

УДК 621.785:669.14.08.29

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

О.П. Солоненко, А.А. Головин, В.Е. Овчаренко*

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: solo@itam.nsc.ru

Предложена физико-математическая модель, разработан программный комплекс и проведено детальное численное исследование процессов при импульсной электронно-пучковой обработке покрытий различной толщины из металлокерамического сплава TiC-(Ni-Cr) в широком диапазоне плотностей мощности, времени воздействия и частоты следования импульсов. Результаты работы могут представлять интерес для понимания процессов, происходящих при поверхностной обработке покрытий и материалов высококонцентрированными потоками энергии.

Ключевые слова:

Моделирование, нестационарный теплоперенос, плавление, импульсный, термообработка, концентрированный поток энергии, электронно-пучковая обработка, металлокерамическое покрытие.

Проблема повышения эксплуатационных характеристик и ресурса металлических изделий различного назначения на современном этапе развития техники является одной из особенно актуальных задач современного материаловедения. В значительном числе случаев указанная задача решается путем нанесения на изделия многофункциональных порошковых покрытий. Основными недостатками напыленных порошковых покрытий являются наличие остаточной пористости в покрытиях и недостаточно высокая прочность связи покрытия с напыляемой поверхностью. Для повышения прочностных характеристик как самого порошкового покрытия, так и прочности его связи с поверхностью, разработаны различные методы термообработки изделий с покрытиями концентрированными потоками энергии (КПЭ). Одним из методов обработки покрытий КПЭ является модифицирование структуры порошковых покрытий путем импульсного электронно-пучкового облучения его поверхности, отличающегося большими возможностями локализации энергии в покрытии и высокой управляемостью процессом облучения поверхности [1–4]. Применительно к обработке поверхности материалов понятие «электронно-пучковое облучение», в отличие от «электронно-лучевой обработки», означает воздействие на поверхность изделия широкоапертурным импульсным электронным пучком с равномерно распределенной по его сечению плотностью энергии.

Целью настоящей работы являлось проведение цикла вычислительных экспериментов по исследованию потенциальных возможностей электронно-импульсного облучения применительно к обработке металлокерамических порошковых покрытий TiC – (Ni-Cr), напыленных аргонной плазменной струей на стальную подложку.

При численном исследовании использовали результаты [5, 6], связанные с разработкой, практической реализацией и тестированием математиче-

ской технологии для численного моделирования нестационарных сопряженных задач теплообмена и фазовых превращений (плавление/затвердевание, испарение) при обработке покрытий и поверхности изделий с помощью КПЭ.

Построение математических моделей для проведения численных расчетов температурного поля в поверхностной зоне нагрева твердых тел в процессе их облучения КПЭ достаточно большого диаметра возможно с высокой степенью достоверности в рамках одномерного приближения [6].

Сформулируем некоторые допущения, касающиеся физической модели. Полагаем, что распределение плотности энергии в поперечном сечении электронного пучка является однородным. Эффективные значения плотности, теплоемкости и теплопроводности материала композиционного покрытия без учета его пористости, в соответствии с законом аддитивности, могут быть представлены в следующем виде:

$$\rho = v_{\text{TiC}} \rho_{\text{TiC}} + (1 - v_{\text{TiC}}) \rho_{\text{NiCr}},$$

$$c = v_{\text{TiC}} c_{\text{TiC}} + (1 - v_{\text{TiC}}) c_{\text{NiCr}},$$

$$\lambda = v_{\text{TiC}} \lambda_{\text{TiC}} + (1 - v_{\text{TiC}}) \lambda_{\text{NiCr}},$$

где ρ , c , λ , ($j = \text{TiC}, \text{NiCr}$) – плотность, теплоемкость и теплопроводность j -го компонента в композиционном покрытии, $v_{\text{TiC}} = 0,7$ – объемная доля TiC в композиции. Считаем, что при плавлении включений нихрома частицы TiC остаются твердыми вплоть до температуры плавления TiC. Поведение композиционного порошкового покрытия TiC-(Ni-Cr) при более высоких температурах в данной работе не рассматривается. Для технологических процессов обработки покрытия такого рода, важно расплавить только (Ni-Cr)-компоненту металлокерамической композиции, поскольку включения карбида титана, являясь упрочняющей фазой, не должны подвергаться плавлению или разложению. Таким образом, температура плавления композита определяется как $T_m = T_{m\text{NiCr}}$, а теплота его

плавления как $L_m = (1 - v_{\text{TiC}})L_{m\text{NiCr}}$, где $L_{m\text{NiCr}}$ – теплота плавления нихрома. В качестве материала подложки при проведении расчетов была выбрана нержавеющая сталь SUS430. В ряде расчетов учитывалась относительная пористость P покрытия. Пористый материал моделировался путем соответствующей коррекции эффективных значений плотности ρ и теплопроводности λ композиционного покрытия, приведенных выше: $\rho_p = (1 - P)\rho$, $\lambda_p = (1 - P)\lambda$, где ρ , λ и ρ_p , λ_p – свойства плотного композита и пористого материала. В таблице приведены значения теплофизических свойств материалов и композита.

Таблица. Теплофизические свойства материалов

Материал	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	T_m , К	T_e , К	L_m , Дж/кг
TiC	4920	572,5	17	3530	4573	$1,4 \cdot 10^6$
(Ni-Cr)	8340	460	12,2	1663	3653	298851
70 % TiC + 30 % (Ni-Cr) ^(*) ($P=0$)	5946	538,75	15,56	1663	–	89655,3
70 % TiC + 30 % (Ni-Cr) ^(*) ($P=0,3$)	4162,2	538,75	10,9	1663	–	89655,3
70 % TiC + 30 % (Ni-Cr) ^(*) ($P=0,5$)	2973	538,75	7,78	1663	–	89655,3
SUS430	7700	585	26	1767	–	250000

(*) Объемное содержание компонента в металлокерамической композиции

Сформулируем краевую задачу для описания процессов теплообмена и фазовых превращений в слое композитного покрытия, осажденного на достаточно толстую подложку, под воздействием внешнего теплового потока q .

На рис. 1 приведено схематическое представление области решения. Индексы f, b отвечают материалу покрытия и подложки, s – твердому состоянию покрытия, l – состоянию покрытия при расплавленной (Ni-Cr) – связке металлокерамической композиции TiC-(Ni-Cr).

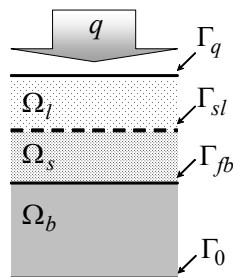


Рис. 1. Схематическое представление области решения

Теплообмен в Ω , рис. 1, описывается уравнением теплопроводности:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_i \text{grad } T), \quad i = s, l, b, \quad (1)$$

где ρ_i , c_i , λ_i – плотность, теплоемкость и теплопроводность i -го материала. Далее индексы материалов будем использовать только в случае, если принадлежность свойств какому-либо из них не очевидна.

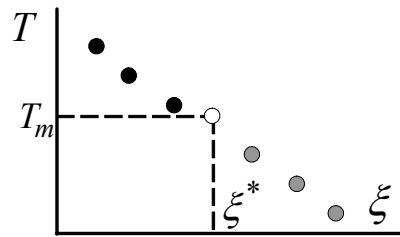


Рис. 2. Взаимосвязь положения фронта плавления и температуры

Граничные условия:

– воздействие внешнего теплового потока

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_q} = q; \quad (2)$$

где $\mathbf{n}$ – единичный вектор внешней нормали к границе;

– плавление

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{sl+0}} + \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{sl-0}} = L_m \rho \frac{d\xi}{dt}, \quad T|_{\Gamma_{sl}} = T_m; \quad (3)$$

– идеальный тепловой контакт между покрытием и подложкой

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{fb+0}} = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{fb-0}}, \quad (4)$$

– отсутствие теплообмена с внешней средой на границе Γ_0

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_0} = 0. \quad (5)$$

Начальные условия для момента времени $t=0$:

$$T(x, y) = T_0, \quad (x, y) \in \Omega. \quad (6)$$

Сформулированная краевая задача (1)–(6) решается методом конечных элементов с использованием неявной аппроксимации по времени.

Заметим, что на границе Γ_{sl} заданы одновременно первые и вторые краевые условия. Как правило, первые краевые условия используются для нахождения поля температур, а вторые – для определения динамики движения фронтов фазовых переходов. Это влечет определенные трудности, связанные с необходимостью численного дифференцирования полученных решений, поскольку вычисление производной $\partial T / \partial n$ вблизи границы определяет точность нахождения фронтов. В настоящей работе применен подход, основанный на том, что метод конечных элементов позволяет естественным образом учитывать вторые краевые условия при решении задачи теплопереноса, в то время как первые краевые условия могут быть использованы для определения точного положения границ фазовых переходов.

При определении точного положения фронта плавления можно воспользоваться тем соображением, что если его скорость будет завышена и расплавленного вещества окажется больше, то и количество тепла, требуемого для фазового перехода, будет больше а, следовательно, температура на границе раздела «твердое – жидкое» окажется ниже

температуры плавления. Если же скорость движения фронта будет занижена, то тепловой поток не будет скомпенсирован и произойдет перегрев фронта плавления. Таким образом, величина отклонения температуры на его поверхности от заданной будет пропорциональна отклонению фронта от точного положения (рис. 2).

При расчете очередного временного слоя, для координаты фронта, значение которой требует уточнения, используется следующая итерационная процедура:

$$y^{(i+1)} = y^{(i)} - f^{(i)} \cdot \frac{y^{(i)} - y^{(i-1)}}{f^{(i)} - f^{(i-1)}}.$$

Здесь функция $f^{(i)} = T(y^{(i)}) - T_m$ характеризует локальную невязку для текущей температуры фронта в процессе итераций. В качестве нулевого приближения $y^{(0)}$ используется положение фронта на предыдущем временном слое, а в качестве первого приближения ($i=1$) используется оценка, основанная на скорости перемещения фронта на предыдущем шаге по времени, или достаточно малое пробное возмущение.

Первоначально была выполнена серия вычислительных экспериментов для толщин покрытий $\Delta = 50, 100$ и 1000 мкм и достаточно широкого диапазона плотности мощности теплового потока q — от $5 \cdot 10^7$ до 10^{10} Вт/м² [7]. Расчеты проводили при условиях нагрева поверхности покрытия до температуры плавления (Ni-Cr)-связки в композиционных порошковых частицах, либо до достижения поверхностью покрытия температуры плавления TiC. На рис. 3 приведены зависимости толщины слоя покрытия, содержащего расплав (Ni-Cr)-связки, от плотности мощности теплового потока. Можно констатировать, что при толщине покрытия 1000 мкм в исследованном диапазоне значений плотности мощности электронного пучка не удастся полностью расплавить (Ni-Cr)-компоненту до момента достижения поверхностью температуры плавления TiC.

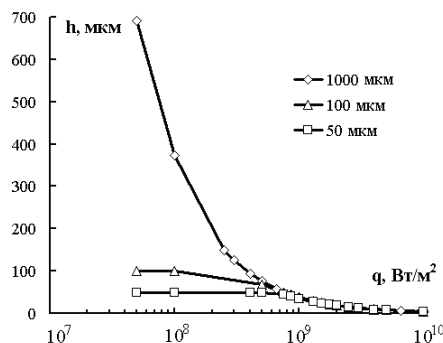


Рис. 3. Зависимость толщины слоя с расплавом (Ni-Cr)-связки от плотности мощности теплового потока для покрытий толщиной 50, 100 и 1000 мкм

При толщине покрытия 100 мкм и тепловом потоке $5 \cdot 10^7 \dots 10^8$ Вт/м² (Ni-Cr)-компонента во всем порошковом покрытии переходит в состояние расплава без перегрева поверхности покрытия выше температуры плавления TiC. Для толщины покры-

тия 50 мкм диапазон плотности мощности теплового потока несколько шире: $5 \cdot 10^7 \dots 5 \cdot 10^8$ Вт/м². При плотности мощности теплового потока более 10^9 Вт/м² толщина покрытия уже не влияет на толщину слоя с расплавом (Ni-Cr)-связки при условии, что температура на поверхности покрытия не достигает температуры плавления TiC.

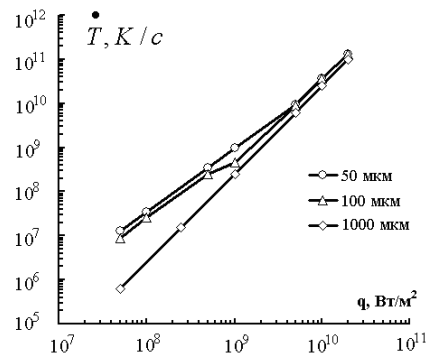


Рис. 4. Зависимость скорости охлаждения расплава (Ni-Cr)-связки от плотности мощности после снятия теплового потока

Согласно [8], текущее значение скорости охлаждения при затвердевании расплава представляется в виде $\dot{T}_b = (\partial T_b / \partial z)_{z=\xi+0} (d\xi/dt)$, где $(\partial T_b / \partial z)_{z=\xi+0}$ — температурный градиент на фронте затвердевания со стороны расплава в момент времени t , $(d\xi/dt)$ — скорость движения фронта затвердевания. Тогда, если t_3 — полное время затвердевания расплавленного слоя в покрытии, то среднюю скорость его охлаждения можно оценить как

$$\dot{T} = \frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} \dot{T}(t) dt = \frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=\xi+0} \cdot \frac{d\xi}{dt} \cdot dt.$$

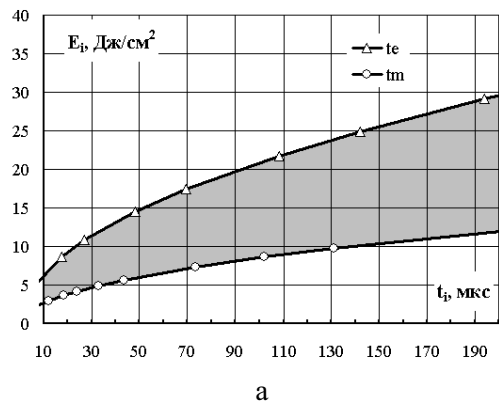
На рис. 4 представлена зависимость скорости охлаждения от плотности мощности теплового потока. Как и на предыдущем рисунке, видно, что при больших плотностях мощности КПЭ толщина покрытия не влияет на характер протекания теплофизических процессов, которые локализованы в поверхностной зоне покрытия, толщина которой значительно меньше толщины покрытия.

На рис. 5 приведены зависимости времени нагрева поверхности покрытия до температур плавления (Ni-Cr)-сплава (t_m) и TiC (времени окончания счета t_e) от плотности мощности теплового потока для покрытий различной толщины. Горизонтальными пунктирными линиями на рисунке ограничен интервал времени от 10 до 200 мкс, отвечающий возможностям установки [7] по длительности генерируемых импульсов. Результаты показывают, что в диапазоне режимных параметров установки, покрытия толщиной 50 и 1000 мкм имеют практически неразличимые значения времени нагрева поверхности покрытия до температур плавления (Ni-Cr)-сплава и TiC. В то же время, для потоков с плотностью мощности от $5 \cdot 10^7$ до $5 \cdot 10^8$ Вт/м² эти времена гораздо больше в сравнении с максимальной продолжительностью импульса установки [7], равной 200 мкс.

Проиллюстрируем более наглядно технологические возможности установки импульсного электронно-пучкового облучения в контексте обработки порошкового металлокерамического покрытия с целью перевода в состояние расплава (Ni-Cr)-компоненты во всем объеме покрытия. Выразим энергию импульса облучения через плотность мощности и длительность импульса в виде $E_i = q \cdot t_i$. Имея ряд значений плотности мощности теплового потока и соответствующих времен нагрева поверхности до температур плавления (Ni-Cr)-сплава и TiC в координатах E_i/t_i , можно построить две зависимости, которые будут определять диапазон режимных параметров установки, в котором за время воздействия одного импульса гарантированно реализуется нагрев поверхности покрытия до температуры плавления (Ni-Cr)-сплава, но не происходит ее нагрева выше температуры плавления TiC. На рис. 6, а, показан диапазон режимных параметров установки для покрытия толщиной 50 мкм при нулевой пористости, в то время как влияние пористости ($p=0, 30$ и 50%) в покрытии той же толщины проиллюстрировано на рис. 6, б. Результаты аналогичных расчетов для покрытий с толщинами 100 и 1000 мкм практически не отличаются от результатов полученных для покрытия толщиной 50 мкм.

Можно констатировать, что увеличение пористости напыленного металлокерамического покрытия приводит к снижению величины плотности энергии в электронном пучке, необходимой для нагрева поверхности покрытия до температур плавления (Ni-Cr) и TiC компонент покрытия. Кроме того, уменьшается интервал значений плотностей энергии в электронном пучке, обеспечивающий нагрев поверхности покрытия от температуры плавления (Ni-Cr)-сплава до температуры плавления TiC.

На рис. 7 приведены зависимости глубины проплавления (Ni-Cr)-компоненты металлокерамического покрытия с поверхности покрытия от длительности импульса для покрытий с толщинами 50 и 1000 мкм. При этом значение энергии в импульсе для каждого значения длительности импульсов облучения t_i отвечает своей максимальной величине,



приведенной на рис. 6. Результаты показывают, что максимально возможная глубина проплавления (Ni-Cr)-компоненты покрытия с его внешней поверхности при облучении покрытия составляет около 25 мкм. Аналогичные расчеты, выполненные для покрытий с толщинами 50 и 1000 мкм, дают близкие значения глубины проплавления (Ni-Cr)-компоненты. Для покрытия толщиной 50 мкм при длительности импульсов облучения $t_i > 100$ мкс она несколько меньше, чем у покрытия толщиной 1000 мкм, что обусловлено влиянием стальной подложки.

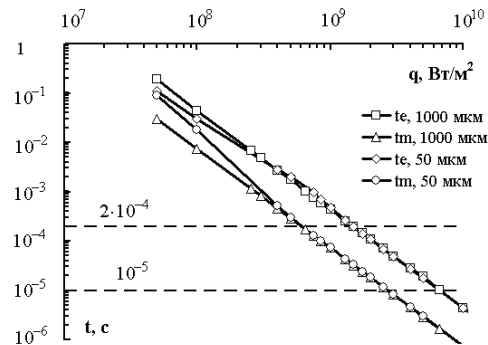


Рис. 5. Зависимости времени нагрева поверхности покрытия до температур плавления (Ni-Cr)-сплава (t_m) и TiC (времени окончания счета t_e) от плотности мощности теплового потока для покрытий толщиной 50 и 1000 мкм

Приведенные на рис. 7 данные показывают, что с увеличением пористости в напыленном металлокерамическом покрытии глубина проплавления (Ni-Cr)-компоненты к моменту достижения поверхностью покрытия температуры плавления TiC практически не изменяется. Кроме того, с увеличением длительности импульсов облучения кратно увеличивается глубина прогрева покрытия.

Рассмотрим влияние количества импульсов электронно-пучкового облучения порошкового металлокерамического покрытия на температуру и глубину его прогрева. Пусть t_i — время действия импульса электронного облучения, t_0 — временной интервал между импульсами. Связь между величинами t_i , t_0 и частотой ν следования импульсов выразится следующим образом: $t_0 = (1 - \nu t_i) / \nu$.

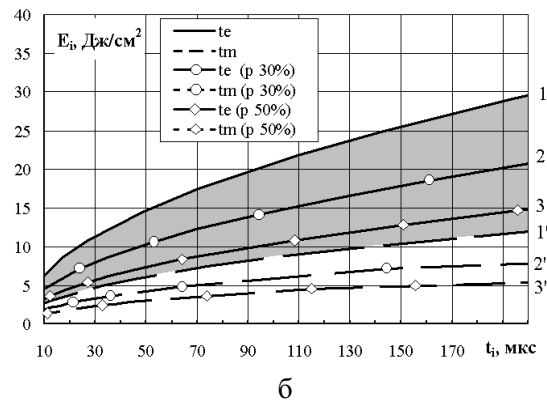


Рис. 6. Зависимости диапазонов плотности энергии в электронном пучке, обеспечивающие при единичном импульсе электронно-пучкового облучения нагрев поверхности порошкового металлокерамического покрытия толщиной 50 мкм и пористостью от 0 до 30 и 50 об. % до температур плавления (Ni-Cr)-сплава (t_m) и TiC (t_e): а — беспористое покрытие, б — покрытия с пористостью 0% (1, 1'), 30% (2, 2') и 50% (3, 3')

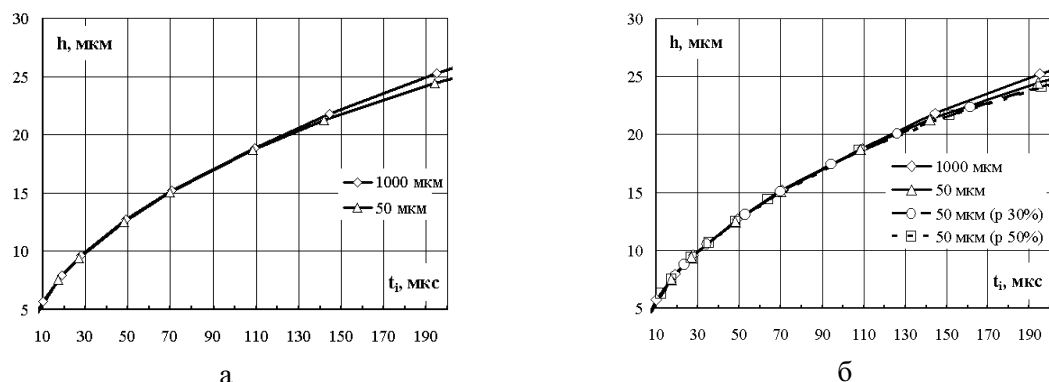


Рис. 7. Зависимости глубины проплавления (Ni-Cr)-компоненты металлокерамического покрытия от длительности импульса электронно-пучкового облучения для покрытий с толщинами 50 и 1000 мкм: а) беспористое покрытие, б) покрытия с пористостью 0% (сплошные кривые), 30 и 50 %

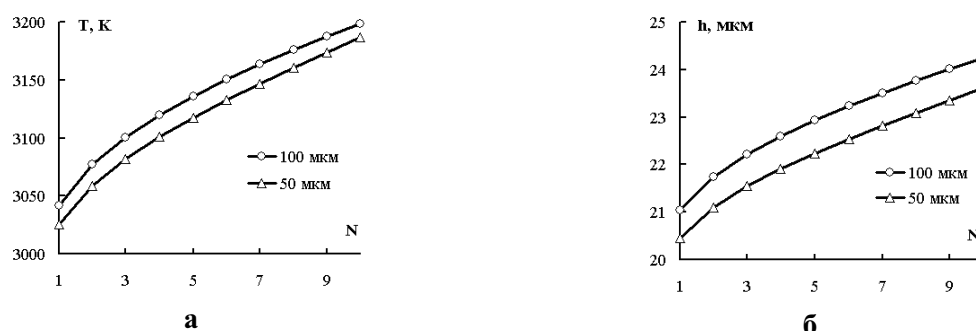


Рис. 8. Зависимости температуры нагрева поверхности (а) и глубины прогрева металлокерамических покрытий (б) толщиной 50 и 100 мкм до температуры плавления (Ni-Cr)-компонента от количества импульсов облучения

Расчеты были проведены для покрытий толщиной 50 и 100 μm при $q=1,25 \cdot 10^9$, $\nu=10$ Гц, $t_i=2 \cdot 10^{-4}$ с, $t_0=0,998$ с. На рис. 8 представлены расчетные зависимости температуры поверхности и глубины прогрева покрытий от количества импульсов облучения (температуру поверхности фиксировали в момент прекращения импульса облучения).

С увеличением количества импульсов облучения на поверхности покрытия происходит повышение температуры, причем для более тонкого покрытия температура каждый раз оказывается ниже, чем более толстого. Это можно объяснить влиянием подложки, теплопроводность которой значительно выше, чем у покрытия. С увеличением количества импульсов облучения поверхности металлокерамического покрытия глубина проплавления (Ni-Cr)-компоненты увеличивается незначительно. Изменение количества импульсов от 1 до 10 увеличивает глубину проплавления менее чем на 1 μm .

На рис. 9 приведены расчетные зависимости температуры поверхности покрытия в момент окончания временного интервала между импульсами облучения от количества импульсов. Медленное повышение температуры нагрева поверхности при низких значениях температуры нагрева поверхности покрытия говорит о том, что за время между импульсами облучения происходит практически полное поглощение тепловой энергии импульса электронно-пучкового облучения стальной подложкой.

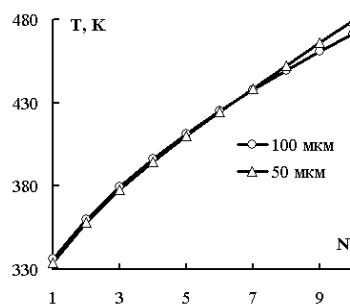


Рис. 9. Зависимость температуры поверхности металлокерамического покрытия в момент окончания временного интервала между импульсами облучения от количества импульсов для покрытий толщиной 50 и 100 мкм

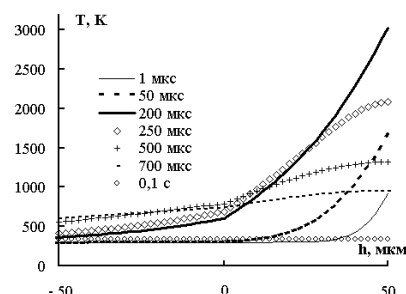


Рис. 10. Распределение температуры по поперечному сечению металлокерамического покрытия толщиной $h=50$ мкм и теплоизолированной снизу подложки толщиной $100h$ в различные моменты времени после одиночного импульса электронно-пучкового облучения ($q=5 \cdot 10^9$ Вт/м², $t_i=200$ мкс)

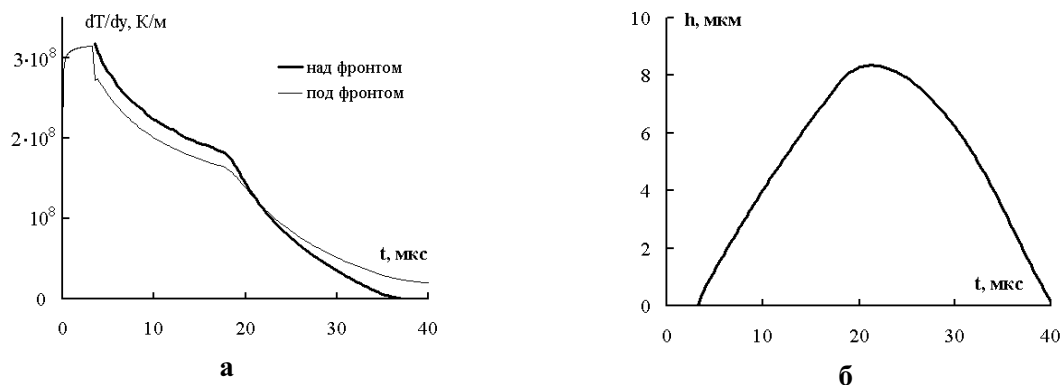


Рис. 11. Кинетические зависимости градиента температуры над и под фронтом плавления (Ni-Cr)-компоненты металлокерамического покрытия (а) и толщины поверхностного слоя с (Ni-Cr) – расплавом (б) при облучении покрытия толщиной 50 мкм тепловым потоком с плотностью мощности $q=5 \cdot 10^9$ Вт/м²

Распределение температуры по поперечному сечению покрытия и подложки после одиночного импульса электронно-пучкового облучения приведено на рис. 10. Более пологие распределения температуры на границе раздела покрытия с подложкой и в подложке обусловлены более высокой теплопроводностью стальной основы. По истечении 0,1 с после прекращения облучения распределение температуры в покрытии и подложке практически не отличается от начального (до облучения покрытия).

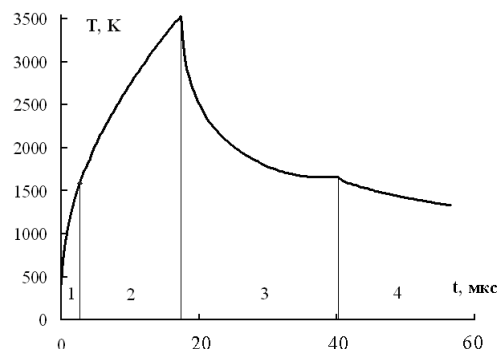


Рис. 12. Кинетическая зависимость температуры поверхности покрытия толщиной 50 мкм от времени при облучении покрытия толщиной 50 мкм тепловым потоком с плотностью мощности $q=5 \cdot 10^9$ Вт/м²

На рис. 11 представлены кинетические зависимости градиента температуры над и под фронтом плавления (Ni-Cr)-сплава в металлокерамическом покрытии толщиной 50 мкм при нагреве его поверхности тепловым потоком с плотностью мощности $q=5 \cdot 10^9$ Вт/м² до температуры плавления TiC с последующим охлаждением покрытия после снятия теплового потока (а) и толщины поверхностного слоя покрытия с расплавом (Ni-Cr)-компоненты металлокерамической композиции (б). Точка излома на кривых соответствует моменту снятия теплового потока, пересечение кривых – моменту начала кристаллизации (Ni-Cr)-расплава. Эффект продолжения процесса плавления (Ni-Cr)-сплава после снятия теплового потока может быть использован при высокочастотном импульсном воздействии для увеличения глубины проплавления (Ni-Cr)-компо-

ненты металлокерамического покрытия при той же плотности мощности теплового потока [7]. Кинетическая зависимость температуры поверхности покрытия в пределах длительности одного импульса облучения покрытия имеет более сложный характер (рис. 12). Здесь можно выделить 4 характерных стадии: 1) нагрев до температуры плавления (Ni-Cr)-компоненты, 2) плавление (Ni-Cr)-компоненты, 3) кристаллизация (Ni-Cr)-компоненты после снятия теплового потока и 4) завершение процесса кристаллизации (Ni-Cr)-компоненты и полное охлаждение покрытия за счет теплоотвода в подложку.

Выводы

Разработаны физико-математическая модель и программный комплекс для расчетов температурного поля в поверхностной зоне металлокерамического покрытия TiC-(Ni-Cr) на стальной основе при импульсном электронно-пучковом облучении поверхности покрытия.

Получены расчетные зависимости влияния толщины покрытий, пористости покрытий и режимных параметров импульсного электронно-пучкового облучения на время нагрева поверхности покрытия до температуры плавления (Ni-Cr)-компоненты металлокерамической композиции, глубину проплавления (Ni-Cr)-компоненты с поверхности покрытия при температурах ниже температуры плавления TiC, скорость охлаждения и кристаллизации (Ni-Cr)-расплава в металлокерамическом покрытии после снятия теплового потока, распределение температуры и ее градиента по поперечному сечению покрытия и стальной подложки. Установлено, что плотность энергии в электронном пучке и длительность импульсов облучения имеют преобладающее влияние на формирование температурного профиля в покрытии и подложке, а изменение числа импульсов облучения и временных интервалов между ними позволяют регулировать продолжительность межфазного взаимодействия компонентов металлокерамической композиции в условиях заданного температурного профиля в поверх-

ностном слое покрытия. Проведена численная оценка диапазонов оптимальных значений режимных параметров импульсного электронно-пучкового облучения напыленного металлокерамического покрытия, позволяющих реализовать контролируемую термообработку металлокерамического покрытия в условиях твердо-жидкофазного взаимо-

действия компонентов металлокерамической композиции между собой и со стальной основой.

Результаты получены при частичной поддержке РФФИ, грант № 07-08-00209 на 2007-2008 гг. «Фундаментальные исследования механизмов формирования и закономерностей эволюции структуры и физико-механических свойств плазменных металлокерамических покрытий в условиях электронно-пучковой обработки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Колобова Е.Г. Электронная обработка безвольфрамовой металлокерамики. I. Влияние на микроструктуру поверхности и стойкость в режиме резания // Физика и химия обработки материалов. — 2004. — № 5. — С. 17–20.
2. Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Лапшин О.В. Электронная обработка безвольфрамовой металлокерамики. II. Структурные превращения в поверхностном слое // Физика и химия обработки материалов. — 2005. — № 1. — С. 31–34.
3. Ovcharenko V.E., Yu Baohai, Psakhie S.G. Electron-beam treatment of tungsten-free TiC/NiCr cermet. I: Influence of sub-surface layer microstructure on resistance to wear during cutting of metals // Journal Materials Science & Technology. — 2005. — V. 21. — № 3. — P. 427–429.
4. Yu Baohai, Ovcharenko V.E., Psakhie S.G., Lapshin O.V. Electron-beam treatment of tungsten-free TiC/NiCr cermet. II: Structural transformation in the sub-surface layer // Journal Materials Science & Technology. — 2006. — V. 22. — № 4. — P. 511–513.
5. Головин А.А., Солоненко О.П. Нестационарный сопряженный теплообмен и фазовые превращения при высокоэнергетической обработке поверхности. Ч. 1. Вычислительный метод и его реализация // Теплофизика и аэромеханика. — 2007. — Т. 14. — № 3. — С. 413–428.
6. Солоненко О.П., Головин А.А. Нестационарный сопряженный теплообмен и фазовые превращения при высокоэнергетической обработке поверхности. Ч. 2. Моделирование технологических процессов // Теплофизика и аэромеханика. — 2007. — Т. 14. — № 4. — С. 623–638.
7. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения // В кн.: Структура и свойства перспективных металлических материалов. — Гл. 13. — С. 345–382 / Под общ. ред. А.И. Потекаева. — Томск: Изд-во «НТЛ», 2007. — 580 с.
8. Chalmers B. Solidification. — ASM, Metals Park, OH, 1971. — 328 p.

Поступила 26.12.2008 г.

УДК 536.46:519.6

СВЯЗАННАЯ МОДЕЛЬ СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ СИСТЕМЫ Ti-TiAl₃

С.Н. Сорокова, А.Г. Князева*

Томский политехнический университет

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: s_sorokova@tpu.ru

Предложена и исследована математическая модель спекания порошков Ti-TiAl₃ в условиях однородного регулируемого нагрева. Учитывается, что химические превращения происходят с изменением объема и сопровождаются появлением механических напряжений и деформаций дополнительно к напряжениям и деформациям вследствие высоких градиентов температуры. Учтено, что объемные изменения оказывают влияние на тепловые и химические процессы. Исследована эволюция температуры, концентраций элементов и соединений, относительного изменения объема образца и объемных деформаций во времени.

Ключевые слова:

Спекание порошковых прессовок, математическое моделирование, связанные модели.

Перспективным применением спеченных порошковых сплавов Ti-Al является использование их в качестве мишеней (катодов) в технологиях нанесения ионно-плазменных покрытий. Однако порошковые катоды Ti-Al до настоящего времени не нашли широкого применения по причине отсутствия достаточно простой, доступной и высокопроизводительной технологии производства катодов с однородной структурой и приемлемой пористостью. Известны попытки уменьшить пори-

стость порошковых катодов спеканием под давлением [1] или в результате самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с приложением давления [2]. Эти способы характеризуются низкой производительностью и высокой стоимостью готовых изделий. Применение спекания порошковых смесей Ti-TiAl₃ позволяет одновременно достичь приемлемых характеристик пористости спеченных образцов и себестоимости их изготовления в условиях опытно-промышленного производства [3].