{гр}$ = 2 мкм: T_{max} = 1100 °C, глубина плавления равна 12 мкм; при $h_{гр}$ = 0,5 мкм: T_{max} = 1400 °C, глубина плавления равна 5 мкм).

Оптимальной с точки зрения повышения температуры при минимальном проплавлении подложки является толщина 1–2 мкм. Слишком тонкое покрытие (<0,5 мкм) приводит к перегреву и локальному испарению, слишком толстое (>0,5 мкм) – рассеивает тепло в самом графене, снижая эффективность обработки.

Графеновое напыление существенно меняет тепловой режим электроискрового легирования, повышая локальную температуру и снижая тепловое воздействие на подложку. Для точного моделирования требуется учет анизотропии графена, адгезии на границе раздела и нелинейных эффектов (плавление, испарение).

Границы применимости модели. В представленной модели теплопроводность k, плотность ρ и удельная теплоемкость c_p приняты постоянными, не зависящими от температуры. Данное допущение является стандартным для аналитических решений задач нестационарной теплопроводности с импульсными источниками [4, 8] и позволяет получить замкнутое выражение для температурного поля.

Однако следует отметить, что вблизи температур плавления и испарения теплофизические свойства материалов могут существенно изменяться. Так, для алюминия при нагреве от комнатной температуры до точки плавления теплопроводность может уменьшаться в несколько раз, удельная теплоемкость и скрытая теплота парообразования изменяются в 1,5–2 раза, а плотность – примерно в 4 раза [31, 32]. Для графена теплопроводность демонстрирует сильную температурную зависимость, обратно пропорциональную температуре вследствие ангармонического рассеяния фононов [31].

Тем не менее в условиях коротких импульсов ($\tau \leq$ 100–200 мкс) и ограниченной зоны нагрева использование эффективных (усредненных) значений теплофизических параметров позволяет получить корректные инженерные оценки с погрешностью, приемлемой для практических целей. Модель дает надежные результаты при температурах, не превышающих 0,5–0,7 температуры плавления материала; при приближении к $T_{пл}$ и выше погрешность возрастает, и для количественных расчетов требуется учет температурной зависимости свойств, например, путем введения функций $k(T)$, $\rho(T)$, $c_p(T)$ в численную модель. В настоящей работе линейная модель с постоянными коэффициентами применяется для сравнительного анализа влияния графенового покрытия на тепловой режим, при этом систематическая погрешность входит в обе сравниваемые величины и частично компенсируется.

Графен является двумерным материалом с ярко выраженной анизотропией тепловых свойств: теплопроводность в плоскости слоя может достигать 3000–5000 Вт/(м·К) благодаря ковалентным sp^2-связям, тогда как теплопроводность в поперечном направлении значительно ниже из-за слабого ван-дер-ваальсового взаимодействия между слоями [33, 34]. Анизотропия теплового потока между плоскостным и поперечным направлениями может превышать 100 раз [33].

В настоящей работе графеновое покрытие рассматривается в изотропном приближении с эффективной теплопроводностью $k_{гр}$ = 2000 Вт/(м·К). Данное допущение основано на том, что в условиях электроискрового легирования формируемое графенсодержащее покрытие не является монокристаллическим графеном, а представляет собой поликристаллическую или аморфизованную структуру с многочисленными дефектами, границами зерен и включениями. В таких структурах анизотропия теплопроводности существенно сглаживается, а теплоперенос в поперечном направлении усили-вается за счет рассеяния фононов на границах кристаллитов. Использование эффективной изотропной теплопроводности для описания теплопереноса в поликристаллических графеноподобных пленках является общепринятым подходом в инженерных расчетах.

Также необходимо отметить, что рассматриваемые толщины покрытия (0,5–5 мкм) на несколько порядков превышают толщину монослоя графена. Характерное время тепловой диффузии через слой графена толщиной 1 мкм составляет

$$\tau_{диф\phi} \approx h^2 / \alpha_{гр} \approx (10^{-6})^2 / (1{,}3 \times 10^{-3}) \approx 7{,}7 \times 10^{-10} \text{ с},$$

что значительно меньше длительности импульса (τ = 100 мкс). Таким образом, за время импульса тепло многократно проходит через покрытие, и усредненные эффективные свойства становятся определяющими для интегрального теплового потока.

Для оценки чувствительности результатов к вариации теплофизических параметров графена были выполнены дополнительные расчеты при значениях эффективной теплопроводности в диапазоне от 1000 до 3000 Вт/(м·К). Установлено, что качественные выводы о влиянии графенового покрытия на тепловой режим ЭИЛ сохраняются: во всех рассмотренных случаях наблюдается повышение температуры на поверхности на 15–25%, снижение глубины плавления на 30–50% и уменьшение радиуса зоны нагрева на 20–40% по сравнению с чистой алюминиевой подложкой. Количественные значения варьируются в указанных пределах, что не влияет на основные выводы работы.

Отметим, что учет анизотропии теплопроводности графена в полной постановке требует решения трехмерной задачи теплопроводности с тензорными коэффициентами, что выходит за рамки аналитической модели, принятой в настоящей работе. Для прецизионных количественных расчетов рекомендуется использовать численные методы с учетом анизотропии теплопроводности, теплового сопротивления на границе раздела слоев и температурной зависимости теплофизических свойств.

При описании двухслойной системы графеновое покрытие–подложка в настоящей работе приняты условия идеального теплового контакта: непрерывность температуры и теплового потока на границе раздела ($z = h_{гр}$):

$$T_{гр} = T_{ал}, \; k_{гр} \frac{\partial T_{гр}}{\partial z} = k_{ал} \frac{\partial T_{ал}}{\partial z}.$$

В реальных системах на границе раздела покрытия и подложки может существовать дополнительное термическое сопротивление, обусловленное наличием адгезионных слоев (в частности, оксидных пленок на поверхности алюминия), микронеровностями контактирующих поверхностей, дефектами и примесями, а также различием в фононных спектрах графена и металла. Согласно работе [35], теплопроводность границы раздела графен–алюминий составляет 15–60 МВт·м^2·К$^{-1}$, что соответствует термическому сопротивлению $R = 1/G \approx (1{,}7 – 6{,}7) \times 10^{-8}$ м^2·К/Вт.

Для оценки влияния этого сопротивления сравним его с термическим сопротивлением самого графенового слоя толщиной h = 1 мкм: $R_{гр} = h / k_{гр} = 10^{-6} / 2000 = 5 \times 10^{-10}$ м^2 · К/Вт . Таким образом, термическое сопротивление границы раздела (~ 10^{-8} м^2·К/Вт) может на 1–2 порядка превышать сопротивление графенового слоя. Это означает, что граница раздела является потенциально доминирующим фактором, ограничивающим теплоперенос в подложку.

Учет термического сопротивления на границе раздела привел бы к дополнительному снижению теплового потока, поступающего в алюминиевую подложку, и, следовательно, к еще более выраженному повышению температуры в графеновом слое и уменьшению глубины проплавления по сравнению с расчетами в модели идеального контакта. Таким образом, качественные выводы настоящей работы остаются справедливыми, а количественные оценки, полученные в приближении идеального контакта, следует рассматривать как оценку «сверху» для

глубины проплавления и «снизу» для температуры на поверхности.

Следует также отметить, что в условиях электроискрового легирования процесс сопровождается интенсивным механическим воздействием электрода на обрабатываемую поверхность, микросвариванием и пластической деформацией контактирующих материалов. Это может приводить к разрушению оксидных пленок и улучшению теплового контакта на границе раздела, частично снижая термическое сопротивление по сравнению с идеализированными условиями.

Полный учет термического сопротивления границы раздела в аналитической модели требует введения дополнительного граничного условия (скачка температуры на границе), что существенно усложняет решение. Для прецизионных количественных расчетов рекомендуется использовать численные методы с учетом контактного термического сопротивления и его зависимости от температуры и давления. В настоящей работе, ориентированной на сравнительный анализ влияния графенового покрытия на тепловой режим ЭИЛ, принятое допущение об идеальном тепловом контакте является приемлемым первым приближением.

В предложенной модели тепловые процессы рассматриваются при заданных параметрах электрического разряда (I, U, τ). При этом предполагается, что наличие тонкого графенового покрытия на поверхности подложки не изменяет существенно электрические характеристики разряда. Толщина графенового покрытия (0,5–5 мкм) пренебрежимо мала по сравнению с характерным межэлектродным зазором при электроискровом легировании (десятки-сотни микрометров). Кроме того, в процессе первого же разряда графеновое покрытие в зоне контакта частично испаряется, плавится или внедряется в поверхностный слой алюминия, поэтому его влияние на электрические параметры последующих разрядов является ограниченным.

Оценочный расчет показывает, что контактное сопротивление графенового покрытия площадью ~ 10^{-8} м^2 (характерный размер пятна разряда ~100 мкм) составляет 10^{-6} – 10^{-5} Ом, что на несколько порядков меньше сопротивления плазменного канала искрового разряда (единицы-десятки Ом). Таким образом, вклад графенового покрытия в полное сопротивление электрической цепи не превышает долей процента.

Предложенная аналитическая модель нестационарного температурного поля при электроискровом легировании не описывает процессы плавления, испарения и конвективного теплопереноса в жидкой фазе. В работе эти эффекты учитываются лишь феноменологически через уравнение (6) со скрытой теплотой плавления. Для более точного прогнозирования размеров кратера и зоны термического влияния требуется использование моделей с подвижной границей фазового перехода (задача Стефана) и учетом гидродинамики расплава.

Перспективы развития представленной модели связаны с переходом к трехмерным численным моделям с учетом анизотропии теплопроводности графена; введением температурно-зависимых теплофизических коэффициентов $k(T)$, $\rho(T)$, $c_p(T)$; учетом термического сопротивления на границе раздела слоев; моделированием фазовых переходов и конвекции в расплаве; учета фазовых переходов и конвекции в расплаве. Кроме того, представляют интерес исследование влияния графенового покрытия на электрические параметры разряда и разработка гибридных моделей, связывающих электрические и тепловые процессы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Повышение триботехнических, прочностных характеристик различного типа металлов достигается путем применения не только специальных модификаторов при создании металлических соединений, но и направленного модифицирования поверхностных слоев проводящих твердых тел. Данное модифицирование возможно проводить различными технологическим воздействиями: напылением твердых и сверхтвердых слоев в вакууме, плазменным осаждением порошковых материалов, использованием лазерного излучения или электронных лучей для модифицирования поверхностных слоев обрабатываемых материалов, специальными технологиями термической обработки керамических и металлических подложек, газопламенным напылением порошковых материалов. Использование данных технологических подходов, основанных на различных физических и химических принципах, предоставляет возможность создавать уникальные композиционные материалы, позволяющие существенно увеличивать эксплуатационные характеристики изделий, изготавливаемых из данных композитов. Это обусловлено тем, что формируются материалы с заданным структурно-фазовым составом, в том числе в поверхностных слоях, и необходимыми физико-механическими характеристиками. Вышеперечисленные технологические подходы имеют достаточно большое количество преиму-

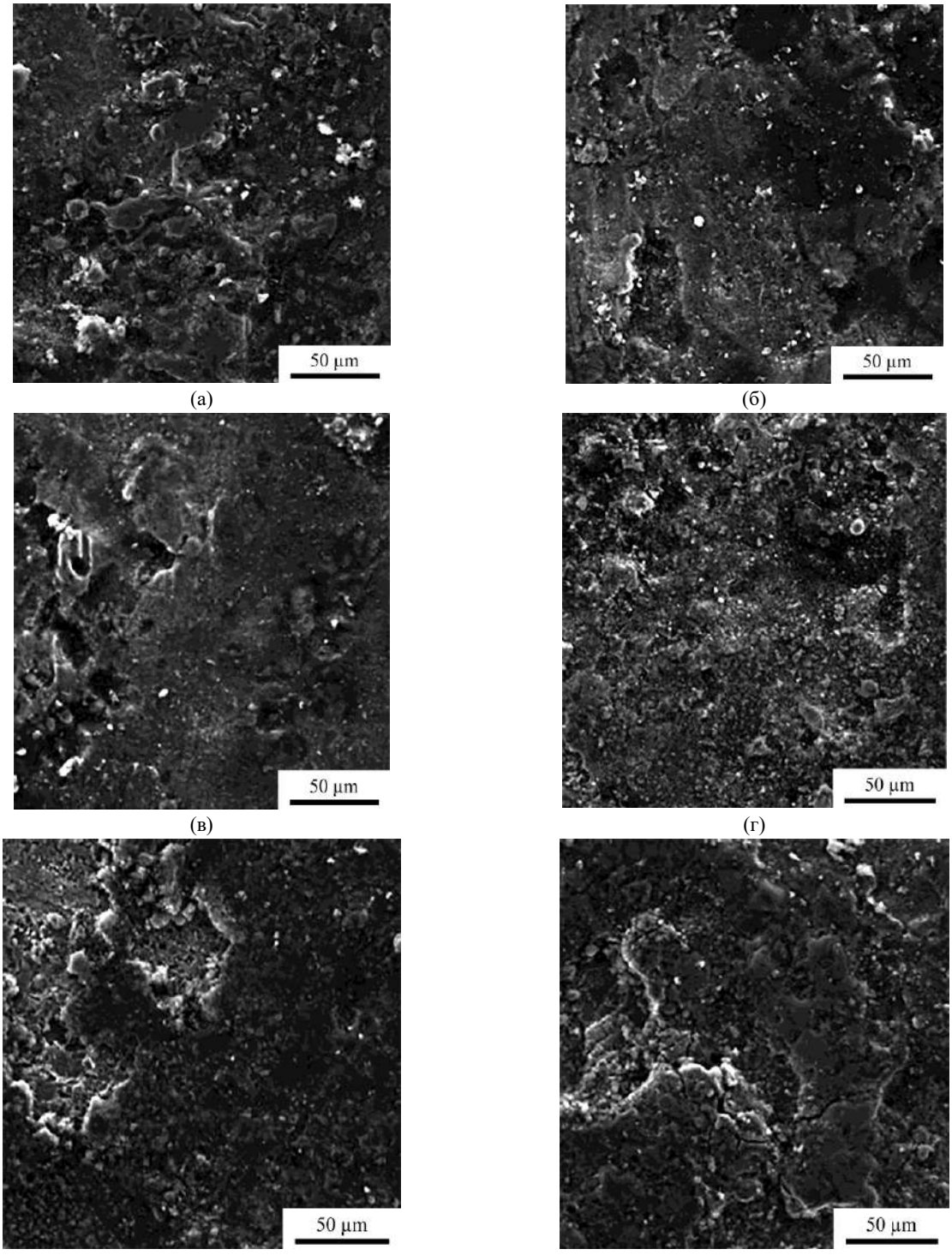


Рис. 4. Морфология графенсодержащих покрытий, сформированных на алюминиевом сплаве Д16Т при следующих режимах обработки: (а) – Norma 1; (б) – Norma 2; (в) – Norma 3; (г) – Turbo 1; (д) – Turbo 2; (е) – Turbo 3.

ществ, но и есть недостатки, которые в ряде случаев оказывают определяющее влияние на эксплуатационные характеристики модифицируемых тел, в частности, вероятность образования различного рода поверхностных дефектов (трещин, каверн, протрузий и т.д.), неоднородный химический и фазовый состав при проведении процесса осаждения покрытия, недостаточная адгезия.

Однако использование метода электроискрового легирования позволяет в большинстве случаев исключить данные дефекты в процессе формирования покрытия, обеспечив тем самым высокие физико-механические и адгезионные характеристики получаемых покрытий. Это обусловлено тем, что в процессе получения осаждаемых слоев на поверхности твердого тела используются плазменные искровые разряды в газовой среде, в том числе данный процесс осуществляется с механическим воздействием электрода на обрабатываемую поверхность

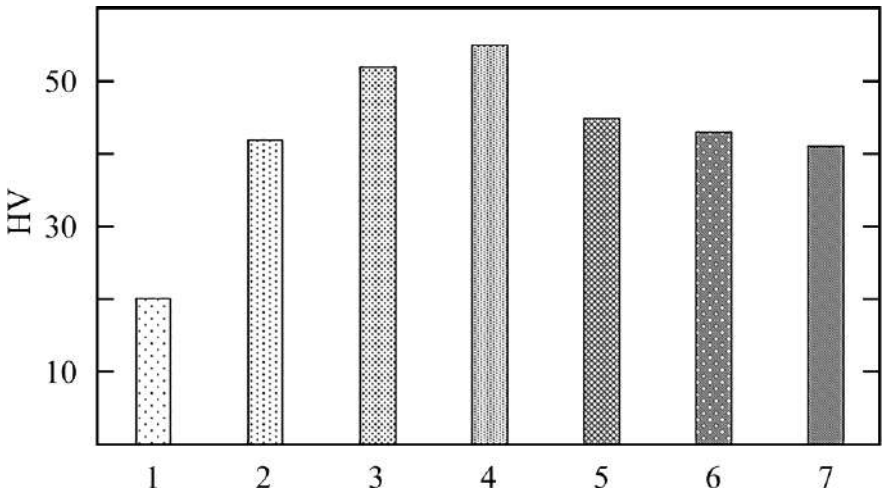


Рис. 5. Значения микротвердости алюминия А0, модифицированного методом электроискрового легирования с применением графитового электрода и графеновых наночастиц: *1* – исходный материал; *2* – обработка А0 в режиме Norma 1; *3* – в режиме Norma 2; *4* – в режиме Norma 3; *5* – в режиме Turbo 1; *6* – в режиме Turbo 2; *7* – в режиме Turbo 3. Толщина модифицированного слоя ~ 13,5 мкм.

субстрата. Такой подход обеспечивает следующие преимущества:

– высокую адгезионную прочность осаждаемых покрытий за счет протекания процессов микросваривания между осаждаемым материалом и проводящей подложкой;

– высокую твердость и, как следствие, износостойкость модифицируемого материала за счет применения сверхтвердых проводящих материалов в качестве электродов;

– фактическое отсутствие объемного разогрева обрабатываемого изделия, что позволяет обеспечить сохранение геометрических размеров деталей;

– достаточную технологическую простоту процесса;

– применение недорогого оборудования и несложность технологического обслуживания.

Применение графитовых электродов и графенсодержащих материалов при модифицировании алюминия и сплавов на его основе позволяет получить покрытия со сложной морфологией (рис. 4). Исходя из представленных на рис. 4 данных морфология сформированных электроискровых покрытий, содержащих графен, характеризуется развитой топографией, которая зависит от режимов обработки металлического образца. Морфология электроискровых графенсодержащих покрытий является гетерогенной, состоящей из различных по размерам и форме углублений, выступов, глобулярных образований, достаточно сглаженных плато и т.п. Наиболее сглаженной топографией обладают образцы, полученные при режиме Turbo 1, тогда как режимы Turbo 3 и Norma 3 приводят к формированию максимально развитой топографии. Это объясняется высокими значениями электроискрового разряда, наблюдающегося при данных режимах и находящегося в области 9 Дж, что согласуется с результатами теплового моделирования.

Обработка графитовым электродом в присутствии в зоне контакта графенсодержащих структур приводит к образованию карбидов металла, содержащих в своей структуре пластины графеновых наночастиц. Возможно также образование и графеновых частиц только за счет взаимодействия (электроискрового разряда и механического контакта) графитового электрода с металлической подложкой. Исходя из полученных данных видно существенное изменение морфологии графенсодержащих покрытий в зависимости от режимов проведения электроискрового легирования, то есть на морфологию покрытий оказывает существенное влияние нестационарность температурных полей, образующихся при циклическом электроискровом разряде. На примере алюминиевой подложки показано влияние теплофизических свойств материала на максимальную температуру и радиус нагрева. Кроме того, впервые проведено численное моделирование двухслойной системы графеновое покрытие–алюминий с использованием метода конечных элементов. Для различных толщин графена определены максимальные температуры, глубина плавления и радиус зоны нагрева. Полученные результаты позволяют обосновать выбор оптимальных параметров разряда и толщины покрытия для повышения точности и эффективности электроискрового легирования.

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами физико-механических испытаний покрытий (рис. 5).

Согласно полученным данным, наблюдается возрастание значений микротвердости алюминия А0 после электроискрового легирования с применением графитового электрода и

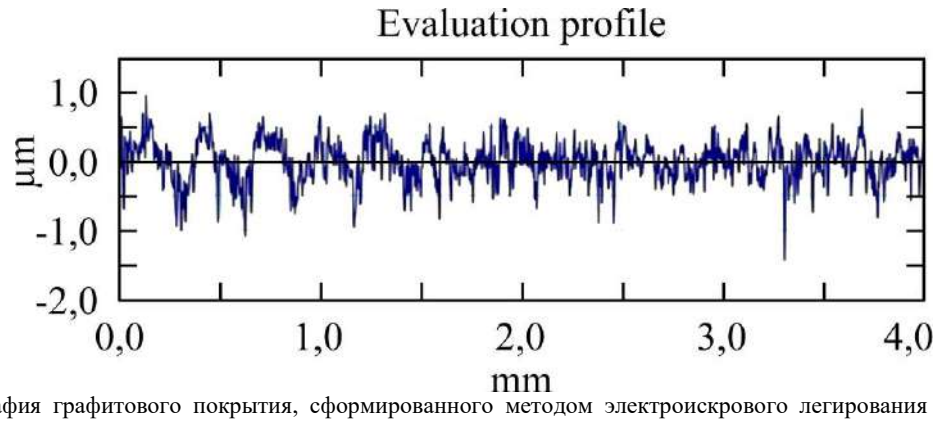


Рис. 6. Топография графитового покрытия, сформированного методом электроискрового легирования на алюминиевой подложке А0 при режиме Turbo 2.

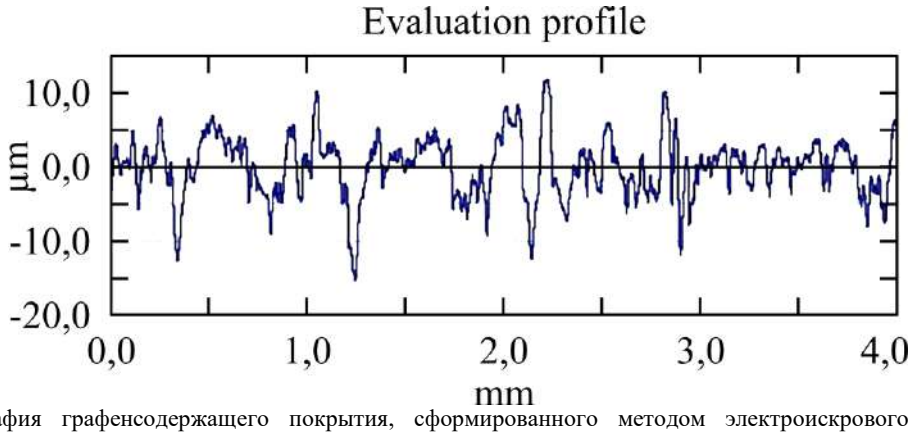


Рис. 7. Топография графенсодержащего покрытия, сформированного методом электроискрового легирования на алюминиевой подложке Д16Т при аддитивном режиме Turbo 2+Norma 2.

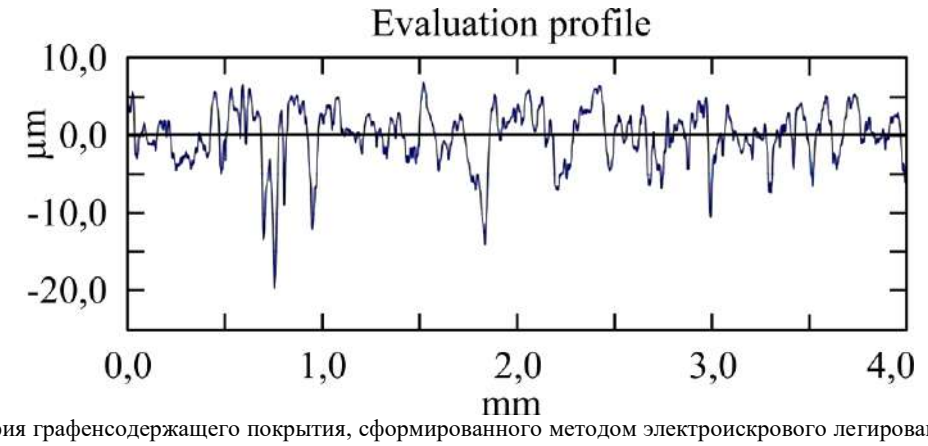


Рис. 8. Топография графенсодержащего покрытия, сформированного методом электроискрового легирования на алюминиевой подложке Д16Т при аддитивном режиме Turbo 2.

малослойного графена. Увеличение значений микротвердости могут достигать от 200 до 300% по отношению к исходному. Графеновые частицы для попадания в зону контакта электрод–поверхность субстрата были равномерно размещены на поверхности подложки. Измерения микротвердости алюминиевого субстрата, модифицированного электроискровым легированием с применением графеновых наночастиц, проводили на глубине проникновения алмазного индентора в упрочненный слой ~ 13,5 мкм.

На рис. 6–8 представлены результаты исследований шероховатости электроискровых покрытий методом профилометрии. Проведенные исследования показали, что шероховатость электроискровых покрытий зависит от энергии разряда, количества обработок, состава электрода.

Рис. 6 демонстрирует топографию покрытия, полученного на алюминии А0 с использованием графитового электрода в режиме Turbo 2. Поверхность характеризуется умеренной шероховатостью с относительно сглаженными пиками и неглубокими впадинами, что может способствовать снижению коэффициента трения без подвода внешней смазки.

Рис. 7 отражает рельеф графенсодержащего покрытия, сформированного на сплаве Д16Т при аддитивном режиме Turbo 2 + Norma 2.

По сравнению с чисто графитовым покрытием (рис. 6) рельеф становится более развитым: наблюдаются выраженные пики и впадины, увеличивается среднеарифме-тическое отклонение профиля Ra. Такая морфология, по-видимому, связана с дополнительным внесением графеновых наночастиц, которые изменяют условия кристаллизации расплава и способствуют образованию микровыступов.

На рис. 8 показана топография покрытия, нанесенного в режиме Turbo 2 на сплав Д16Т. Рельеф аналогичен предыдущему случаю, но имеет несколько меньшую высотную амплитуду, что может быть обусловлено различием в энергетических параметрах комбинированного режима.

Количественный анализ параметров шероховатости подтвердил результаты качественной оценки профилограмм. Наименьшие значения параметров R_a (0,23 мкм), R_z (1,78 мкм) и R_q (0,29 мкм) наблюдаются для покрытия, сформированного в режиме Turbo 2 с применением графитового электрода, что свидетельствует о формировании наиболее сглаженного микрорельефа поверхности. При обработке в режиме Turbo 2 с применением частиц малослойного графена значения шерохо-ватости возрастают более чем на порядок (R_a = 2,8 мкм; R_z = 19,1 мкм; R_q = 3,58 мкм), что указывает на развитие микронеровностей поверхности. Максимальные значения параметров шероховатости зарегистрированы для комбинированного режима Turbo 2 + Norma 2 (R_a = 3,3 мкм; R_z = 21,2 мкм; R_q = 4,07 мкм), что свидетельствует о формировании наиболее развитого микрорельефа. Полученные экспериментальные данные качественно согласуются с результатами математического моделирования. Согласно расчетам, наличие графенового слоя изменяет характер теплопереноса, повышая локальную температуру поверхности и уменьшая размеры зоны плавления. Это ограничивает растекание расплава и способствует сохранению более выраженного микрорельефа после кристаллизации. Таким образом, увеличение параметров шероховатости может рассматриваться как косвенное экспериментальное подтверждение влияния теплофизических свойств графена на процесс формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании.

Покрытия на основе графита, сформированные на алюминии А0, имеют более сглаженную морфологию, что может приводить к более низким значениям коэффициента трения при эксплуатации без подвода смазочного материала по сравнению с парами трения на основе алюминия, где графитовый слой отсутствует. Образование покрытий на основе графеновых наночастиц характеризуется развитой морфологией, параметры шероховатости которой зависят от энергии электроискрового разряда и количества обработок металлического субстрата. Увеличение параметров шероховатости в данном случае должно приводить к ухудшению триботехнических характеристик пар трения с данным видом покрытия. Однако наличие в структуре покрытий графеновых наночастиц позволяет предположить, что возможно увеличение износостойкости и снижения значений коэффициента трения при использовании данного типа покрытий в парах трения металл–металл и металл–полимер.

ВЫВОДЫ

Разработана аналитическая модель нестационарного температурного поля при электроискровом легировании для мгновенного точечного источника. Предложенная аналитическая модель справедлива для оценки температурных полей в условиях коротких импульсов ($\tau \leq 200$ мкс) и малых размеров пятна разряда ($r_0 \leq 10$ мкм). При моделировании длительных импульсов или обработки материалов с низкой температуропроводностью рекомендуется использовать распределенные модели тепловых источников. Показано, что максимальная температура обратно пропорциональна корню из длительности импульса и теплопроводности материала. На примере алюминия установлено, что при типичных параметрах разряда (I = 10 А, U = 60 В, τ = 100 мкс) температура в центре зоны достигает 747 °С, что достаточно для плавления материала, а радиус нагрева составляет около 200 мкм. Наличие графенового покрытия толщиной 1–2 мкм увеличивает максимальную температуру на 27,2% (при U = 20 В) и снижает глубину плавления на 40% по сравнению с чистым алюминием, а радиус зоны нагрева уменьшается с 120 до 80 мкм. Для более точного моделирования необходимо учитывать анизотропию теплопроводности графена, тепловое сопротивление на границе раздела слоев и нелинейные эффекты (плавление, испарение). Экспериментальные исследования шероховатости показали, что морфология электроискровых покрытий имеет характерную развитую структуру с выраженными пиками и впадинами, обусловленную дискретным характером электроискрового переноса материала. Значения шероховатости и морфология поверхности электроискрового покрытия существенно зависят от технологических режимов обработки. Покрытия, сформированные с применением графитового

электрода на подложке из алюминия, обладают более сглаженной поверхностью, что может способствовать снижению коэффициента трения в условиях трения без подвода внешней смазки. В то же время графенсодержащие покрытия характеризуются более развитым микрорельефом, однако присутствие графеновых наночастиц может оказывать влияние на увеличение износостойкости модифицированных материалов за счет антифрикционных свойств графеновых наночастиц, содержащихся в металлическом субстрате после модифицирования. Следует отметить, что выводы о влиянии графеновых наночастиц на коэффициент трения и износостойкость носят гипотетический характер. Они основаны на анализе опубликованных литературных данных об антифрикционных свойствах углеродных наноматериалов и требуют дальнейшего экспериментального подтверждения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта БРФФИ Т24МС-012.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко, Н.И., Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами, *Электроискровая обработка металлов*, М.: Изд-во АН СССР, 1960, вып. 2, с. 26.

2. Михайлов, В.В., Гитлевич, А.Е., Верхотуров, А.Д., Михайлюк, А.И., и др., Электроискровое легирование титана и его сплавов, физико-технологические аспекты и возможность практического использования. Краткий обзор. Часть I. Особенности массопереноса, структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях, их износо- и жаростойкость, *Электронная обработка материалов*, 2013, т. 49, № 5, с. 21.

3. Katinas, E., Jankauskas, V., Kazak, N., Michailov, V., Improving abrasive wear resistance for steel Hardox 400 by electro-spark deposition, *Journal of Friction and Wear*, 2019, vol. 40, p. 100.
https://doi.org/10.3103/S1068366619010070

4. Власенко, В.Д., Иванов, В.И., Аулов, В.Ф., Коневцов, Л.А., и др., Моделирование температурного поля поверхности при электроискровом легировании металлов, *Инженерные технологии и системы*, 2019, т. 29, № 2, с. 218.
https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233

5. Бурков, А.А., Хе, В.К., Быцура, А.Ю., Электроэрозионный ряд металлов для электроискрового легирования на основе решения задачи теплопроводности, *Электронная обработка материалов*, 2024, т. 60, № 2, с. 1.
https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.2.01

6. Xie, Y., and Wang, M., Microstructural morphology of electrospark deposition layer of a high gamma prime superalloy, *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201, no. 3-4, p. 691.
https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.12.034

7. Liu, Y., Su, Q., Zhang, S., Qu, J., et al., Research on simulation of coating fusion and solidification process in electro-spark deposition, *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 11, art. ID 1865.
https://doi.org/10.3390/coatings13111865

8. Свистун, А.Ч., Овчинников, Е.В., Линник, Д.А., Михайлов, В.В., и др., Теоретические аспекты формирования электроискровых покрытий на стальных субстратах, *Горная механика и машиностроение*, 2025, № 2, с. 102.

9. Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., et al., Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science*, 2004, vol. 306, no. 5696, p. 666.
https://doi.org/10.1126/science.1102896

10. Balandin, A.A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., et al., Superior thermal conductivity of single-layer graphene, *Nano Letters*, 2008, vol. 8, no. 3, p. 902.
https://doi.org/10.1021/nl0731872

11. Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., et al., Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene, *Nature*, 2005, vol. 438, p. 197.
https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/0509330

12. Belov, D.V., Belyaev, S.N., Radishchev, D.B., and Okhapkin, I., Synthesis of coatings based on graphene-like materials and study of their physicochemical properties, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2024, vol. 15, no. 2, p. 506.
https://doi.org/10.1134/S2075113324020102

13. Tseng, K.-H., Ku, H.-C., Tien, D.-C., and Stobinski, L., Parameter control and concentration analysis of graphene colloids prepared by electric spark discharge method, *Nanotechnology Reviews*, 2019, vol. 8, no. 1, p. 201.
https://doi.org/10.1515/ntrev-2019-0018

14. Mévrel, R., State of the art on high-temperature corrosion-resistant coatings, *Materials Science and Engineering: A*, 1989, vol. 120-121, part 1, p. 13.
https://doi.org/10.1016/0921-5093(89)90713-2

15. Haponova, O., Tarelnyk, V., Mościcki, T., Tarelnyk, N., et al., Investigation of the structure and properties of MoS_2 coatings obtained by electrospark alloying, *Coatings*, 2024, vol. 14, no. 5, art. ID 563.
https://doi.org/10.3390/coatings14050563

16. Svistun, A.Ch., Musafirov, E.V., Guzatov, D.V., and Gaida, L.S., Features of the dynamics of a nanoparticle motion under the action of the light pressure force of an evanescent wave in the linear approximation, *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2026, vol. 29, no. 1, p. 82.
https://doi.org/10.5281/zenodo.19347222

17. Benkovsky, I., Tsyntsaru, N., Silkin, S., Petrenko, V., et al., Wear and corrosion of novel electrospark and electrospark-electrochemical hybrid coatings based on carbon steels, *Lubricants*, 2023, vol. 11, no. 5, p. 205.
https://doi.org/10.3390/lubricants11050205

18. Гитлевич, А.Е., Топала, П.А., Ревуцкий, В.М., Шистик, Л.Н., Взаимодействие частиц порошка с каналом импульсного разряда в условиях электроискрового нанесения покрытий, *Электронная обработка материалов*, 1988, № 6, с. 20.

19. Fomina, M., Koshuro, V., Papshev, V., Rodionov, I., et al., Surface morphology data of tantalum coatings obtained by electrospark alloying, *Data in Brief*, 2018, vol. 20, p. 1409.
https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.09.028

20. Wang, D., Gao, J., Zhang, R., Deng, S., et al., Effect of TaC particles on the microstructure and oxidation behavior of NiCoCrAlYTa coating prepared by electrospark deposition on single crystal superalloy, *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 408, art. ID 126851.
https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126851

21. Бурнышев, И.Н., Калюжный, Д.Г., Кузнецов, К.И., Электроискровое легирование стали, титановых и ниобиевых сплавов методом вращающегося электрода, *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2024, № 5, с. 218.
https://doi.org/10.36652/1813-1336-2024-20-5--218-222

22. Овчинников, Е.В., Чекан, Н.М., Хвисевич, В.М., Веремейчик, А.И., и др., Структура электроискровых нанокомпозиционных покрытий на металлической матрице, *Вестник Брестского государственного технического университета*, 2021, № 1(124), с. 49.
https://doi.org/10.36773/1818-1212-2021-124-1-49-53

23. Овчинников, Е.В., Михайлов, В., Эйсымонт, Е.И., Линник, Д.А., и др., Физико-механические характеристики электроискровых покрытий, полученных из порошковых материалов, *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка*, 2024, т. 14, № 2, с. 6.
https://doi.org/10.52275/2223-5396-2024-14-2-6-17

24. Тарельник, В., Паустовский, А., Ткаченко, Ю., Марцинковский, В., и др., Электроискровое легирование графитом стальных поверхностей: технология, свойства, применение, *Электронная обработка материалов*, 2017, т. 53, № 4, с. 1.

25. Кройтору, Д.М., Силкин, С.А., Казак, Н.Н., Ивашку, С.Х., и др., Физико-механические и трибологические свойства углеродсодержащих поверхностных нанокомпозитов, полученных электроискровым легированием, *Электронная обработка материалов*, 2020, т. 56, № 6, с. 12.
https://doi.org/10.5281/zenodo.4299860

26. Liu, J., Wang, R., and Qian, Y., The formation of a single-pulse electrospark deposition spot, *Surface and Coatings Technology*, 2005, vol. 200, no. 7, p. 2433.
https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.104

27. Liu, W., Li, X., Xie, Y., Zhang, Z., et al., Effect of graphene on the microstructure and corrosion resistance of PEO coating formed on D16T aluminum alloy, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2022, vol. 19, p. 2583.
https://doi.org/10.1111/ijac.14108

28. Liu, W., Pu, Y., Liao, H., Lin, Y., et al., Corrosion and wear behavior of PEO coatings on D16T aluminum alloy with different concentrations of graphene, *Coatings*, 2020, vol. 10, no. 3, p. 249.
https://doi.org/10.3390/coatings10030249

29. Couëdel, D., Rogeon, P., Lemasson, P., Carin, M., et al., 2D-heat transfer modelling within limited regions using moving sources: application to electron beam welding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, vol. 46, no. 23, p. 4553.
https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00288-6

30. Ananiashvili, K., Okrosashvili, M., Loladze, T., Valko, N., et al., Structure and properties of tantalum coatings obtained by electron beam technology on aluminum substrates, *Applied Sciences (Switzerland)*, 2020, vol. 10, no. 11, p. 3737.
https://doi.org/10.3390/app10113737

31. Саламатов, Е.И., Долгушева, Е.Б., Методы вычисления решеточной теплопроводности металлов при высоких и низких температурах, *Химическая физика и мезоскопия*, 2021, т. 23, № 4, с. 486.
https://doi.org/10.15350/17270529.2021.4.44

32. Bidwell, C.C., and Hogan, C.L., Thermal Conductivity of Aluminum; Solid and Liquid States, *Journal of Applied Physics*, 1947; vol. 18, no. 8, p. 776.
https://doi.org/10.1063/1.1697837

33. Pop, E., Varshney, V., and Roy, A.K., Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications, *MRS Bulletin*, 2012, vol. 37, no. 12, p. 1273.
https://doi.org/10.1557/mrs.2012.203

34. Valko, N., Evstigneeva, W., Anishchik, V., Bondariev, V., et al., The application of X-rays for an electrodeposition of composite coatings with modified structures and properties, *Energies*, 2021, vol. 14, no. 16, p. 4913.
https://doi.org/10.3390/en14164913

35. Vasquez Guzman, P.A., Sood, A., Mleczko, M.J., Wang, B., et al., Cross plane thermal conductance of graphene-metal interfaces, *Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, Orlando, USA, 2014, p. 1385.
https://doi.org/10.1109/ITHERM.2014.6892441

Summary

The paper considers an unsteady temperature field in a semi-infinite body with a pulsed heat source characteristic of electric spark alloying. An analytical solution of the heat conduction equation in cylindrical coordinates for an instantaneous point source is given. Numerical calculations have been performed for an uncoated aluminum substrate with a thin graphene layer. It is shown that graphene deposition with a thickness of 1–2 microns increases the local temperature by 27,2% and reduces the melting depth and radius of the heating zone. An experimental study of the effect of multilayer graphene on thermal processes and surface morphology during electric spark alloying of aluminum and D16T alloy has been carried out.

Keywords: electric spark alloying, thermal conductivity equation, graphene, temperature field, aluminum, numerical modeling