

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.7

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ  
В ПРОЦЕССЕ ПЛАВЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ЛАЗЕРОМ© 2019 г. В. В. Алисин<sup>1,\*</sup>, М. Н. Рошин<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

\*e-mail: vva-imash@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.01.2018 г.

Принята к публикации 24.04.2019 г.

В статье рассматривается математическое моделирование процесса плавления износостойких плазменных покрытий лазером, приводятся результаты численных исследований влияния теплового потока и теплофизических свойств материалов на процесс нагрева и плавления, разработаны прикладные программы для оптимизации процесса лазерного оплавления поверхностного слоя при наплавлении износостойких покрытий и оплавления поверхности в лазерных аддитивных технологиях.

*Ключевые слова:* трение, износ, покрытие, математическое моделирование, плазма, лазер

DOI: 10.1134/S0235711919040047

**Введение.** Главными показателями качества покрытий, наплавленных лазерным излучением являются пористость и прочность сцепления с основой. Наличие пористости покрытия снижает его прочностные характеристики [1]. Поры являются концентраторами напряжений, поэтому уменьшается стойкость к воздействию знакопеременных и динамических нагрузок. Природа образования пор многообразна [2]. Для уменьшения отражения лазерного луча в процессе лазерной наплавки применяются обмазки. Воздействие лазерного луча на органические обмазки приводит к их испарению и образованию пор. В силу быстротечности процесса формируются замкнутые полости. На образование пор влияет скорость растворения газов в расплавленном металле. При наплавке порошковых материалов в струе инертных газов происходит завихрения потока с образованием пор. Растущие требования машиностроения по повышению трибологических характеристик узлов и агрегатов машин, работающих в экстремальных условиях по нагрузкам, температурам и скоростям скольжения выявили необходимость повышения качества покрытий в различных приложениях. Например, решение проблемы создания технологии нанесения износостойких покрытий на детали гидросистем взамен твердого электролитического хромирования потребовало детальной разработки физической модели процесса плавления покрытий лазером и математического моделирования [3]. Опыт промышленного апробирования созданной технологии лазерной наплавки [4] показал, что для обеспечения качества покрытий необходим детальный анализ распределения тепловых потоков в зоне взаимодействия лазерного луча с поверхностью. Актуальность проблемы повышения качества покрытия при лазерной наплавке в настоящее время резко повысилась. Во-первых, в связи с обострением экологических требований и угрозе введения в Европейском союзе запрета на технологии хромирования, как содержащее вещества канцерогены (триоксид хрома) [5]. Во-вторых, в связи с возросшим интересом к качеству

изделий, получаемых по аддитивной лазерной технологии [6], например, при производстве газовой турбины авиадвигателя. Для улучшения качества наплавляемого материала применяют переплав поверхностного слоя, который позволяет исправить дефекты наплавленных слоев в виде пор, дефекты от неоднородности гранулометрического состава порошка, нарушения структуры от перегрева расплавленного металла и взрыва мелких фракций порошка, например, стали AISI 316L [7, 8]. Дефекты устраняются выбором технологических параметров лазерной обработки, для оптимизации которых применяют методы моделирования процесса [9–11]. Для экспериментальной проверки математической модели процесса оплавления покрытия на поверхность образца из стали 30ХГСА методом сверхзвукового плазменного напыления было нанесено порошковое покрытие. Важным преимуществом плазменного нанесения покрытий является возможность нанесения практически любых материалов и композиций, при высокой производительности процесса и коэффициенте использования материалов. Основным недостаток плазменных покрытий – не высокая прочность сцепления с материалом основы, которая не превышает 80...100 МПа при начальной температуре  $T \leq 400^\circ\text{C}$  материала основы, и недостаточная надежность. Вероятность зарождения трещин, при эксплуатации, весьма велика. Структура плазменных покрытий имеет не высокий предел выносливости, что накладывает ограничения на их применение в тяжело нагруженных трибосопряжениях.

Лазерное плавление покрытий позволяет получать более развитые металлургические связи покрытия с основой, гибко регулировать ширину переходной зоны, измельчать структуру покрытия, образовывать дополнительные упрочняющие фазы, снижать пористость и, следовательно, значительно повышать прочностные и трибологические свойства системы покрытия – материал основы. При этом глубина термического воздействия на материал основы может составлять порядка  $10^{-3}$  м, что в подавляющем большинстве случаев не приводит к разупрочнению деталей узлов трения из высокопрочных сталей и сплавов. Лазерное плавление покрытий накладывает определенные ограничения на используемые материалы, как по толщине, так и по теплофизическим свойствам. Необходимым условием для выбора материала покрытия является температура плавления, которая должна составлять  $0.8...1.1 T_{пл}$  материала основы. Достаточным условием является способность материала покрытия образовывать прочные связи с материалом основы при плавлении.

Для решения задач по повышению износостойкости и надежности тяжело нагруженных узлов трения, композиционный материал покрытия должен иметь пластическую матрицу, мелкое зерно, высокую твердость мелкодисперсной упрочняющей фазы, при оптимальной ее концентрации. В качестве пластичной матрицы используются сплавы на основе никеля или кобальта, твердые растворы, интерметаллиды Ni–Al, Ni–Ti, Ti–Al, легкоплавкие эвтектики, термореагирующие материалы и др., а также композиции на их основе. Наиболее высокие физико-механические свойства имеют эвтектические сплавы системы Ni–Cr–B–Si. Физико-механические и трибологические свойства этого сплава хорошо изучены [1]. Износостойкость покрытий, системы Ni–Cr–B–Si, в парах трения, как при абразивном износе, так и при смазке, превышает износостойкость покрытий из твердого электролитического хрома, а интенсивность износа сопрягаемого материала в несколько раз ниже [4]. Температура плавления лежит в пределах  $T_{пл} = 1000...1250^\circ\text{C}$ . Теплофизические свойства материалов, используемых в качестве матрицы, не накладывают ограничения на процесс плавления концентрированным тепловым источником, за исключением температуры плавления. Поэтому использование твердых растворов, интерметаллидов, в качестве матрицы, не целесообразно. В качестве мелкодисперсной упрочняющей фазы используются карбиды, бориды, нитриды и оксиды металлов, обладающие низкой

температуропроводностью и высокой температурой плавления, намного превышающей температуру плавления высокопрочных сталей. Наибольший интерес представляют оксиды, особенно оксид алюминия. Основные преимущества: высокая твердость, химическая стойкость, низкая температура плавления  $T \approx 2000...2300^\circ\text{C}$  и невысокая стоимость. Карбиды, бориды, нитриды интенсивно окисляются при высоких температурах. Для их защиты от окисления используются инертные газы, которые инжестируются со скоростью 5...10 м/с непосредственно в зону плавления. Оптимальное содержание в покрытии упрочняющей фазы, для тяжело нагруженных пар трения, не должно превышает 20...40%, массовых [4]. При более высокой концентрации упрочняющей фазы интенсивность износа уменьшается, но также уменьшается: ударная вязкость, предел прочности и выносливости, надежность. При такой концентрации, мелкодисперсной упрочняющей фазы, ограничения на процесс плавления композиционного покрытия отсутствуют. Плавить мелкодисперсную упрочняющую фазу нет необходимости.

При разработке технологии лазерного плавления износостойких покрытий экспериментальное определение необходимой плотности энергии излучения и времени воздействия-скорости перемещения детали, при котором фронт плавления достигнет границы раздела покрытие-основа при температуре поверхности не превышающей температуру кипения, или разложения, или интенсивного окисления сталкивается с большими техническими трудностями и высокими материальными затратами. На качество наплавленных лазером покрытий сильно влияют трещины, образующиеся под воздействием больших температурных градиентов, формирующихся в процессе оплавления покрытий. При нагреве покрытия до температуры его плавления, оно начинает плавиться, образуется жидкая ванна расплава. Следовательно, в формировании температурного поля при лазерном оплавлении покрытия участвуют три слоя, а именно подложка, часть слоя покрытия в твердой фазе и часть слоя покрытия в жидкой фазе.

**Целью работы** является разработка методического подхода к анализу тепловых потоков при лазерном оплавлении порошкового покрытия на поверхности твердого тела, а именно разработка численных методов решения нестационарного уравнения Фурье с граничными условиями Стефана и пакета прикладных программ, пригодных для использования в управляющих ЭВМ лазерных технологических комплексов, при плавлении износостойких плазменных покрытий, в заводских условиях, обеспечивающие достаточно высокую точность и требующие минимального количества машинного времени для вычислений.

Рассмотрим полуограниченное тело с покрытием толщиной  $h$ . Физическая модель процесса плавления износостойких плазменных покрытий лазеров рассмотрена в работе [6]. Для решения поставленной задачи примем следующие допущения: 1) мощность лазерного излучения должна удовлетворять условию, при котором характерные размеры теплового источника намного превышают глубину проникновения температурных полей в полуограниченное тело. Только при этом условии допустимо использование одномерного приближения; 2) на поверхности полуограниченного тела действует равномерно распределенный по радиусу  $r_0$  тепловой источник; 3) теплофизические свойства используемых материалов, в качестве покрытий, не зависят от температуры; 4) процессы термического окисления и разложения материала покрытия, гидродинамические эффекты в жидкой ванне расплава, процесс испарения материала покрытия с поверхности не рассматриваем.

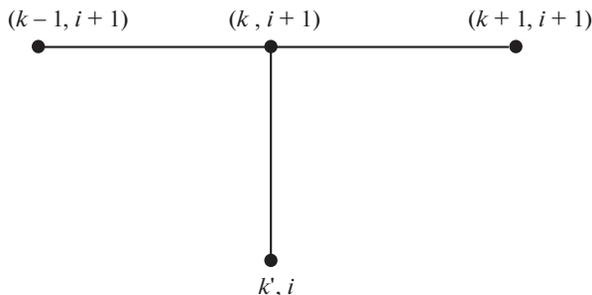


Рис. 1. Четырехточечный шаблон.

Математическая модель процесса, описывающая распределение температурных полей в покрытии и основы, при фазовых превращениях имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t} &= \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1(x, t)}{\partial x^2}, & 0 \leq x \leq h; \\ \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial t} &= \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2(x, t)}{\partial x^2}, & h \leq x \leq \infty; \\ \frac{\partial T_3(x, t)}{\partial t} &= \alpha_3 \frac{\partial^2 T_3(x, t)}{\partial x^2}, & 0 \leq x \leq \omega. \end{aligned} \quad (1)$$

Краевые условия: начальное условие:  $T(x, 0) = G(x)$ , граничное условие второго рода

$$\begin{aligned} q_0 &= -\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x}, & T_1(0, t) \leq T_{\text{пл}}; \\ q_0 &= -\lambda_3 \frac{\partial T_3(0, t)}{\partial x}, & T_3(0, t) \geq T_{\text{пл}}. \end{aligned}$$

Условие на границе раздела

$$\begin{aligned} -\lambda_1 \frac{\partial T_1(h, t)}{\partial x} &= -\lambda_2 \frac{\partial T_2(h, t)}{\partial x}; & T_1(h, t) = T_2(h, t); & T_2(\infty, t) = G(\infty); \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3(\omega, t)}{\partial x} + i_1 \rho_3 \frac{\partial \omega}{\partial t} &= -\lambda_1 \frac{\partial T_1(\omega, t)}{\partial x}; & T_1(\omega, t) = T_3(\omega, t) = T_{\text{пл}} = \text{const}, \end{aligned}$$

где:  $T_1(x, t)$ ,  $T_2(x, t)$ ,  $T_3(x, t)$  – температура в покрытии, основе, жидкости, соответственно;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – коэффициенты теплопроводности в покрытии, основе, жидкости;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  – коэффициенты теплопроводности покрытия, основы, жидкости;  $i_1$  – теплота плавления покрытия;  $\omega$  – граница раздела жидкость–покрытие,  $h$  – толщина покрытия.

Температура на поверхности покрытия имеет вид

$$T_W = \frac{q\sqrt{\pi}}{\lambda_2} (4\alpha t)^{\frac{1}{2}}.$$

**Математический алгоритм.** Разобьем область интегрирования на достаточно большое число равных частей. Выберем двухслойный четырехточечный шаблон [12] – явная схема конечно-разностной аппроксимации рис. 1.

Введем в рассматриваемой области прямоугольную равномерную сетку с шагами  $l$  и  $\tau$ :  $x = x_0 + kl$ , ( $k = 0, \pm 1, \dots, n - 1$ ),  $t = t_0 + ir$ , ( $i = 0, \pm 1, \dots, m - 1$ ), где:  $n$  – число узлов

по  $x$ ,  $m$  – число слоев по  $t$ . Обозначим  $u_k^i$  – приближенное значение сеточной функции в узле  $(x_k, t_i)$ . Для каждого внутреннего узла  $(k, l)$  составим разностное уравнение, заменив в точке  $(x_0 + kl, t_0 + i\tau)$  производные, входящие в уравнения (1)

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_k^i &\approx \frac{u_{k+1}^i - u_{k-1}^i}{2l}, \\ \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_k^i &\approx \frac{u_{k+1}^i - 2u_k^i + u_{k-1}^i}{l^2}, \\ \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_k^i &\approx \frac{u_k^{i+1} - u_k^{i-1}}{\tau}, \end{aligned}$$

где:  $u_k^i = u(x_0 + kl, t_0 + i\tau)$ .

С учетом неявной разностной схемы аппроксимируем систему уравнений (1) системой конечно-разностных уравнений. Погрешность аппроксимации составляет  $O(\tau + l^2)$ .

$$\begin{aligned} \frac{u_k^{i+1} - u_k^i}{\tau} &= \frac{\alpha}{l^2}(u_{k-1}^{i+1} - 2u_k^{i+1} + u_{k+1}^{i+1}), \\ u_k^0 &= G_k; \quad u_0^m = \mu(t); \quad u_n^\tau = 0; \\ k &= \overline{1, n-1}; \quad i = \overline{1, m-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Решение системы уравнений (2) проводилось методом матричной прогонки с [12] в виде

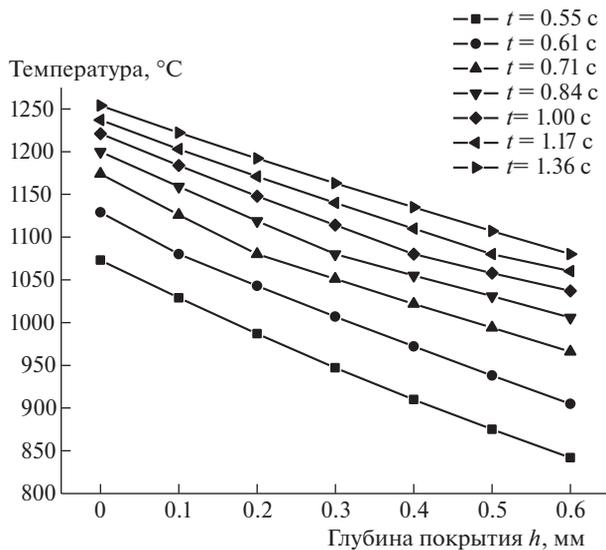
$$u_k^{i+1} = \beta_k u_{k+1}^{i+1} + j_k; \quad k = n-1, \quad n-2, \dots, 1, 0; \quad (3)$$

$$\text{где: } \beta_k = \frac{-rj_{k-1}}{-2r-1+r\beta_{k-1}}; \quad j_k = \frac{-u_k^i - rj_{k-1}}{-2r-1+r\beta_{k-1}}; \quad k = \overline{1, m}; \quad (4)$$

$$r = \frac{\tau\alpha}{l^2}; \quad \beta_0 = \frac{r}{r+1}; \quad j_0 = \frac{u_0^i}{r+1}.$$

По уравнениям вычисляем прогоночные коэффициенты: прямой ход прогонки (4), обратный ход прогонки (3). Необходимое условие устойчивости  $|\beta_k| < 1$ . Достаточное условие устойчивости – преобладание диагональных элементов системы разностных уравнений в канонической форме. Численные расчеты проводятся в четыре этапа: этап 1 –  $t = t + \Delta t$  до  $u(1) = T_{пл}$ ; этап 2 – начало плавления;  $u(1) > T_{пл}$ ;  $\omega = \Delta x$ ; наращивание времени  $y = y + \Delta t$  до выполнения условия  $q_0 - i_1\rho_3 \frac{\partial \omega}{\partial t} \geq \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}$ ; этап 3 – продолжение и окончание плавления покрытия;  $\omega = \omega + \Delta x$ ; до выполнения условия:  $\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} - i_1\rho_3 \frac{\partial \omega}{\partial t} \geq \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}$ ;  $\omega = \omega + \Delta x$  и т.д. до  $\omega = h$ ; этап 4 –  $t = t + \Delta t$ ; нагрев жидкой фазы до выполнения условия  $T_3 = T_2 = T_{пл}$ , при  $\omega = h$ .

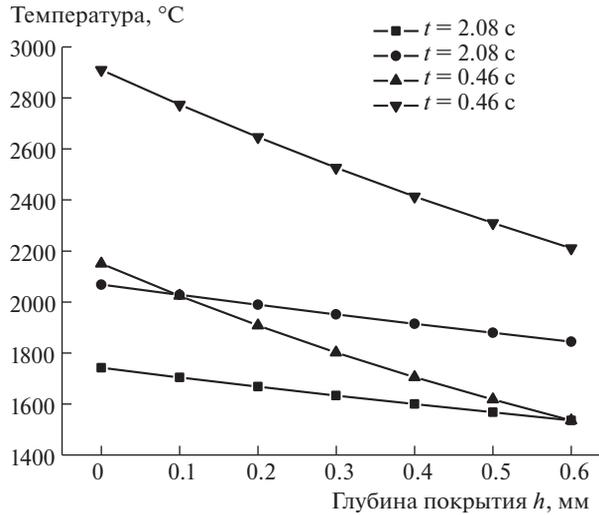
Программа написана на алгоритмическом языке Фортран 90. Использован компилятор Compaq Visual Fortran Version 6.6. Численное решение позволяет изучить влияние теплового потока, времени его воздействия на материалы с различными теплофизическими свойствами. На рис. 2 приведено распределение температуры по толщине покрытия при различном времени воздействия теплового потока  $q_0 = 1 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>. Материал покрытия ПГ-10Н-01 + 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, со следующими теплофизическими



**Рис. 2.** Распределение температуры по толщине покрытия  $h$  при  $q_0 = 1 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> от времени воздействия теплового потока  $t$ .

свойствами  $\lambda = 16.4$  Вт/(м °С);  $\alpha = 4.2 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $c = 618$  Дж/(кг °С). Температура поверхности достигнет температуры плавления материала покрытия  $T_{пл} = 1080^\circ\text{C}$  за  $t = 0.55$  с. Покрытие полностью расплавляется за время  $t = 1.36$  с. При этом температура поверхности достигает  $T = 1254^\circ\text{C}$ , что намного ниже температуры кипения материала покрытия. При дальнейшем увеличении времени нагрева температура на границе раздела покрытие – основа достигнет температуры плавления материала основы  $T = 1535^\circ\text{C}$  за время  $t = 2.08$  с, рис. 3, кривая 1. Температура поверхности при этом равна  $T = 1742^\circ\text{C}$ . При тепловом потоке  $q_0 = 5 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> температура поверхности превышает на  $280^\circ\text{C}$  температуру кипения материала покрытия. Для данного композиционного материала, при толщине покрытия  $h = 0.6 \times 10^{-3}$  м тепловой поток  $q_0 = 4 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> является максимально допустимым. При дальнейшем увеличении теплового потока материал покрытия будет испаряться. С увеличением температуры поверхности свыше  $T = 2300^\circ\text{C}$  интенсифицируется процесс разложения и окисления боридных и карбидных фаз, что неблагоприятно влияет на трибологические характеристики покрытия. Поэтому использовать тепловые потоки выше, чем  $q_0 = 4 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, при  $h = 0.6 \times 10^{-3}$  м для данного композиционного материала нецелесообразно.

Проведенный численный анализ показал, что для плавления износостойких композиционных покрытий, на основе Ni–Cr–B–Si с оксидом алюминия, тепловой поток не должен превышать  $q_0 = 4 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> и не должен быть ниже  $q_0 = 1 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, при толщине покрытия  $h = 0.6 \times 10^{-3}$  м. Распределение температурных полей по глубине материала покрытия и основы представлены на рис. 4 при воздействии тепловым потоком  $q_0 = 3 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>. Глубина распространения тепла при достижении температуры поверхности  $T = 2150^\circ\text{C}$  не превышает  $5...6 \times 10^{-3}$  м. При этом температура на



**Рис. 3.** Распределение температуры по глубине  $h$  покрытия от времени воздействия  $t$  теплового потока: а)  $q_0 = 1 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>; 1 – с учетом теплоты плавления материала покрытия; 2 – без учета плавления. б)  $q_0 = 3 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>; 3 – с учетом теплоты плавления материала покрытия; 4 – без учета плавления.

глубине  $h = 6 \times 10^{-3}$  м отличается от начальной температуры на несколько десятков градусов. Время нагрева до температуры плавления поверхности составляет  $t = 0.06$  с, а глубина распространения тепла в материал основы, не превышает  $2 \times 10^{-3}$  м. Покрытие полностью расплавится за время  $t = 0.35$  с, а температура границы раздела покрытие – основа достигнет температуры плавления материала основы за время  $t = 0.46$  с.

При этом, скорость нагрева материала основы составляет  $\frac{\partial T}{\partial t} = 3.8 \times 10^3$  °C/с. Глубина нагрева материала основы, при которой температура превысит температуру отпуска стали, например, 30ХГСА равную  $T = 550$ °C составит  $(2-3) \times 10^{-3}$  м. При охлаждении глубина закалки составит  $2 \times 10^{-3}$  м. Следовательно, на глубине  $2 \times 10^{-3}$  м будет иметь место небольшое разупрочнение материала основы. Неучет теплоты плавления, при фазовом переходе, приводит к значительной погрешности.

На рис. 3 приведено распределение температурных полей в покрытии для двух значений теплового потока  $q_0 = 1 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> и  $q_0 = 3 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, кривая 1 и 2, без учета теплоты плавления, кривая 3 и 4 с учетом теплоты плавления, соответственно. При времени воздействия  $t = 2.08$  с теплового источника  $q_0 = 1 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> разница в температурах на поверхности и на границе раздела покрытие–основа составляет 326°С и 309°С соответственно. При увеличении мощности теплового потока до  $q_0 = 3 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> погрешность возрастает и при времени воздействия теплового источника  $t = 0.46$  с составляет более 700°С на поверхности и на границе раздела покрытие–основа. При плавлении покрытий с большей теплотой плавления погрешность расчета температурных полей возрастает.

Проведенный численный анализ показал, что для плавления износостойких композиционных покрытий, на основе Ni–Cr–B–Si с оксидом алюминия, тепловой поток не должен превышать  $q_0 = 3 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> и не должен быть ниже  $q_0 = 1 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>,

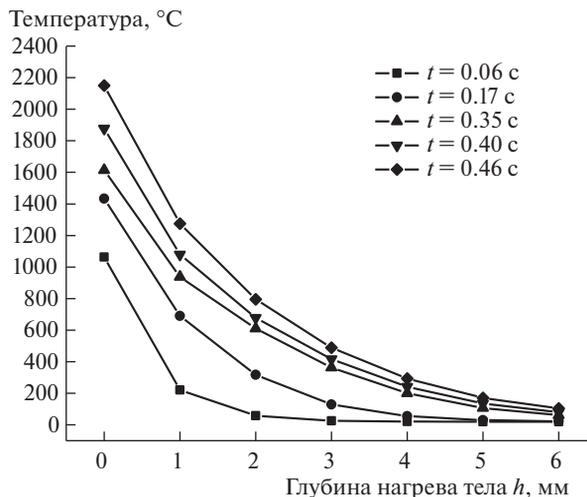


Рис. 4. Распределение температуры по глубине  $h$  покрытие–основа при  $q_0 = 3 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> от времени воздействия источника тепла  $t$ .

при толщине покрытия  $h = 6 \times 10^{-3}$  м. Разработанный алгоритм в диалоговом режиме рассчитывает технологические параметры: геометрические размеры пятна, при заданной мощности излучения лазера, скорость перемещения детали; или рассчитывается мощность излучения и скорость перемещения детали. Точность численных расчетов проверялась как аналитическим методом, так и экспериментально. При аналитическом методе численно решалась нестационарная задача распределения тепловых полей в полуограниченном теле с граничными условиями первого рода  $T(0, t) = T_W = \text{const}$ , то есть при постоянной температуре поверхности тела. Аналитическое решение проводилось методом разделения переменных. Численное решение сравнивалось с табличными значениями. Совпадение удовлетворительное. Для экспериментальной проверки использовался электронно-оптический пирометр ЭОП-61. Расчетная температура поверхности совпадает с измеренной, точность не хуже 10%.

**Выводы.** 1) на основе одномерной математической модели процесса плавления износостойких плазменных покрытий лазером разработан алгоритм численного решения системы дифференциальных уравнений в частных производных процесса нагрева и плавления, поверхностным тепловым источником, двухслойного тела с граничными условиями Стефана; 2) разработан пакет прикладных программ расчета температурных полей и движения фронта плавления в двухслойном полуограниченном теле при воздействии теплового поверхностного источника. Пакет прикладных программ может использоваться в управляющих ЭВМ лазерных технологических комплексов; 3) проведен численный анализ нагрева и плавления, износостойких композиционных покрытий эвтектического сплава системы Ni–Cr–B–Si и упрочняющей мелкодисперсной фазой оксида алюминия, предназначенных для тяжело нагруженных трибосопряжений; 4) определены значения теплового потока и время его воздействия, обеспечивающие лучшее качество наплавленного покрытия по триботехническим критериям.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Шиганов И.Н. и др. Исследование пористости покрытий из кобальтовых и никелевых сплавов, наплавленных лазерным излучением // Ж. Вестник МГТУ Н.Э. Баумана. “Машиностроение”. 2012. С. 165.
2. Ивенсен В.А. Кинетика уплотнения металлических порошков при спекании. М.: Металлургия. 1971. С. 256.
3. Алисин В.В., Владиславлев А.А., Роцин М.Н. Физическая модель процесса плавления износостойких плазменных покрытий лазером // Ж. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 11. С. 17.
4. Алисин В.В. Владиславлев А.А. Роцин М.Н. Технология получения износостойких металло-керамических покрытий с ультрадисперсной упрочняющей фазой / Сб. Перспективные материалы и технологии. НАНОКОМПОЗИТЫ, (космический вызов 21 век, Т. 2) / Под ред. А.А. Берлина и И.Г. Ассовского. М.: Торус Пресс. 2006. С. 59.
5. Райкис О., Шопховен Т. Альтернатива будущего: высокоскоростная лазерная наплавка идет на смену твердому хромированию // Ж. Фотоника. 2016. № 3/57. С. 28.
6. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // Ж. Интеллект и технологии. 2015. № 2 (11). С. 52.
7. Ананьев А.И., Шибалов М.В., Курков А.А. и др. Исследование микроструктуры и свойств хромикелевой стали 316L полученной методом селективного лазерного оплавления // Ж. Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 4. С. 54.
8. Morgan K., Sutcliffe C.J., Oneil W. Density analysis of direct laser re-melted 316 stainless steel cubic primitives // Journal of material science. 2004. № 39. P. 1195.
9. Гордеев Г.А., Кривилев М.Д., Анкудинов В.Е. Компьютерное моделирование селективного лазерного плавления высокодисперсных металлических порошков // Ж. Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т. 10. № 3. С. 293.
10. Dubourg L., St-Georges L. Optimization of Laser Cladding Process Using Taguchi and EM Methods for MMC Coating Production // Journal за Thermal Spray Technology. 2006. V. 15. P. 790.
11. Hodge N.E., Ferencz R.M., Solberg J.M. Implementation of a thermomechanical model for t simulation of selective laser melting // Comput. Mech. 2014. V. 54. № 1. P. 33.
12. Волков Е.А. Численные методы // М.: Наука. 1982. С. 256.