

УДК 621.793:669.056.9:535.233.52

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТИ. ЧАСТЬ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ*

О.П. СОЛОНЕНКО, А.А. ГОЛОВИН

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

Разработанная обобщенная физико-математическая модель, вычислительная процедура на основе метода конечных элементов, а также программное обеспечение были практически использованы для моделирования процессов нестационарного сопряженного теплообмена и фазовых превращений при обработке поверхности высококонцентрированными потоками энергии со стационарным, импульсным и подвижным источником нагрева (обработка, в том числе оплавление покрытий квазиламинарной плазменной струей, вынесенной электрической дугой и импульсным электронным пучком; очистка поверхности металлических подложек от оксидного слоя с помощью катодной вакуумной дуги и др.). Проведено исследование практически важных процессов, имеющих существенно различающиеся пространственные и временные масштабы, характеризующиеся плотностью мощности тепловых потоков $q \in [10^7; 10^{14}] \text{ Вт/м}^2$.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема коренного улучшения качества материалов и изделий, повышение их ресурса и эксплуатационных характеристик в современных условиях развития техники и машиностроения становится особенно актуальной. Эта проблема в большинстве случаев решается путем нанесения многофункциональных, в том числе защитных и объемно-упрочненных покрытий и их обработки концентрированными потоками энергии (КПЭ).

Покрытие представляет собой гетерогенную структуру со слоистым строением, присутствием микровключений газа, трещин и границ раздела между сильно деформированными или растекшимися и затвердевшими на основе каплями расплава — сплэтами, в контакте покрытия с подложкой имеют место отслоения и трещины [1]. Все это обуславливает относительно невысокую прочность сцепления его с основой, наличие замкнутой и открытой пористости, а также анизотропию физических свойств.

Одним из эффективных приемов повышения адгезии и когезии покрытий, получения коррозионно- и износостойких слоев на поверхности изделий, снижения газопроницаемости путем частичного или полного оплавления с поверхности является обработка с помощью стационарных КПЭ относительно невысокой плотности ($q \sim 10^7 - 10^9 \text{ Вт/м}^2$), в частности, квазиламинарной плазменной струей

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-08-00209).

($q \sim 10^7-10^8$ Вт/м²) [1], а также вынесенной электрической дугой ($q \sim 10^8-10^9$ Вт/м²), при которой за время $t \sim h^2/a$ (h — толщина покрытия, a — его температуропроводность) не происходит испарения материала покрытия, а также существенного перегрева подложки. Перспективна также обработка покрытий импульсным лазерным или электронным пучком, при которой нагрев слоя осуществляется периодически [2–5], и др. В течение интервала воздействия импульса происходит аккумуляция энергии в слое, а в интервалах между импульсами накопленная энергия перераспределяется на поддержание фазовых превращений и теплоотвод в основу.

Другим, практически интересным, процессом является очистка поверхности металла от оксидного слоя с помощью катодной вакуумной дуги обратной полярности [6]. Катодные пятна, воздействуя селективно на оксидный слой, удаляют его путем испарения. Наблюдаемая скорость испарения оксидного слоя обратно пропорциональна его толщине и прямо пропорциональна току дуги. Для понимания закономерностей, определяющих этот процесс, были предложены упрощенные модели [6, 7], основанные на балансе энергии в прикатодной области. Для более эффективного управления процессом и целенаправленного уменьшения остаточной шероховатости очищенной от оксида металлической поверхности, подплавляемой в процессе испарения пленки оксида, необходимо использовать более адекватную модель [8], учитывающую нестационарный сопряженный теплоперенос и фазовые превращения в оксидном слое и металлической подложке при плотностях мощности теплового потока $10^{10}-10^{14}$ Вт/м², характерных для такого процесса.

Разработанная в [9] обобщенная физико-математическая модель, вычислительная процедура на основе метода конечных элементов, а также программное обеспечение были практически использованы для моделирования перечисленных выше и других процессов.

1. ОБРАБОТКА ПОКРЫТИЙ

1.1. Обработка двухкомпонентного Ni-Al покрытия, осажденного с помощью холодного газодинамического напыления

В настоящее время самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) широко применяется для получения компактов, порошковых материалов, а также при производстве готовых изделий. Однако недостатком стандартного процесса СВС является невозможность получения высокоплотных материалов и изделий, которая может быть частично преодолена проведением реакции синтеза под давлением.

Значительный интерес представляет разработка научных основ комбинированной технологии нанесения двухкомпонентного покрытия заданного стехиометрического состава с помощью холодного газодинамического напыления (ХГН) порошков никеля и алюминия с последующим синтезом целевого интерметаллида (Ni₃Al или NiAl) путем поверхностной обработки нанесенного слоя с помощью концентрированного потока энергии.

Приведем результаты вычислительных экспериментов, характеризующих возможные сценарии при воздействии КПЭ на композиционное покрытие из механической смеси порошков Ni-Al стехиометрического состава, напыленное на стальную подложку (Ст. 45).

Эффективные величины плотности, теплоемкости и теплопроводности материала композиционного покрытия без учета его пористости, в соответствии с законом аддитивности, представим в следующем виде:

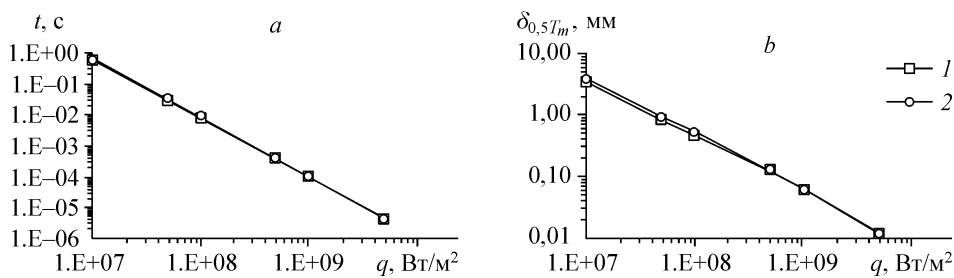


Рис. 1. Сценарий 1: *a* — время нагрева поверхности покрытия до температуры плавления алюминия T_m в зависимости от плотности мощности теплового потока, *b* — характерная толщина температурного пограничного слоя в основе ($\delta_{0,5T_m}$ — координата, отсчитываемая от поверхности покрытия, для которой температура равна $0,5T_m$), толщина покрытия составляет 150 (1), 300 (2) мкм.

$$\rho = v_{Al}\rho_{Al} + (1 - v_{Al})\rho_{Ni}, \quad c = v_{Al}c_{Al} + (1 - v_{Al})c_{Ni}, \quad \lambda = v_{Al}\lambda_{Al} + (1 - v_{Al})\lambda_{Ni},$$

где ρ_j , c_j , λ_j ($j = Al, Ni$) — плотность, теплоемкость и теплопроводность j -го компонента в композиционном покрытии, v_{Al} — относительная массовая доля алюминия в композиции. Для стехиометрического состава композиции, отвечающей синтезу, Ni_3Al , v_{Al} равняется 0,13. Толщина покрытий принималась $\Delta = 150$ и 300 мкм.

При воздействии на поверхность осажденного с помощью ХГН композиционного слоя Ni–Al заданной толщины Δ высококонцентрированным потоком энергии заданной плотности q и длительности t_q возможна следующая последовательность сценариев:

1) за время t_q осуществляется разогрев композита Ni–Al до температуры плавления алюминия без его плавления (рис. 1, *a*), в результате чего на границах раздела сплэтов инициируется твердофазная реакция образования интерметаллидов, как это имеет место при инициации порошковой смеси при СВС. В данном случае по мере увеличения плотности мощности теплового потока толщина температурного пограничного слоя δ_T уменьшается и локализуется внутри покрытия ($\delta_T < \Delta$), а при достаточно больших q тепловой пограничный слой сосредоточен у поверхности (рис. 1, *b*);

2) в течение времени t_q расплавлению подвергаются только включения (сплэты) алюминия (рис. 2, *a*), что обеспечивает прохождение процесса одновременного

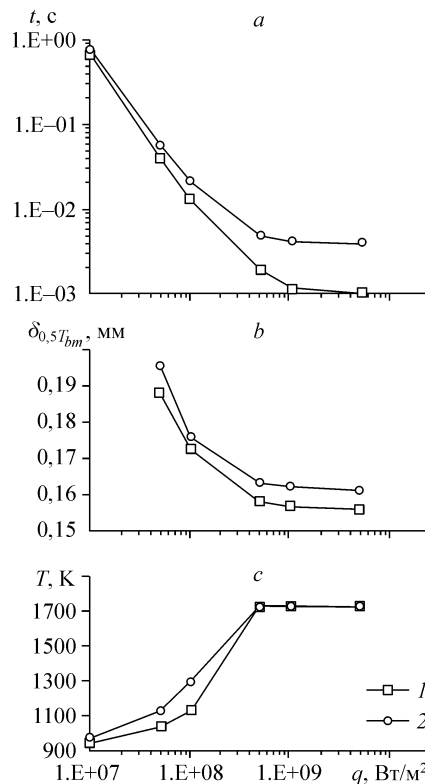


Рис. 2. Сценарий 2: *a* — время полного плавления алюминия в гетерогенном покрытии Ni–Al в зависимости от плотности мощности теплового потока, *b* — характерная толщина температурного пограничного слоя в основе ($\delta_{0,5T_m}$ — координата, отсчитываемая от поверхности покрытия, для которой температура равна $0,5T_m$), *c* — температура поверхности покрытия к моменту завершения плавления алюминия.

растворения твердых включений (сплэтов) никеля, взвешенных в расплаве алюминия, с выделением теплоты растворения, в результате чего осуществляется синтез интерметаллидов (NiAl_3 , Ni_2Al_3 , NiAl , Ni_3Al). При увеличении плотности мощности q эффективная толщина температурного пограничного слоя уменьшается (рис. 2, *b*), а скорость плавления алюминия в слое возрастает, но при этом возрастает и температура внешней поверхности покрытия, которая может стать равной температуре плавления никеля (рис. 2, *c*), в то время как фронт плавления алюминия еще не достиг границы раздела “покрытие — основа”; в этом случае при дальнейшем воздействии теплового потока, наряду с продолжением плавления алюминия, начинается плавление никеля. Таким образом, образование интерметаллидов в слое осуществляется одновременно в двух различных кинетических режимах: а) в нижнем слое покрытия образование интерметаллидов зависит от скорости растворения твердого никеля в жидком алюминии; б) в верхнем, полностью расплавленном, слое покрытия синтез интерметаллидов лимитируется взаимной диффузией жидких микрообъемов алюминия и никеля с одновременным образованием химических связей;

3) в момент времени t_q расплавлению подвергается весь слой гетерогенного материала Ni–Al (рис. 3, *a*), а реакция синтеза интерметаллида протекает в жидкой фазе при температуре выше температуры плавления никеля, т. е. в значительно перегретом расплаве алюминия. При увеличении плотности мощности q эффективная толщина температурного пограничного слоя уменьшается (рис. 3, *b*), а процесс лимитируется двумя факторами — температурой поверхности покрытия (рис. 3, *c*), которая может достичь температуры кипения алюминия, что приведет к его потере в поверхностных слоях покрытия (рис. 3, *d*) и образованию пористого никелевого каркаса вследствие испарения, а также температурой на границе раздела “покрытие–подложка”, которая может вырасти до температуры плавления материала основы, в результате чего начнется ее плавление и химическое взаимодействие материалов Ni–Al и основы. Реализация второго режима требует отдельного рассмотрения, поскольку он имеет непосредственное отношение к увеличению прочности связи между синтезированным поверхностным слоем алюминидов никеля и металлической основой.

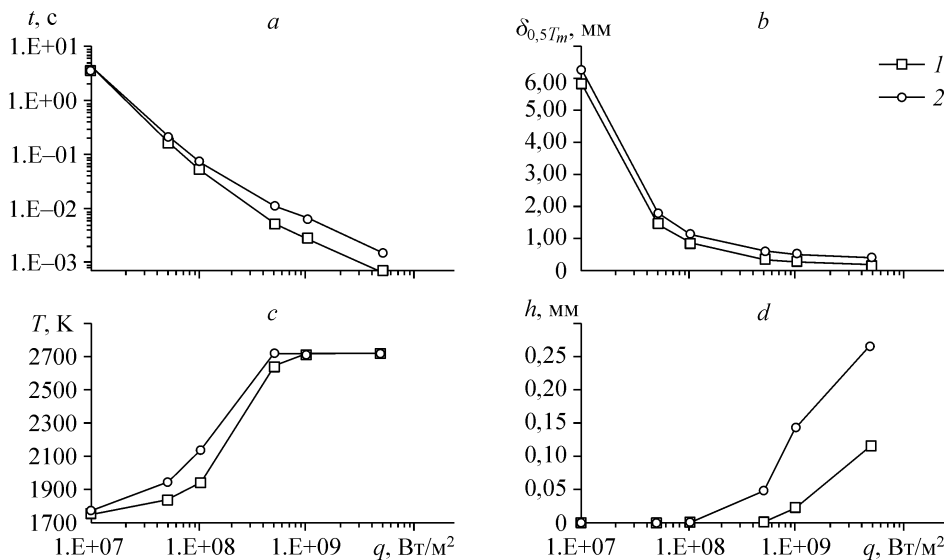


Рис. 3. Сценарий 3: *a–c* — см. комментарии к рис. 2, *d* — толщина слоя, в котором к моменту полного расплавления гетерогенного покрытия произошло испарение включений алюминия.

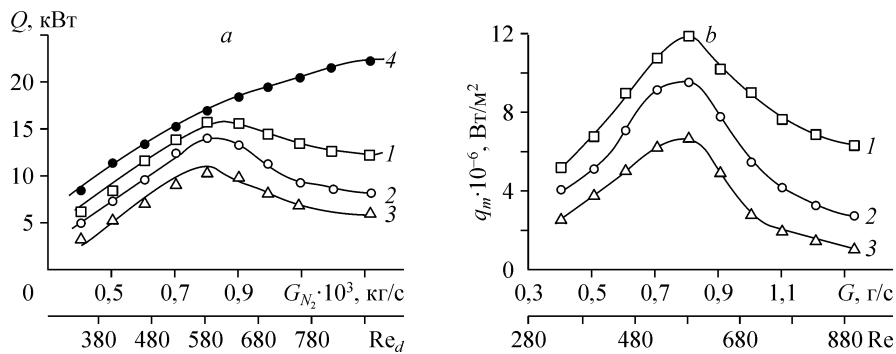


Рис. 4. Зависимость полезной мощности $N_{эф}$ (4) плазмотрона от расхода рабочего газа (азота) и интегральных тепловых потоков Q от струи в поверхность преграды для различных дистанций $z = z/D_c$ от сопла плазмотрона (a), соответствующая зависимость плотности мощности теплового потока от струи в поверхность преграды в лобовой точке (b), $\bar{z} = 6$ (1), 8 (2), 10 (3).

Выполнены расчетные оценки пространственно-временных параметров, характеризующих процесс нагрева гетерогенного Ni–Al поверхностного слоя, осажденного на стальную подложку, в зависимости от его толщины и плотности мощности концентрированного потока энергии.

Анализируя результаты расчетов, представленные на рис. 1–3, можно заключить, что для рассматриваемого случая наибольший практический интерес представляют стационарные КПЭ с плотностью мощности $10^7 \leq q \leq 10^8$ Вт/м². Использование таких КПЭ не предъявляет серьезных требований к кинематическим схемам манипуляторов, используемых для взаимного перемещения пятна нагрева и подложки, не приводит к перегреву материала подложки при обработке Ni–Al слоя, а также позволяет избежать испарения алюминия. Таким, по нашему мнению, требованиям удовлетворяет плазмотрон с межэлектродной вставкой, позволяющий генерировать квазиламинарные струи, истекающие при малых числах Рейнольдса [1]. Квазиламинарный режим истечения струи обеспечивает более высокую плотность мощности теплового потока к поверхности преграды по сравнению с турбулентным [1] (рис. 4, 5).

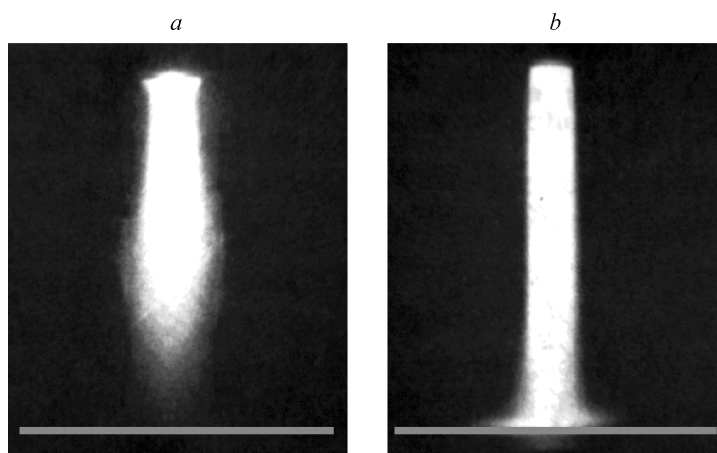


Рис. 5. Фотографии плазменных струй, натекающих на плоскую преграду ($\bar{z} = 6$) при различных режимах истечения: турбулентном, $Re = 820$ (a), квазиламинарном, $Re = 580$ (b).

1.2. Обработка покрытий импульсным КПЭ

Одним из эффективных методов поверхностного модифицирования стали, твердых сплавов и газотермических покрытий является импульсная лазерная и электронно-пучковая обработка поверхности [2–5]. Наиболее значительного эффекта следует ожидать при использовании данных технологий для поверхностного оплавления спеченных металлокерамических материалов и покрытий, характеризующихся сравнительно высокой остаточной пористостью.

Недостаточная изученность процессов тепло- и массопереноса, ответственных за формирование структуры обрабатываемых материалов и прочностных, в том числе адгезионных, свойств композиций материалов существенно сдерживает расширение областей применения указанных технологий, поскольку эффективность их использования связана с оптимальным выбором значений технологических параметров и автоматизацией технологического процесса в целом.

В связи с тем, что экспериментальный подбор рациональных значений технологических параметров является достаточно трудоемким и энергоемким процессом, весьма перспективно компьютерное моделирование и оптимизация процессов импульсной обработки с помощью КПЭ.

В качестве иллюстрации эффективности разработанного вычислительного метода выполнены расчеты процесса полного оплавления поверхностного слоя (покрытия) из нержавеющей стали толщиной 150 мкм, напыленного на никелевую подложку, при воздействии КПЭ. Целью исследования было определение влияния мощности и характера воздействия теплового потока на такие параметры процесса как: время, необходимое для полного оплавления слоя; оставшаяся, вследствие возможного испарения, толщина поверхностного слоя; глубина теплового возмущения основы, а также затраченное количество энергии.

Для определения глубины теплового возмущения подложки (основы) определялась координата z , для которой избыточная температура в e раз меньше избыточной температуры плавления материала покрытия, т. е.

$$\vartheta_z = |T_z - T_{b0}| / (T_{fm} - T_{b0}) / < e.$$

Первая серия расчетов была выполнена при фиксированной ширине расчетной области при равномерном тепловом потоке по всей ее внешней поверхности, что отвечает одномерному приближению исследуемой задачи. Для различной плотности мощности теплового потока проводились расчеты сначала для постоянного действующего теплового потока, а затем для импульсного воздействия. Каждый импульс определялся интервалом времени воздействия теплового потока и интервалом времени, когда поток равен нулю. Интервалы выбирались равными между собой и принимались равными t/N , где t — время, затраченное на полное плавление слоя при стационарном тепловом потоке. Расчеты проводились при $N = 100$ (рис. 6).

В следующей серии расчетов была зафиксирована плотность мощности теплового потока $q = 10^9$ Вт/м², а изменялась величина N , определяющая частоту следования импульсов. Результаты данных расчетов представлены на рис. 7 и в таблице 1 ($N = 1, 10, 50$). При $N = 10, 50$ расчет проводился до полного плавления слоя.

Результаты вычислительных экспериментов показывают, что общие затраты энергии на полное оплавление покрытия нелинейно зависят от плотности мощности теплового потока. При этом существует оптимальная плотность мощности, для которой затраты энергии минимальны. Данное оптимальное значение зависит от теплоотвода в подложку и интенсивности испарения материала покрытия.

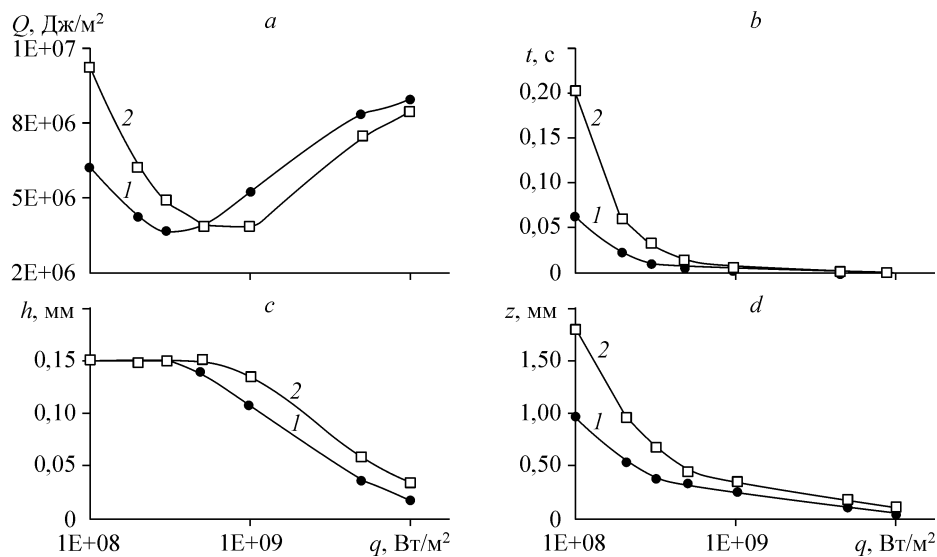


Рис. 6. Сравнение результатов расчета обработки при стационарном (1) и импульсном (2) воздействиях: удельная энергия, затраченная на полное плавление слоя (а), время полного плавления слоя (б), толщина слоя, оставшегося после полного плавления (с), глубина теплового возмущения подложки (д).

Импульсный режим оплавления покрытия в ряде случаев более оптимален из-за того, что материал покрытия над фронтом плавления за время воздействия импульса нагревается выше температуры плавления, но не успевает достичь температуры кипения к моменту снятия теплового потока. При отсутствии потока перегретый выше температуры плавления расплавленный слой претерпевает охлаждение. При этом, запасенное тепло отводится в подложку и частично расходуется на продолжение плавления. К моменту воздействия очередного теплового импульса расплавленный слой вновь способен аккумулировать тепло без испарения материала.

Однако при относительно малых плотностях мощности теплового потока импульсный режим более энергоемок, поскольку интенсивность подвода тепла к поверхности падает и начинает превалировать теплоотвод в подложку.

Последняя серия расчетов была проведена для фиксированной плотности мощности теплового потока $q = 10^9 \text{ Вт/м}^2$, но при различных относительных радиусах r_s/h пятна приложения потока (рис. 8–10). Полученные результаты

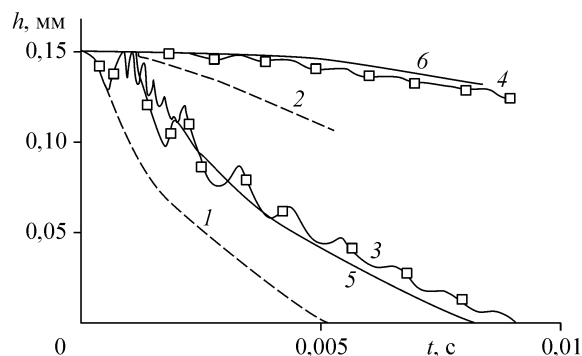


Рис. 7. Динамика фронтов плавления (1, 3, 5) и испарения (2, 4, 6) при различных параметрах ($N = 1, 10, 50$) импульсного воздействия.

Таблица 1

Влияние количества тепловых импульсов на исследуемые параметры

| N | t, c | $h, мм$ | $z, мм$ | $Q, Дж/м^2$ |
|-----|---------|---------|---------|-------------|
| 1 | 0,00526 | 0,1076 | 0,2618 | 5262654 |
| 10 | 0,00910 | 0,1254 | 0,3625 | 4736389 |
| 50 | 0,00839 | 0,1335 | 0,3407 | 4210123 |

наглядно демонстрируют влияние радиуса пятна воздействия теплового потока на исследуемый процесс. Наиболее интересно поведение толщины покрытия, оставшегося после обработки. С одной стороны, увеличение радиуса пятна воздействия приводит к уменьшению кривизны поверхности приложения теплового потока в окрестности оси симметрии. Это приводит к росту плотности мощности теплового потока и уменьшению толщины оставшегося слоя в приосевой области. С увеличением радиуса пятна воздействия влияние данного фактора на процессы, протекающие в приосевых областях, уменьшается, оставаясь значимым на периферии зоны обработки.

С другой стороны, увеличение радиуса пятна воздействия уменьшает влияние радиального переноса тепла в окрестности оси симметрии. При равной плотности мощности с ростом радиуса пятна воздействия имеет место уменьшение теплоотвода в радиальном направлении и, как следствие, уменьшается время, необходимое на полное проплавление покрытия, и, следовательно, увеличивается толщина оставшегося слоя.

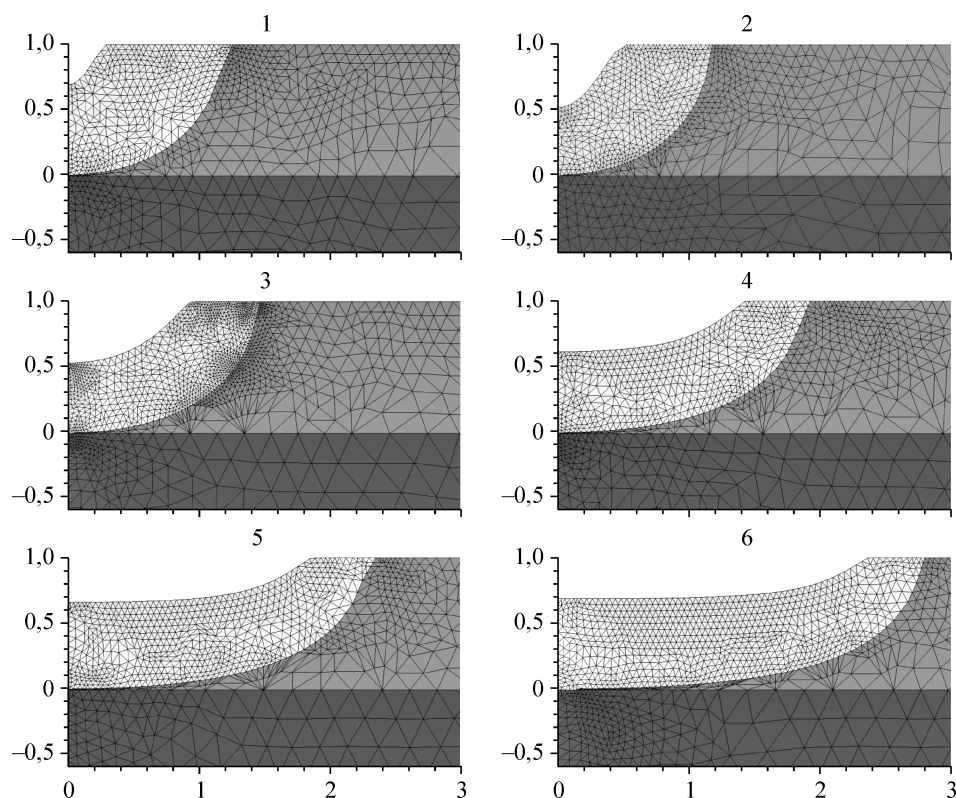


Рис. 8. Конфигурация жидкой ванны при полном проплавлении поверхностного слоя для различных относительных радиусов воздействия теплового потока, $r_s/h = 0,3$ (1), 0,5 (2), 1 (3), 1,5 (4), 2 (5), 2,5 (6).

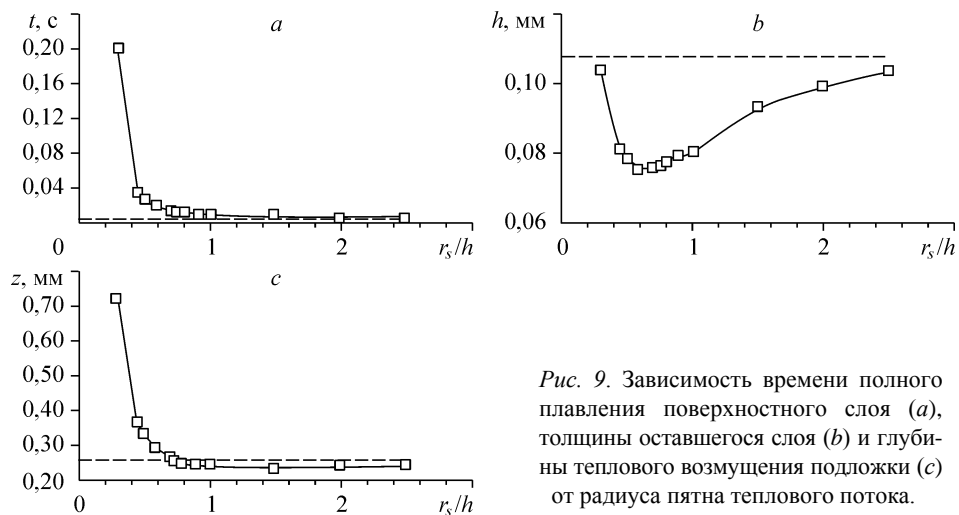


Рис. 9. Зависимость времени полного плавления поверхностного слоя (а), толщины оставшегося слоя (b) и глубины теплового возмущения подложки (с) от радиуса пятна теплового потока.

2. ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКИ ОТ ОКСИДНОГО СЛОЯ ПЯТНОМ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

Другим практически интересным процессом является взаимодействие катодных пятен при очистке поверхности металла от оксидного слоя с помощью катодной вакуумной дуги обратной полярности [6] (рис. 11).

Катодные пятна воздействуют селективно на оксидный слой и удаляют его путем испарения (рис. 11, b). Наблюдаемая скорость удаления оксидного слоя возрастает пропорционально току дуги и обратно пропорционально его толщине. Для понимания влияния режимных параметров на процесс удаления оксидной пленки были предложены упрощенные модели [6, 7], основанные на балансе энергии в прикатодном пятне. Для более точного управления процессом поверхностной очистки и прогнозирования остаточной шероховатости на поверхности очищенной от оксида металлической поверхности необходимо развить более адекватные теоретические основы, учитывающие нестационарный сопряженный теплоперенос и фазовые превращения в оксидном слое и металлической подложке при плотностях мощности теплового потока $10^{10}–10^{14}$ Вт/м², характерных для данного процесса.

В этой связи исследовалась модельная задача очистки поверхности основы из нержавеющей стали SUS 430, покрытой оксидным слоем Cr₂O₃ толщиной 5 мкм, с помощью вакуумной дуги.

Известно [7], что при давлении среды 10^5 Па твердый оксид хрома претерпевает плавление при температуре около 2700 К и испаряется при температуре около 3300 К. Однако при давлении 10^2 Па, характерном для очистки поверхности

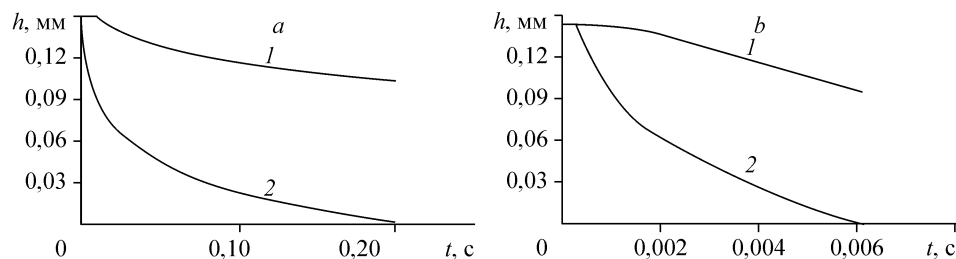


Рис. 10. Динамика координат фронта испарения (1) и плавления (2) на оси $r = 0$ для радиусов воздействия теплового потока $r_s/h = 0,3$ (а) и 2 (b).

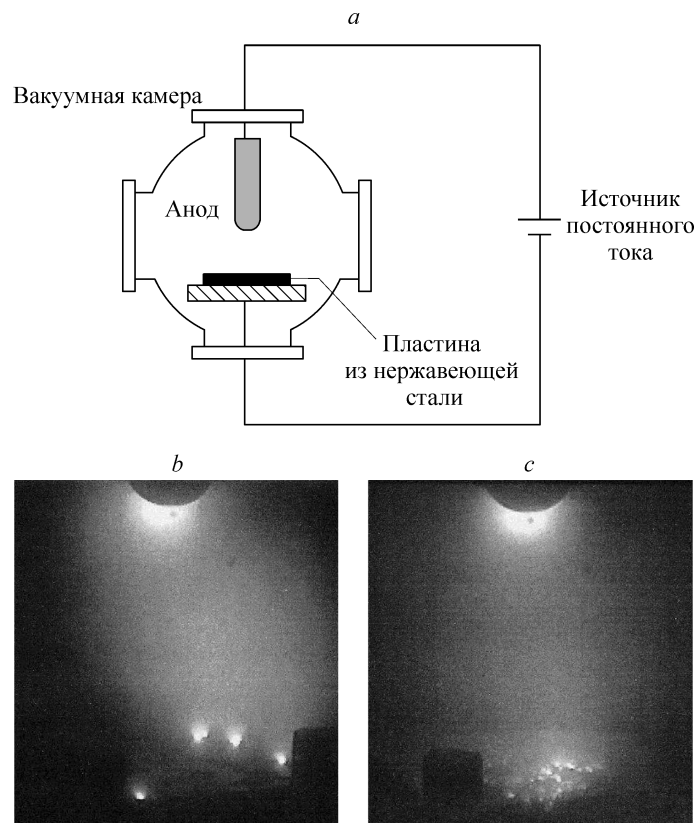


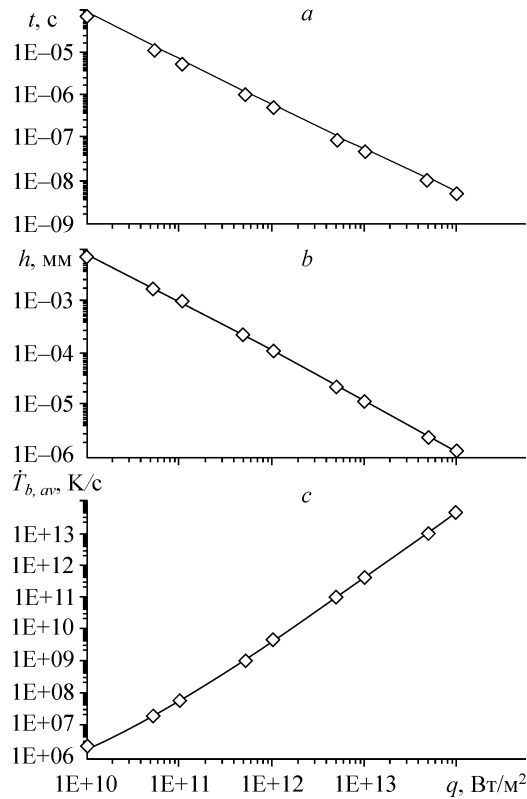
Рис. 11. Принципиальная схема установки (а), катодные пятна вакуумной дуги на поверхности оксидного слоя (b) и на поверхности основного металла (с).

с помощью вакуумной дуги, твердый оксид хрома испаряется без плавления, переходя сразу в газовую фазу уже при температуре $T_e = 2400$ К. Энергия сублимации Cr_2O_3 при указанном давлении, согласно справочным данным, равна $L_e = 1,92 \cdot 10^7$ Дж/кг.

Авторы работы [7], используя упрощенную одномерную модель, не учитывающую сопряженный теплообмен “оксидный слой–подложка” и фазовые превращения в последней, предприняли попытку оценить глубину ее подплавления в момент полного испарения оксидного слоя в широком диапазоне изменения плотности теплового потока в пятне вакуумной дуги. На рис. 12 представлены результаты аналогичного исследования в работе [8], основанного на сформулированной выше модели и методе ее численного исследования. Как и в работе [7], толщина оксидного слоя принята равной $\Delta_f = 5 \cdot 10^{-6}$ м. Используемые теплофизические свойства материалов приведены в табл. 2, а теплота испарения оксида хрома, аналогично цитируемой работе, принималась равной $L_e = 1,92 \cdot 10^7$ Дж/кг.

Радиус пятна дуги принят равным толщине оксидного слоя, т. е. $r_0 = \Delta_f$, а тепловой поток равномерно распределен в пределах пятна. При заданных конкретных условиях расчет завершался, если при $r = 0$ слой оксида полностью испарялся. Необходимо отметить существенное как качественное, так и количественное различие между результатами, полученными в настоящей работе и представленными в работе [7]. Во-первых, показано, что при минимальной плотности мощности теплового потока $q = 10^8$ Вт/м² имеет место подплавление подложки, но испарения оксидного слоя вообще не происходит, в то время как в работе [7] оно имело

Рис. 12. Изменение времени испарения оксидного слоя (а), глубины подплавленного слоя металлической подложки (b) и средней скорости охлаждения микрообъема, образовавшегося расплава (с) под центром пятна дуги в зависимости от плотности мощности теплового потока.



место. Во-вторых, рассчитанные толщины подплавленных слоев в металлической подложке в зависимости от плотности мощности теплового потока существенно меньше, чем в работе [7]. Указанные расхождения объясняются более адекватным описанием одновременно протекающих физических процессов, поскольку в настоящей работе исследуется краевая задача Стефана в полной постановке, а в цитированной публикации решается уравнение теплопереноса с эффективной теплопроводностью, а текущее положение фронта плавления

определяется по изотерме, равной температуре плавления стали. Необходимо отметить некорректность такого подхода и для других практических задач, поскольку при численном решении не учитывается теплота фазового перехода, необходимая для плавления подложки.

На рис. 12 представлены рассчитанные значения времени полного испарения оксидного слоя и толщины подплавленного слоя на оси симметрии задачи в зависимости от плотности мощности теплового потока, которые уточняют данные работы [7].

Как известно [6], в момент полного испарения тонкого слоя оксида, находящегося под пятном дуги, она спонтанно перемещается в новую точку привязки. Следовательно, сразу же после снятия теплового потока начинается охлаждение и затвердевание микрообъема расплава, образовавшегося на поверхности металлической подложки. Представляет интерес оценка скорости охлаждения таких микрообъемов за счет теплоотвода в подложку (режим автозакалки), поскольку она определяет конечную микроструктуру затвердевшего слоя. Согласно [10], текущее значение скорости охлаждения при затвердевании расплава представляется в виде

Таблица 2

Теплофизические свойства нержавеющей стали SUS 430 и оксида хрома

| Материал | ρ , кг/м ³ | c , Дж/кг·К | λ , Вт/м·К | $a = \lambda/\rho c$, м ² /с | T_m , К | T_e , К | L_m , Дж/кг | L_e , Дж/кг |
|--------------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|--|-----------|-----------|-----------------------|----------------------|
| SUS 430 | 7700 | 585 ⁽¹⁾ | 26 | $5,77 \cdot 10^{-6}$ | 1767 | – | 250000 ⁽²⁾ | – |
| Cr ₂ O ₃ | 5210 | 795 | 13,2 | $3,19 \cdot 10^{-6}$ | 2705 | 3280 | $6,9 \cdot 10^{-5}$ | $3,86 \cdot 10^{-6}$ |

⁽¹⁾ — при $T > 1075$ К теплоемкость постоянна и равна данному значению.

⁽²⁾ — принята скрытая теплота плавления чистого железа.

$\dot{T}_b(t) = (\partial T_b / \partial z)_{z=\xi_b+0} (d\xi_b / dt)$, где $(\partial T_b / \partial z)_{z=\xi_b+0}$ — температурный градиент на фронте затвердевания со стороны расплава в момент времени t , $d\xi_b / dt$ — скорость движения фронта затвердевания. Оценку проведем для оси симметрии, где толщина расплава максимальна. Тогда, если t_3 — полное время затвердевания микрообъема, то среднюю скорость его охлаждения можно оценить как [10]

$$\dot{T}_{b,av} = \frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} \dot{T}_b(t) dt = \frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} \left(\frac{\partial T_b}{\partial z} \right)_{z=\xi_b+0} \frac{d\xi_b}{dt} dt.$$

На рис. 12, *c* представлена рассчитанная средняя скорость охлаждения при затвердевании микрообъемов расплава, образовавшихся в течение времени испарения оксидного слоя в зависимости от плотности мощности теплового потока. Как видно, скорость охлаждения может изменяться в довольно широком диапазоне (примерно от 10^6 до 10^{13} К/с). Следовательно, закаленные поверхностные микрообъемы подложки после полной очистки от оксидного слоя могут иметь структуру от микрокристаллической до аморфной.

Представляет определенный интерес также исследование, при прочих равных условиях, формы кратера, образовавшегося в результате испарения оксидного слоя, и характеристик микрообъема, подплавленного на поверхности металлической подложки, в зависимости от распределения плотности мощности теплового потока в пятне вакуумной дуги. Для этого, наряду с равномерным распределением эффективной удельной мощности теплового потока $q_{eff} = 10^{10}$ Вт/м² при $r \leq r_s$, рассмотрим нормально распределенный удельный поток вида $q(r) = q_0 \exp(-kr^2)$ при $0 \leq r \leq r_s$ и $q(r) = 0$, при $r > r_s$, где q_0 — максимальный удельный тепловой поток в центре пятна дуги, k — коэффициент сосредоточенности теплового потока, характеризующий форму кривой нормального распределения, r — радиальная координата точки, отсчитываемая от центра пятна привязки дуги к поверхности.

Результаты расчетов, выполненных при $q_{eff} = 10^{10}$ Вт/м², $k = 9$, $q_0 = 2,89 \cdot 10^{10}$ Вт/м², $r_s = 1,535$ мкм, приведены на рис. 13. В качестве критерия окончания расчетов принято условие полного испарения оксидного слоя на оси симметрии задачи. Как видно, при прочих равных условиях форма кратеров, образовавшихся

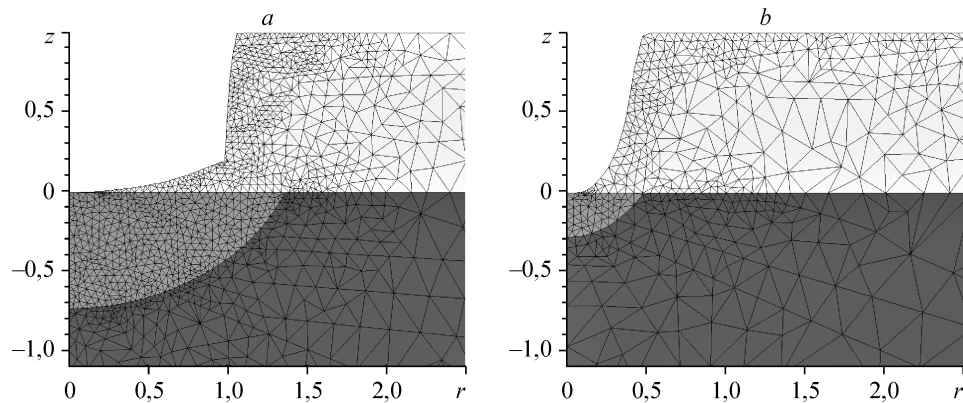


Рис. 13. Влияние распределения плотности мощности теплового потока в пятне вакуумной дуги на форму поверхности испарения оксидного слоя и микрообъем расплава на поверхности металлической подложки: равномерно (*a*) и нормально (*b*) распределенные потоки.

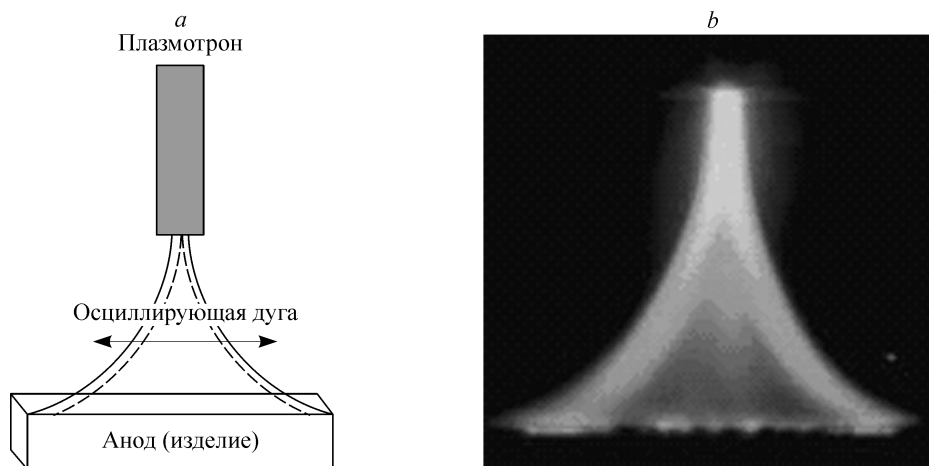


Рис. 14. Схематичное представление дуги, осциллирующей относительно поверхности обрабатываемого изделия (а), фотография дуги, осциллирующей с частотой 60 Гц (б).

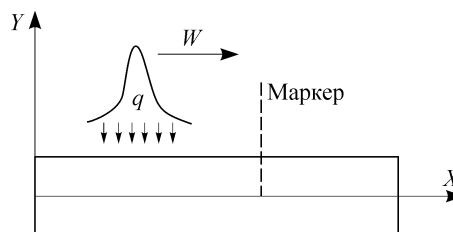
в результате испарения оксидного слоя, в основном, наследует форму распределения тепловых потоков. При этом более сосредоточенный тепловой поток, при заданном параметре распределения k , приводит к проплавлению существенно меньшего микрообъема металлической подложки, что объясняется существенно меньшим временем испарения.

3. ДВИЖУЩИЙСЯ ЛИНЕЙНЫЙ ТЕПЛОВОЙ ИСТОЧНИК КОНЕЧНОЙ ШИРИНЫ

Если достаточно медленное поступательное движение пятна КПЭ одновременно совершается с достаточно быстрыми периодическими поперечными колебаниями относительно его среднего положения, то представляется возможным ввести в рассмотрение некоторый эффективный линейный поверхностный источник тепла, движущийся поступательно с той же скоростью (рис. 14). Подобная задача возникает, например, при нагреве поверхности изделия, движущегося относительно плазмотрона с некоторой скоростью W , анодным пятном осциллирующей в поперечном направлении под действием переменного внешнего магнитного поля вынесенной дуги [11].

В качестве иллюстрации была выполнена серия расчетов для исследования воздействия движущегося линейного источника с нормальным в его поперечном сечении распределением плотности мощности теплового потока на покрытие из нержавеющей стали толщиной 150 мкм, напыленное на подложку из никеля. В расчетах варьировалась скорость движения источника и плотность мощности теплового потока. Ширина пятна воздействия r_s составляла 750 мкм. Однородное в направлении оси z пятно теплового потока с заданной скоростью W перемещалось слева направо. На оси X фиксировалась точка (маркер), для которой контролировались значения температуры, глубины плавления и испарения материала покрытия (рис. 15).

Рис. 15. Схематичное представление нормально распределенного, однородного вдоль оси z , теплового потока конечной ширины, движущегося относительно фиксированной контрольной точки (маркера) на поверхности основы.



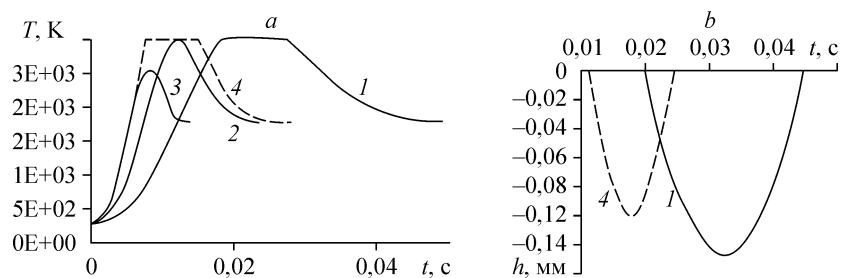


Рис. 16. Зависимость температуры (а), глубины испарения подложки (б) в контрольной точке от времени для различных скоростей W движения теплового источника: 50 (1), 100 (2, 4), 150 (3) м/с и эффективной плотности мощности q_{eff} теплового потока: $5 \cdot 10^8$ (1, 2, 3), 10^9 (4) Вт/м².

Зависимость температуры и глубины испарения покрытия в контрольной точке от времени при различных скоростях движения теплового источника представлены на рис. 16. На рис. 17 показана серия иллюстраций, соответствующих различным моментам времени расчета при скорости движения теплового источника $W = 100$ м/сек и плотности мощности теплового потока $q_{eff} = 10^9$ Вт/м². Для каждого момента времени приведены: положение теплового источника, конфигурация расчетной области, распределение температуры в покрытии и подложке, а также конфигурация кратера, образующегося в результате испарения материала покрытия.

ВЫВОДЫ

По результатам настоящей работы можно сделать следующие выводы:

1) разработана вычислительная процедура на основе метода конечных элементов и соответствующее программное обеспечение для моделирования достаточно широкого класса задач нестационарного сопряженного кондуктивного теплообмена и фазовых превращений (поверхностное испарение, плавление и затвердевание) при обработке покрытий и поверхностных слоев высококонцентрированными потоками энергии со стационарным, импульсным и подвижным пятном нагрева;

2) выполнен цикл модельных вычислительных экспериментов, позволивший:

- исследовать диапазоны плотностей мощности КПЭ, для которых реализуются различные сценарии обработки двухкомпонентных (Ni-Al) поверхностных слоев, осажденных с помощью холодного газодинамического напыления,

- исследовать динамику плавления и степень испарения покрытия из нержавеющей стали заданной толщины, напыленного на подложку из никеля, при различных плотностях мощности и размерах пятна приложения стационарного и импульсного тепловых потоков,

- провести сравнение времен и энергий, необходимых для полного расплавления покрытия, а также глубины теплового воздействия в подложку в зависимости от плотности мощности теплового потока,

- оценить влияние степени неоднородности теплового потока в пятне воздействия на форму поверхности испарения и плавления в момент достижения фронтом плавления поверхности подложки на оси симметрии,

- исследовать испарение поверхностного оксидного слоя при одновременном подплавлении микрообъема подложки под пятном привязки вакуумной дуги и его последующем охлаждении и затвердевании, что представляется важным для адекватного описания теплофизических процессов и прогнозирования состояния поверхности металлической подложки после ее очистки от оксидного слоя,

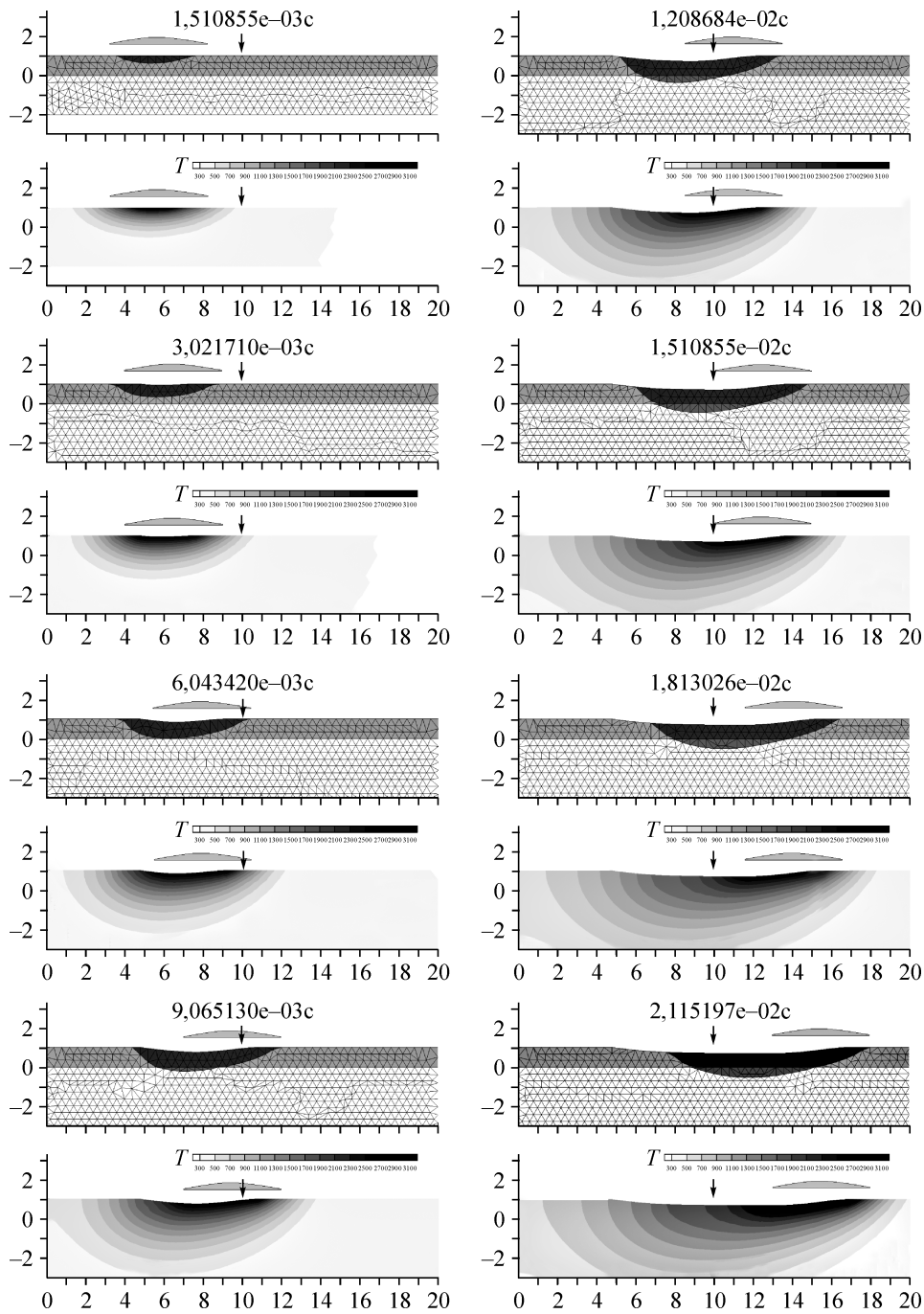


Рис. 17. Иллюстрация расчета $W = 100$ м/с, $q_{eff} = 10^9$. Конфигурация расчетной области и распределение температуры.

– проиллюстрировать применимость разработанной вычислительной технологии для моделирования обработки поверхности движущимся линейным источником тепла, что позволяет оптимизировать процесс нагрева изделий движущимся поступательно анодным пятном быстро осциллирующей в поперечном направлении вынесенной дуги.

Полученные данные могут представлять интерес для понимания процессов, происходящих при поверхностной обработке покрытий и материалов высококонцентрированными потоками энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **О.П.Солоненко, А.П.Алхимов, В.В.Марусин и др.** Высокоэнергетические процессы обработки материалов. — Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. — 425 с.
2. **Варавка В.Н., Бровер Г.И., Магомедов М.Г., Бровер А.В.** Теплофизические особенности процесса импульсной лазерной обработки инструментальных сталей // Вестник Дальневосточного гос. технич. университета. — 2001. — Т. 1, № 1(7). — С. 56–63.
3. **Бровер Г.И., Магомедов М.Г., Бровер А.В., Холодова С.Н., Сидоркина Н.М.** О роли массопереноса в создании структурной картины при импульсной лазерной обработке // Вестник ДГТУ. — 2001. — Т. 1, № 2(8). — С. 42–49.
4. **Ivanov Y.F., Rotshtein V.P., Proskurovsky D.I., Orlov P.V., Polestchenko K.N., Ozur G.E., Goncharenko I.M.** Pulsed electron-beam treatment of WC-TiC-Co hard-alloy cutting tools: wear resistance and microstructural evolution // Surface and coating technology. — 2000. — Vol. 125. — P. 255–256.
5. **Klimenov V.A., Kovalevskaya Zh.G., Eroshenko A.Yu.** Examination of the thermal effect of electron beam on a coating substrate composite // Welding International. — 2002. — Vol. 16, No. 11. — P. 899–902.
6. **Takeda K., Takeuchi S.** Removal of oxide layer on metal surface by vacuum arc. // Materials Transactions, JIM. — 1997. — Vol. 38, No.7. — P. 636–642.
7. **Takeda K., Takeuchi S.** Effects of pressure on the cleaning action of cathode spot in low vacuum // Thin Solid Films. — 2002. — No. 407. — P. 85–90.
8. **Takeda K., Solonenko O.P., Golovin A.A.** Theoretical analysis and computer simulation of thermophysical processes under removal of oxide layer on metal surface by a vacuum arc. // Proc. of the 16th Symp. on Plasma Chemistry, Taormina, Italy, 2003 (Electronic publication).
9. **Головин А.А., Солоненко О.П.** Нестационарный сопряженный теплообмен и фазовые превращения при высокоэнергетической обработке поверхности. Ч. 1. Вычислительный метод. // Теплофизика и аэромеханика, 2007. — Т. 14, № 3. — С. 413–428.
10. **Chalmers B.** Solidification // American Society Materials. Metals Park. — Ohio. — 1971.
11. **Yamamoto T., Takeda K., Toh T., Tanaka J.** Production of broad arc by alternating magnetic field // Abstracts. of 7th Intern. Conf. on Thermal Plasma Processes. — Saint-Petersburg, 2003.

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2007 г.