

На правах рукописи



Бледнов Виталий Александрович

**РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТОЙ
СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск - 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской Академии наук
Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения РАН

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Солоненко Олег Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Левин Владимир Евгеньевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Терехов Виктор Иванович

Ведущая организация: Учреждение Российской Академии наук
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения РАН, г. Томск

Защита состоится «24» ноября 2011 года в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр.К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «17» октября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чубич В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В современных условиях развития техники и машиностроения проблема коренного улучшения качества материалов и изделий, повышение их ресурса и эксплуатационных характеристик становится особенно актуальной. Данная проблема в большинстве случаев решается путем нанесения многофункциональных, в том числе защитных покрытий из порошков металлов, например в технологии плазменного напыления. Сущность процесса плазменного напыления заключается в том, что высокотемпературная плазменная струя, в которую подаётся распыляемый металл в виде порошка, направляется на обрабатываемую поверхность (основу, подложку). Частицы порошка в процессе быстрого нагревания превращаются в капли расплава и, деформируясь при соударении с обрабатываемой поверхностью, слой за слоем формируют покрытие.

При проектировании покрытий из порошков металлов или сплавов с заданными свойствами использование проблемно-ориентированных программных комплексов позволяет прогнозировать свойства покрытий без проведения большого объема физических экспериментов, что существенно ускоряет разработку технологии и удешевляет производство.

В диссертации развит подход к моделированию формирования слоистой структуры плазменных покрытий путем послойной укладки отдельных сплэтов (затвердевших на поверхности капель расплава) с последующим расчетом функциональных характеристик покрытия (пористость, шероховатость, относительная прочность связи с подложкой). Реализация такого подхода представляется *актуальной*, поскольку проведение физического эксперимента крайне затруднено вследствие высокой стоимости и большого числа комбинаций параметров, что затрудняет поиск оптимальных режимов напыления покрытий.

Для получения покрытий с заданными свойствами, необходимо определить соответствующие им ключевые физические параметры (КФП) системы «частица-основа», такие как температура частиц T_{p0} и основы T_{b0} , скорость u_{p0} и размеры частиц D_p , а также выбрать вид напыляемого порошкового материала и подложки. Поэтому задача определения теоретических или эмпирических зависимостей, характеризующих толщину и диаметр сплэтов в заданном диапазоне КФП, является первичной по отношению к моделированию покрытия, а, следовательно, также *актуальной*.

Известно большое количество работ, посвященных детальному математическому моделированию процесса формирования одиночного сплэта, требующего расчета трехмерной нестационарной краевой задачи со свободной границей для уравнений Навье-Стокса совместно с уравнениями сопряженного конвективно-кондуктивного теплообмена и фазовых превращений в растекающейся частице, а в ряде случаев – и в подложке. Такие известные программные комплексы, как ANSYS/FLUENT, FLOW-3D, LS-DYNA, ABAQUS позволяют

моделировать формирование одиночного сплэта, при этом время моделирования составляет порядка 1 часа и более. Моделирование формирования всего покрытия с использованием таких комплексов требует больших вычислительных затрат, поскольку при этом необходимо выполнять расчет десятков или сотен тысяч капель, соударяющихся с подложкой и напыляемым покрытием. Следовательно, в настоящее время такой подход носит скорее теоретический, нежели практический интерес.

С учетом отмеченных сложностей, целесообразно в основу математического моделирования процесса формирования слоистой структуры покрытий положить упрощенную модель сплэта, например, в виде цилиндра, толщина и диаметр которого рассчитываются с использованием экспериментально апробированных теоретических решений. Следующим принципиальным моментом является разработка эффективного алгоритма укладки сплэта на поверхность с изменяемым при напылении рельефом. Программный комплекс должен включать в себя как подсистему проектирования сплэта, удовлетворяющего требуемым характеристикам в заданном пространстве КФП с учетом свойств используемых материалов частиц и подложки, хранящихся в справочной базе данных, так и подсистему формирования собственно покрытия, реализующую алгоритм последовательной стохастической укладки сплэтов на напыляемую поверхность с изменяемым рельефом при напылении. В составе комплекса должен быть вычислительный модуль для определения характеристик покрытия (шероховатость, пористость, прочность связи с подложкой и т.п.).

Следовательно, разработка вычислительной технологии для математического имитационного моделирования процесса формирования слоистой структуры плазменных покрытий из порошков металлов и определения их функциональных характеристик является *актуальной* темой исследования.

Целью работы является создание вычислительной технологии, обеспечивающей на основе экспериментально апробированных теоретических решений предварительное проектирование физически реализуемых при напылении сплэтов и последующее математическое имитационное моделирование процесса формирования слоистой структуры плазменных металлических порошковых покрытий с расчетом и анализом их функциональных характеристик.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Разработать на основе экспериментально апробированных теоретических модельных решений численную методику для поиска областей КФП, обеспечивающих получение сплэтов с заданными значениями физических характеристик.

2. Разработать эффективный алгоритм моделирования процесса укладки сплэта на поверхность с произвольным рельефом при моделировании покрытия, основанный на последовательной стохастической укладке отдельных сплэтов на обрабатываемую поверхность.

3. Создать на основе разработанных алгоритмов программный комплекс, позволяющий осуществлять:

- подбор КФП для получения сплэтов с заданными характеристиками при напылении плазменных покрытий из порошков металлов;
- последующее моделирование процесса формирования слоистой структуры плазменных покрытий из порошков металлов;
- расчет и анализ функциональных характеристик покрытий заданной толщины, полученных в результате математического моделирования, а также наглядное 2D и 3D отображение результатов расчета.

4. Апробировать разработанную вычислительную технологию с целью проверки ее на адекватность реальному процессу напыления покрытий.

Методами исследования являются: численные методы, методы математического моделирования, методы теории вероятностей и математической статистики, методики визуализации 3-х мерной графики и методы обработки изображений, сопоставление результатов вычислительных экспериментов с известными опытными данными.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые, на основе экспериментально апробированных модельных теоретических решений, разработана эффективная численная методика, не имеющая аналогов для поиска областей КФП, обеспечивающих проектирование сплэтов с заданными характеристиками при плазменном напылении (для отработки технологии плазменного напыления).

2. Разработан эффективный алгоритм для имитационного математического моделирования последовательной укладки металлических сплэтов на поверхность с произвольным рельефом при моделировании покрытия, основанный на оригинальных (новых) процедурах: генерации шаблона узловых точек основания сплэта; формирования опорного массива вершин посредством анализа рельефа поверхности; распознавания и заливки углублений на поверхности основы в контактных зонах с ядром сплэта и его периферийной кольцевой частью; а также на численном методе сплайн-сглаживания поверхности основания сплэта.

3. На основе развитого подхода и разработанных алгоритмов реализован оригинальный проблемно-ориентированный комплекс программ, позволяющий осуществлять: а) предварительное проектирование сплэтов с заданными характеристиками при плазменном напылении; б) моделирование формирования слоистой структуры плазменных покрытий из порошков металлов; в) расчет функциональных характеристик покрытий, полученных в результате их моделирования, а также наглядное отображение результатов моделирования в виде 2D - и 3D - иллюстраций.

4. С помощью разработанной современной технологии математического моделирования и выполнения серии вычислительных экспериментов впервые было проведено комплексное исследование влияния отдельных КФП на харак-

теристики покрытий, получаемых методом плазменного нанесения покрытий, в частности напыление частиц никеля на медную подложку.

Практическая ценность. С помощью разработанных вычислительных алгоритмов реализован программный комплекс, позволяющий: а) исследовать зависимости важнейших характеристик сплэта от значений КФП, а также определять пространство КФП, для которого полученные сплэты удовлетворяют заданным требованиям; б) осуществлять моделирование укладки отдельного сплэта на поверхность основы с произвольным рельефом, а также моделирование покрытия, состоящего из большого числа сплэтов, и анализировать функциональные характеристики полученных покрытий; в) отображать результаты моделирования в виде 2D- и 3D - иллюстраций;

Разработанный программный комплекс и полученные с его помощью расчетные данные могут представлять практический интерес при проектировании, отработке и оптимизации газотермических и, прежде всего, плазменных покрытий из порошков металлов, что позволяет существенно уменьшить объем физических и технологических экспериментов при отработке и оптимизации конкретных технологий нанесения покрытий.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Численная методика, позволяющая на основе экспериментально апробированных модельных теоретических решений определять области КФП, обеспечивающих проектирование металлических сплэтов с заданными характеристиками при плазменном напылении (для отработки технологии плазменного напыления).

2. Эффективный алгоритм математического моделирования последовательной стохастической укладки сплэтов на поверхность с произвольно заданным и изменяемым в процессе моделирования покрытия рельефом, основанный на оригинальных (новых) процедурах: генерации шаблона узловых точек основания сплэта; формирования опорного массива вершин посредством анализа рельефа поверхности; распознавания и заливки углублений на поверхности основы в контактных зонах с ядром сплэта и его периферийной кольцевой частью; а также на численном методе сплайн-сглаживания поверхности основания сплэта.

3. Проблемно-ориентированный программный комплекс, позволяющий осуществлять: а) предварительное проектирование сплэтов с заданными характеристиками при плазменном напылении; б) моделирование формирования слоистой структуры плазменных покрытий из порошков металлов; в) расчет функциональных характеристик покрытий, полученных в результате их моделирования, а также наглядное отображение результатов моделирования в виде 2D - и 3D - иллюстраций.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием экспериментально апробированных зависимостей, характеризующих параметры сплэта, широко используемых вычислительных процедур (сплайн-

аппроксимация, генерация случайных чисел, дискретизация пространства и т.д.), тестированием разработанной вычислительной технологии на модельных задачах и известных опытных данных, а также сходимостью результатов моделирования при измельчении расчетной области.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на III Всероссийской конференции “Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине” (16-20 марта 2009 г., Новосибирск), на X Всероссийской научно-технической конференции “Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий” (20-26 июля 2009, Улан-Удэ), на Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (7-11 сентября 2009 г., Томск), на Международной научно-практической конференции “Суперкомпьютеры: вычислительные и информационные технологии” (30 июня – 2 июля 2010 г., Хабаровск), на XI Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (26-27 октября 2010 г., Красноярск), на IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием “Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2010)” (19-20 ноября 2010 г., Анжеро-Судженск), на Региональной научно-практической конференции “Многоядерные процессоры и параллельное программирование” (25 февраля 2011 г., Барнаул), на IV Всероссийской конференции “Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине” (22-25 марта 2011 г., Новосибирск), на X Международной конференции “Пленки и покрытия – 2011” (31 мая – 3 июня 2011 г. Санкт-Петербург).

Основные результаты диссертационной работы получены в рамках планов НИР ИТПМ СО РАН (Программа 6.5 “Механика гетерогенных сред и нанотехнологии”, Проект 6.5.2 “Физико-химические основы формирования регулируемой микро– и наноструктуры при создании перспективных порошковых материалов, комбинированных покрытий и упрочненных поверхностных слоев”, Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН №1 “Научные основы создания многослойных наноструктурных покрытий и интерфейсов в гетерогенных материалах для работы в полях экстремальных внешних воздействий” (раздел “Сквозное компьютерное моделирование процесса плазменного напыления и обработки покрытий”), а также гранта РФФИ №09-01-00433-а.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 3 статьях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, и в материалах 7 всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Полный объем составляет 212 страниц, включая 5 таблиц и 89 рисунков. Список использованной литературы содержит 77 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, сформулированы цель и задачи исследований, их научная новизна, обоснованы научная новизна и практическая значимость результатов работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведена краткая характеристика работы.

В первой главе произведен аналитический обзор, отражающий текущее состояние проблемы исследования возможности получения сплэтов с заданными характеристиками и проблемы моделирования формирования слоистой структуры плазменных покрытий, напыляемых из порошков металлов.

Подраздел 1.1 посвящен перспективной и уже широко используемой в промышленности технологии плазменного нанесения покрытий, позволяющей получать материалы с улучшенными характеристиками. На сегодняшний момент, процесс плазменного напыления изучается преимущественно экспериментальным способом, который оказывается крайне дорогостоящим и сопряжен с экстремальными условиями его протекания (высокие скорости охлаждения частиц, – до 10^7 К/с и более, и аномально высокие плотности мощности локальных тепловых потоков, – до 10^7 Вт/м² и выше). Поэтому предлагается исследовать формирование покрытий методами математического моделирования. Особое внимание уделяется идее создания универсального проблемно-ориентированного программного комплекса для математического моделирования всех стадий процесса плазменного напыления, в котором одну из ключевых ролей играет подсистема формирования напыляемого покрытия.

В подразделе 1.2 приводится обзор методов прямого моделирования формирования сплэта на напыляемой поверхности, основанных на численном решении систем уравнений Навье-Стокса, в результате которых удастся предсказать растекание и затвердевание капли на подложке. Кроме того, данные методы в сочетании с методом «конечных объемов» лежат в основе универсальных коммерческих пакетов, позволяющих моделировать широкий класс гидродинамических процессов. В конце раздела делается вывод о нецелесообразности использования в настоящее время таких пакетов для моделирования покрытий ввиду повышенной требовательности к вычислительным ресурсам.

В подразделе 1.3 приводится обзор методов стохастической укладки сплэтов, основанных на методе Монте-Карло. Данные методы менее требовательны к вычислительным ресурсам, однако в недостаточной степени учитывают физические особенности формирования сплэта при растекании и затвердевании капли расплава на поверхности с изменяющимся рельефом в процессе напыления.

В конце первой главы по результатам анализа научных публикаций, посвященных методам моделирования формирования отдельных сплэтов и структуры плазменных порошковых металлических покрытий, сформулированы выводы. А также, предлагается разработать и реализовать собственный подход к

моделированию покрытия с использованием метода Монте-Карло, который бы более точно учитывал рельеф поверхности, использовал алгоритмы распознавания и заливки углублений на поверхности основы и определял угол затекания в них капли расплава, и тем самым более корректно моделировал форму сплэта.

Во второй главе изложены теоретические основы расчета параметров сплэта на основе упрощенной теоретической модели. На основе приведенных зависимостей реализуется и тестируется подсистема комплекса «СПЛЭТ».

В подразделе 2.1 излагаются теоретические основы формирования сплэтов при соударении капли металлического расплава с подложкой и численная методика, которая позволяет определять область возможных значений КФП, внутри которой имеется возможность обеспечить выполнение определенных требований (из определенного их перечня) к параметрам сплэтов.

При отработке технологий газотермического напыления (ГТН) покрытий необходимо исходить из требований обеспечения заданных характеристик сплэта, поэтому задача определения зависимостей этих характеристик от исходных значений КФП является первичной. Согласно выбранной модели взаимодействие “капля расплава – основа” реализуется по одному из четырех базовых сценариев, в зависимости от соотношения температуры, устанавливающейся в контакте T_c , и температурами плавления материалов частицы T_{pm} и подложки T_{bm} (рис. 1): (1) – растекание и одновременное затвердевание частицы на твердой подложке, и последующее охлаждение сплэта; (2) – растекание, одновременное затвердевание капли и подплавление подложки в пятне контакта ее с частицей с последующим затвердеванием подплавленного слоя и охлаждением системы сплэт - основа; (3) – полное растекание капли на твердой основе и последующее охлаждение и затвердевание слоя расплава с одновременным его сворачиванием под действием сил поверхностного натяжения; (4) – полное растекание капли с одновременным подплавлением основы, последующее охлаждение и затвердевание растекшейся капли и образовавшегося приповерхностного слоя расплава, завершающееся остыванием системы сплэт – подложка.

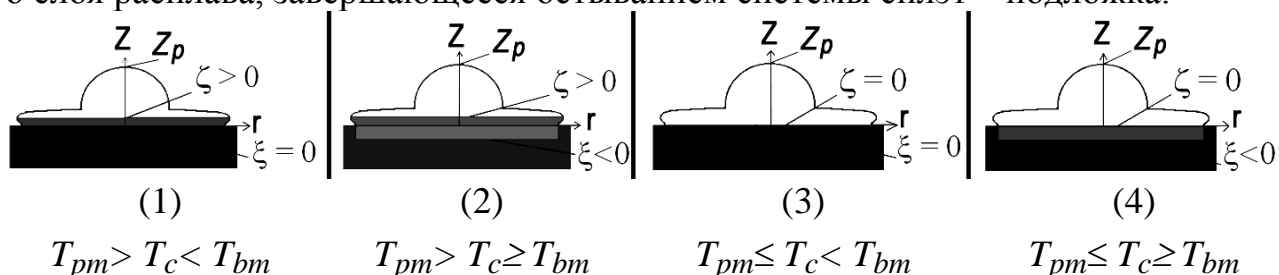


Рис. 1. Базовые сценарии формирования сплэтов при ГТН

На рис. 1 приняты обозначения: ζ , ξ , z_p – текущие координаты фронта затвердевания в растекающейся капле, фронта плавления основы и вершины деформирующейся частицы; ϑ_c , ϑ_{bm} – безразмерные температуры в контакте частица – основа и плавления материала основы; $\vartheta = T/T_{pm}$.

Полученные решения, характеризующие безразмерную толщину $\bar{h}_s = h_s / D_p$ и диаметр $\bar{D}_s = D_s / D_p$ сплэта, а также безразмерную толщину подплавленного приповерхностного слоя основы $\bar{h}_b = h_b / D_p$, в общем виде представляются как $\bar{h}_s = c_\zeta \sqrt{Fo^*} \cong 1 - Re \cdot Fo^*$, $\bar{D}_s = \sqrt{2/(3\bar{h}_s)}$, $\bar{h}_b = c_\xi \sqrt{Fo^*}$, где $Fo^* = \left[c_\zeta (\sqrt{1 + 4Pe/c_\zeta^2} - 1) / 2Pe \right]^2$ – безразмерное время встречи фронта затвердевания расплава с вершиной растекающейся капли; $Pe = u_{p0} D_{p0} / a_{pm}^{(l)}$ – число Пекле. Значения коэффициентов c_ζ и c_ξ , определяющих динамику затвердевания расплава и возможного подплавления подложки в пятне контакта ее с частицей, а также безразмерная температура в контакте \mathcal{G}_c , отвечают конкретному сценарию формирования сплэта. Формулы для вычисления толщины и диаметра сплэта при наиболее распространенном сценарии 1 представлены ниже:

$$c_\zeta = P[\sqrt{1 + 4Q/P^2} - 1]/2, \quad c_\xi = 0,$$

$$P = \frac{\pi \lambda_{p,p}^{(s,l)} Ku_p^{(l)} + 2(1 + \alpha_c) K_\varepsilon^{(b,p)} (\mathcal{G}_{p0} - 1)}{\sqrt{\pi} K_\varepsilon^{(b,p)} Ku_p^{(l)}},$$

$$Q = \frac{2\lambda_{p,p}^{(s,l)} (1 - \mathcal{G}_{b0})}{Ku_p^{(l)}} \cdot \left[1 - \frac{(1 + \alpha_c)(\mathcal{G}_{p0} - 1)}{(1 - \mathcal{G}_{b0}) K_\varepsilon^{(b,p)}} \right], \text{ где } Fo = a_{pm}^{(l)} / D_p^2 \text{ – критерий Фурье;}$$

$Ku_p^{(l)} = L_{pm} / [c_{pm}^{(l)} T_{pm}]$ – критерий фазового перехода Стефана-Кутателадзе; $K_\varepsilon^{(b,p)} = (\lambda_{bm}^{(s)} / \lambda_{pm}^{(l)}) \sqrt{a_{pm}^{(l)} / a_{bm}^{(s)}}$ – критерий тепловой активности

материала основы к расплаву частицы; $\lambda_{p,p}^{(s,l)} = \lambda_{pm}^{(s)} / \lambda_{pm}^{(l)}$, $S_{p,b} = L_{pm} / L_{bm}$; L_{pm} , L_{bm} – скрытая теплота плавления материалов частицы и основы; a – температуропроводность; c – удельная теплоемкость; λ – теплопроводность. Верхние индексы "s", "l" переменных отвечают твердому и жидкому состояниям материала, в то время как нижние индексы "p", "b" – частице и основе. Дополнительный нижний индекс "m" характеризует соответствующее свойство материала при его температуре плавления; коэффициент $\alpha_c \cong 0.26$ определяет относительный вклад конвекции расплава в окрестности точки торможения в сравнении с кондуктивным теплообменом между растекающейся частицей и основой.

В подразделе 2.2 приводятся зависимости для нахождения размеров (диаметра и толщины) сплэта при определенных значениях КФП и анализ чувствительности размеров сплэта к флуктуациям КФП.

Подраздел 2.3 посвящен изложению теоретических основ для проверки требований, предъявляемых к сплэту. Каждое требование выражается посредством неравенств, полученных аналитическим способом.

Подраздел 2.4 посвящен описанию программной реализации подсистемы «СПЛЭТ», обеспечивающей нахождение усеченного фазового пространства допустимых значений КФП последовательным удовлетворением ограничениям. Рассмотрены следующие виды ограничений: геометрические (на размеры сплэтов), время-температурные (на время и температуру при формировании сплэта), технологические (на относительную прочность связи сплэта с подложкой).

Пользователь с помощью меню выбирает из набора КФП те параметры, которые будут определять базисные переменные фазового пространства и для них устанавливает минимальные и максимальные значения, а затем выбирает требуемые ограничения. Алгоритм вложенными циклами выполняет последовательный перебор всех точек выбранного трехмерного фазового пространства КФП и проверяет их на соответствие очередному выбранному ограничению: если соответствие достигнуто, тогда в трехмерном массиве m_cube для текущей точки ее логическая переменная принимает значение «Истина», иначе – значение «Ложь» (происходит сужение фазового пространства КФП, рис. 2).

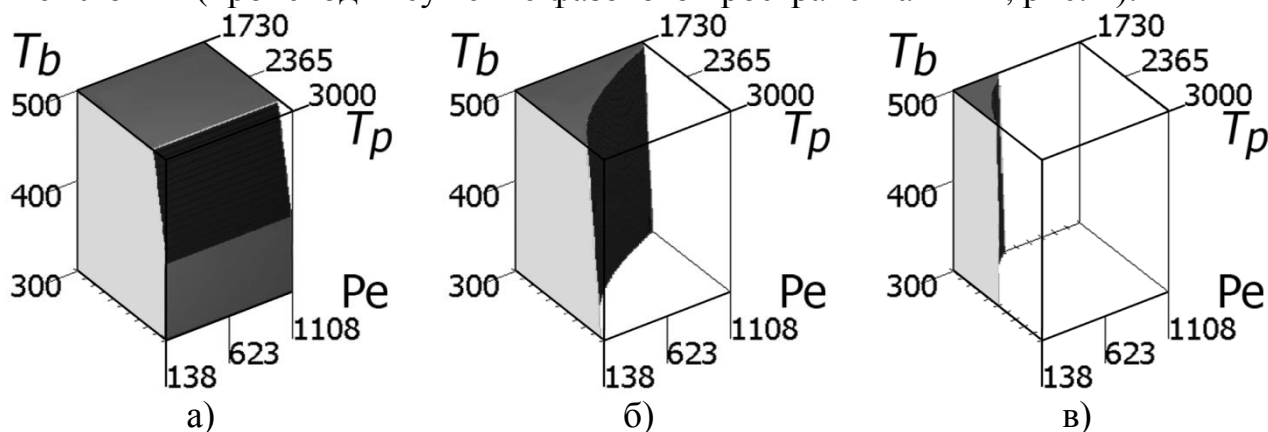


Рис. 2. Сужение пространства КФП применением ограничений: а) первого базового сценария; б) – дополнительного ограничения на безразмерную толщину сплэта $\bar{h}_s > 0.05$; в) – дополнительного ограничения на контактную температуру

$T_c > 1300\text{K}$. Частицы никеля напыляются на подложку из меди. Температуры частиц: $T_{pmin} = 1730\text{ K}$, $T_{pmax} = 3000\text{ K}$. Диапазон скоростей частиц: $u_{pmin} = 50\text{ м/с}$, $u_{pmax} = 200\text{ м/с}$. Диапазон диаметров частиц: $D_{pmin} = 40\text{ мкм}$, $D_{pmax} = 80\text{ мкм}$. Диапазон температур подложки: $D_{bmin} = 300\text{K}$, $D_{bmax} = 500\text{K}$

В подразделе 2.5 приводятся результаты вычислительных экспериментов в виде 3D изображений усечения фазового пространства КФП при последовательном наложении ограничений на КФП частиц никеля, напыляемых на медную подложку, и графики зависимости одного выбранного параметра из КФП от изменения другого выбранного КФП.

Третья глава посвящена разработке подсистемы «ПОКРЫТИЕ», предназначенной для моделирования формирования слоистой структуры плазменных порошковых покрытий, на основе предлагаемого в работе общего алгоритма укладки одиночных сплэтов на поверхность с постоянно изменяемым рельефом в процессе их укладки. В главе описана программная реализация подсистемы и проблемно-ориентированного программного комплекса, а также приведены результаты апробации программного комплекса по имитационному моделированию покрытий, полученные сравнением их рассчитанных функциональных характеристик с аналогичными данными из научных публикаций.

В подразделе 3.1 излагается концепция подхода к математическому моделированию процесса формирования покрытия методом последовательной стохастической укладки сплэтов на поверхность. Процесс напыления покрытия рассматривается как процесс последовательного соударения капель расплава с поверхностью, сопровождающегося формированием и закреплением на поверхности друг за другом сплэтов (splat by splat) с учетом изменения ее рельефа. Расчет параметров сплэта производится на основе упрощенной апробированной теоретической модели (раздел 2.1) в отличие от методов прямого моделирования формирования сплэта на напыляемой поверхности (с использованием систем уравнений Навье-Стокса), требующих больших временных затрат.

В подразделе 3.2 рассматривается общий алгоритм укладки одиночного сплэта, размеры которого рассчитываются на основе вероятностных распределений КФП. В алгоритме учитывается изменение рельефа поверхности в процессе укладки сплэтов. Моделирование укладки одиночного сплэта (и всего покрытия) ведется на дискретной прямоугольной сетке в плоскости XU с постоянным шагом $d_x=d_y$ (Z -координаты остаются непрерывными).

В работе используется модель сплэта в виде цилиндра (тонкого диска) с диаметром D_s и много меньшей высотой h_s с двумя частями: центральная часть – ядро сплэта (цилиндр высотой h_s и диаметром $D_o=k D_p$, где $k=1,0\div 1,3$) и периферийная кольцевая часть (кольцо толщиной h_s с диаметрами D_o и D_s).

В подпункте 3.2.1 описывается *первый подготовительный этап* алгоритма укладки сплэта – алгоритм распознавания и заливки углублений на поверхности в контактной зоне с ядром сплэта, имитирующий процесс заливки каплей расплава углублений на поверхности в зоне контакта с ядром сплэта (растеканием оставшегося объема капли на результирующей поверхности моделируется сплэт в виде диска). Идея алгоритма состоит в последовательном подъеме уровня заливки углублений до тех пор, пока не начнется вытекание жидкости за границу зоны контакта с ядром сплэта.

В подпункте 3.2.2 излагается *второй этап* алгоритма укладки сплэта – *волновой* алгоритм сканирования напыляемой поверхности с учетом ее рельефа для подготовки массива опорных вершин, которые в последующем используются алгоритмом для сплайн-аппроксимации поверхностей оснований сплэта.

Алгоритм учитывает особенности растекания капли вдоль шероховатой поверхности за пределами ядра в периферийной части сплэта, которая может иметь углубления, в некоторые из которых расплав капли может и не затечь, образуя поры. Образование пор в периферийной зоне объясняется отсутствием вдоль поверхности «высоких» препятствий, на которые жидкость капли не настекает, и высокой радиальной компонентой скорости растекания, которая значительно выше направленной к основе нормальной компоненты.

Процедура последовательного оценивания Z -координат опорных вершин для периферийного кольца сплэта учитывает физический аспект растекания капли на поверхности в виде «цилиндрической» волны, проекция которой на плоскость XU представлена в виде «шаблона узловых точек (ШУТ)», иначе говоря, проекции сплэта на плоскость XU (рис. 3).

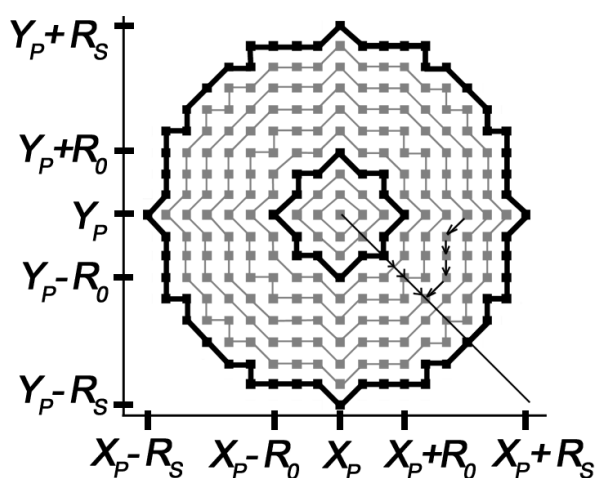


Рис. 3. Графическая схема волнового алгоритма с использованием ШУТ

ШУТ используется для позиционирования сплэта на поверхности моделируемого покрытия в процессе его укладки, а порядок сканирования опорных вершин производится обходом по часовой стрелке ломаной кривой ШУТ (рис. 3), являющейся дискретным представлением дуги окружности – текущего состояния границы фронта этой волны (радиусы изменяются от 0 и до максимального значения R_S). Сканирование начинается с радиуса R_0 и заканчивается окружностью радиуса R_S , при этом оценивание Z -координаты текущей вершины ведется исходя из координат преды-

дущих вершин выделенного радиального направления (рис. 3). Непосредственно оценивание текущей Z -координаты опорной вершины можно пояснить рис. 4, который отображает в виде «жирной» кривой линии профиль напыляемой поверхности вдоль выделенного радиального направления. На рис. 4 точка А соответствует лобовой точке столкновения, с которой совмещен центр сплэта. Независимо от рельефа шероховатости в зоне напыляемой поверхности, которую покрывает ядро сплэта (на рис. 4 от точки А до В), за счет большого напорного давления в результате соударения капли с поверхностью будет образован затвердевший слой сплэта без пор (т.е. в опорный массив войдут значения профиля поверхности). За пределами ядра сплэта в выделенном радиальном направлении возможны различные варианты сочетаний его участков, помеченных на рис. 4 значениями признака K ($K=0, K=1, K=2, K=3$). В зависимости от величины препятствия возможно два случая.

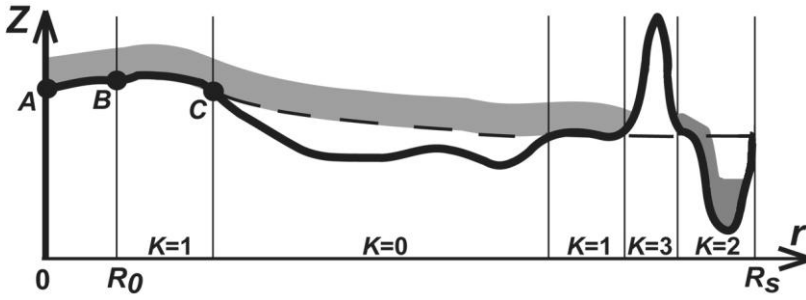


Рис. 4. Пример профиля шероховатой поверхности вдоль выделенного радиального направления

расплава капли (с последующим затвердеванием). Следовательно, в массив опорных вершин сохраняются значения Z -координат профиля поверхности. Второй случай – если препятствие выше h_0 , тогда этот участок помечается признаком $K=3$, и на этот участок препятствия натекание жидкости капли не допускается (подобный участок на рис. 4 помечен признаком $K=3$), что уменьшает эффективную площадь контакта сплэта с подложкой.

За препятствием расплав, обтекая его с боковых направлений, вновь может продолжить течение по данному радиальному направлению (на рис. 4 участок в виде углубления помечен признаком $K=2$) при определенном условии: профиль поверхности оказывается ниже расчетной траектории вязкого растекания капли (на рис. 4 она помечена пунктиром), и к текущему участку радиального направления ($K=2$) с боковых направлений ведет наклонный маршрут стекания жидкости с боковых участков поверхности, залитых расплавом капли из-за отсутствия перед ними высоких препятствий. Точки расчетной траектории растекания капли, которые оказываются выше точек профиля поверхности (рис. 4), определяют участок с признаком $K=0$, и именно их Z -координаты сохраняются в массиве опорных вершин. Данный признак означает, что жидкость по инерции «перелетает» углубление за счет высокой радиальной компоненты скорости движения. В контактной зоне с ядром сплэта, как показано на рис. 4, участок с признаком $K=0$ может следовать только за участком $K=1$ (и не может следовать за участками поверхности с признаками $K=3$ и $K=2$).

Расчетная траектория определяется с помощью радиальной ($u_r = \beta \cdot r \cdot z$) и нормальной компонент ($u_z = -\beta \cdot z^2$) скорости вязкого растекания капли из дифференциального уравнения (1). Физический смысл уравнения заключается в том, что производная от функции профиля в радиальном направлении равна тангенсу угла затекания жидкости, равного отношению компонент скорости расплава с учетом поправочного коэффициента α

$$\frac{dz}{dr} = \alpha \frac{u_z}{u_r} = -\alpha \frac{z}{r}. \quad (1)$$

Решение (1) с учетом начального условия $z(r_C) = z_C$ дает зависимость

$$z(r) = z_C + R_0 \cdot \left[(r/R_0)^{-\alpha} - (r_C/R_0)^{-\alpha} \right]. \quad (2)$$

Таким образом, сформированный массив опорных вершин $\{P_{i,j}\}$ будет содержать *предварительные оценки* Z -координат.

Подпункт 3.2.3 посвящен описанию *третьего этапа* – алгоритма распознавания и заливки углублений за препятствиями на поверхности в контактной зоне с периферийной частью сплэта на основе массива опорных вершин.

Алгоритм основан на сканировании вершин с признаком $K=2$ и определении области «связных» вершин, ограниченной непрерывным контуром, Z -координаты вершин которых выше Z -координаты любой из вершин углубления. При этом Z -координаты опорных вершин углубления необходимо увеличить до минимальной Z -координаты контура, при условии, что жидкость имеет возможность затечь в углубление, хотя бы через одну из вершин контура. При этом, после заливки углубления до нового уровня, оставшийся объем участвует в дальнейшем растекании капли, окончательно формируя сплэт.

В результате завершения работы алгоритма вершины, для которых *волновым* алгоритмом (подраздел 3.2.2) предварительно установлено значение признака $K=2$ и на которые фактического натекания жидкости капли не произошло, корректируются значением признака $K=3$.

Подпункт 3.2.4 посвящен описанию последнего *четвертого этапа* – процедуры сплайн-сглаживания координат опорных вершин, по которым строятся поверхности нижнего и верхнего оснований сплэта, реализующие деформацию его формы с учетом рельефа участка поверхности, на который производится укладка сплэта. Процедура сглаживания использует аппарат «составных рациональных В-сплайновых поверхностей» в параметрической форме:

$$R_{i,j}(u,v) = \begin{pmatrix} X_{i,j}(u,v) \\ Y_{i,j}(u,v) \\ Z_{i,j}(u,v) \end{pmatrix} = \frac{\sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 w_{k,l} \cdot n_k(u) \cdot n_l(v) \cdot P_{k-1+i,l-1+j}}{\sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 w_{k,l} \cdot n_k(u) \cdot n_l(v)}, \quad 0 \leq u, v \leq 1;$$

$$i = 0,1,2,\dots,m; \quad j = 0,1,2,\dots,n.$$
(3)

где $m=n=D_s$. Функциональные коэффициенты $n_k(u)$ имеют вид

$$\begin{aligned} n_0(u) &= (1-u)^3 / 6, & n_1(u) &= (3u^3 - 6u^2 + 4) / 6, \\ n_2(u) &= (-3u^3 + 3u^2 + 3u + 1) / 6, & n_3(u) &= u^3 / 6. \end{aligned}$$
(4)

При этом кубические многочлены $n_l(v)$ рассчитываются по формулам, аналогичным (4) с учетом замены параметра u на v (в расчетах параметры u и v фиксированы). Как видно из (3), для расчета координат каждой точки $R_{i,j}(u,v)$ используются 16 опорных вершин $P_{k-1+i,l-1+j}$, где $k=0 \div 3$. Весовые коэффици-

енты w_{kl} определяются исходя из значения высот 16 опорных вершин по формуле:

$$w_{k,l} = 1 + k_w \cdot (Z_{k-1+i,l-1+j} - Z_{\min}) / (Z_{\max} - Z_{\min}). \quad (5)$$

Формула (5) для более «высоких» Z -координат определяет более высокий вес, тем самым обеспечивая свойство аппроксимации: чем выше вес, тем ближе расчетная точка В-сплайновой поверхности $R_{i,j}(u,v)$ будет располагаться к соответствующей опорной вершине. Степень близости можно регулировать параметром k_w (вычислительные эксперименты показали значение от 2 до 5).

В качестве нижнего основания сплэта берется массив опорных вершин. Верхнее основание сплэта получается в результате сплайн-сглаживания нижнего основания и смещается вверх на скорректированную толщину сплэта, которая рассчитывается исходя из объема исходной капли минус объемы, потраченные на заливки двух зон. Алгоритм укладки на напыляемую поверхность очередного сплэта циклически повторяется до тех пор, пока не будет «исчерпано» заданное значение расхода частиц или толщины покрытия.

В подразделе 3.3 приведены результаты математического моделирования укладки сплэтов на поверхностях с различным рельефом. Производится их сравнение с результатами опытов, приведенных в различных литературных источниках. Примеры сравнения, приведенные на рис. 5, качественно подтверждают адекватность результатов моделирования экспериментальным сплэтам.

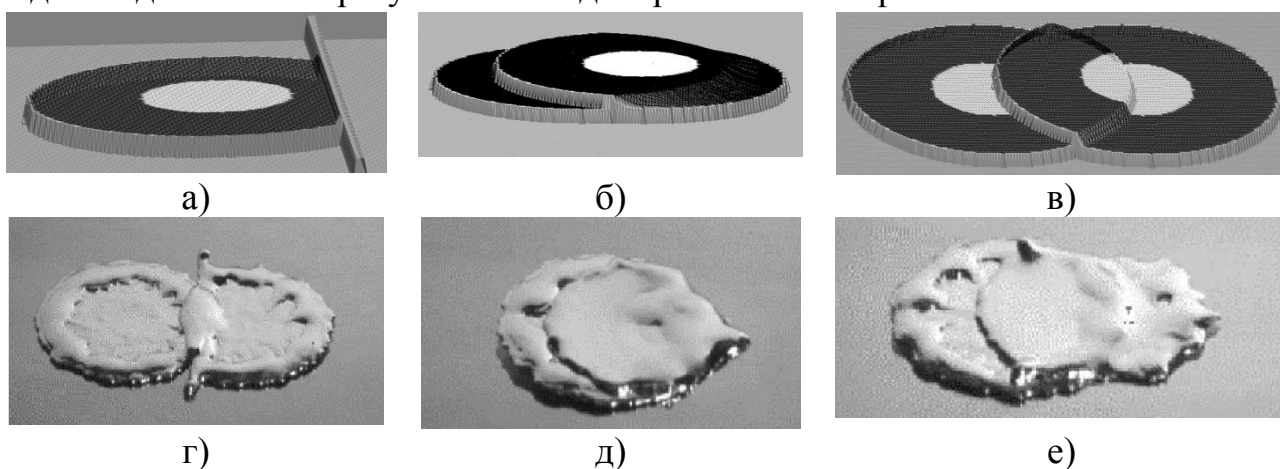


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования укладки одиночных сплэтов с результатами опытов (частицы никеля на медной подложке, $D_s=96$ мкм): а) модельный сплэт с преградой; б) модель «сплэт на сплэте» со смещением 20 мкм между центрами; в) модель «сплэт на сплэте» со смещением 50 мкм между центрами; г) – е) результаты опытов (частицы никеля на стальной подложке St45)

В подразделе 3.4 излагается методика расчета основных функциональных характеристик смоделированного покрытия: как пористость, шероховатость и адгезионная прочность. Подсистема «ПОКРЫТИЕ» позволяет рассчитывать пористость всего покрытия, пористость отдельного шлифа. Под порис-

тостью покрытия понимается отношение объема пор покрытия к общему объему покрытия (аналогично и для шлифа). Под шероховатостью покрытия подразумевается разность между максимальной и минимальной высотой покрытия (аналогично и для шлифа). Также рассчитывается и средняя шероховатость покрытия как среднеарифметическое значение от шероховатостей по всем шлифам, которая точнее определяет шероховатость покрытия.

Расчет адгезионной прочности связи покрытия с подложкой основывается на соотношении относительной прочности сцепления сплэта с подложкой:

$$\bar{\sigma}_i = 1 - \exp\left(v \cdot t_s^* / \exp(E_a / kT_c)\right), \quad (6)$$

где v – частота собственных колебаний атомов 10^{13} 1/с; t_s – время формирования сплэта, с; E_a – энергия активации, Дж; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Стефана-Больцмана; T_c – температура в контакте покрытия с подложкой, К.

Относительная прочность связи покрытия с подложкой определяется как:

$$\bar{\sigma}_{adg} = S_{\Pi}^{(отн)} \cdot \sum_{i=1}^{Np} \bar{\sigma}_i \cdot \left(S_i^{(конт)} / S_{общ}^{(конт)} \right), \quad (7)$$

где $\bar{\sigma}_i$ – относительная прочность соединения i -ого сплэта с подложкой, рассчитываемая с учетом температуры в контакте и энергии активации поверхности; $S_i^{(конт)}$ – площадь контакта i -ого сплэта с подложкой; $S_{общ}^{(конт)}$ – общая площадь контакта сплэтов с подложкой, $S_{\Pi}^{(конт)}$ – геометрический фактор-множитель адгезионной прочности (отношение суммарной площади оснований контактирующих с подложкой сплэтов к площади основания покрытия).

В подразделе 3.5 описывается программная реализация подсистемы «ПОКРЫТИЕ»: описание структур данных, блок-схема алгоритма работы подсистемы, описание функциональных блоков и принципов их работы.

Подраздел 3.6 посвящен описанию проблемно-ориентированного программного комплекса. Кроме двух подсистем в комплекс входят: 1) модуль, обеспечивающий связь и взаимодействие с электронной таблицей СУБД Access, содержащей справочник табличных данных, отражающих основные свойства материалов. Модуль позволяет добавлять/редактировать информацию в базе данных. Описание модуля приведено в **подпункте 3.6.1**. 2) пользовательское меню, реализующее интерфейс пользователя, описывается в **подпункте 3.6.2**. Программа имеет общее меню, единое для всех подсистем, и может работать в пяти основных режимах: 1) Режим ограничений на «Пространство 1» (координатное пространство T_p, T_b, P_e); 2) Режим анализа чувствительности (координатное пространство (T_p, T_b, P_e)); 3) Режим корреляций параметров (двумерный график зависимости характеристики сплэта от КФП); 4) Режим ограничений на «Пространство 2» (одно из четырех пространств: (T_p, T_b, u_p) , $(T_p,$

T_b, D_p), (T_p, D_p, u_p) , (T_b, D_p, u_p) на выбор пользователя); 5) Режим моделирования покрытия. Каждый режим предоставляет пользователю отдельное меню для ввода параметров. 3) модуль отображения результатов моделирования в графическом виде (подпункте 3.6.3) предусматривает следующие режимы: 1) Отображение пространства КФП в виде куба с усеченными гранями (рис. 2); 2) Отображение покрытия в изометрии (рис. 6);

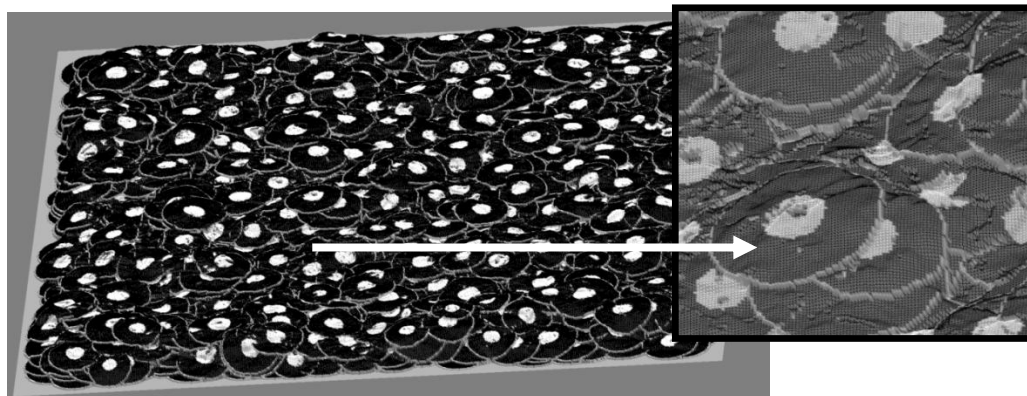


Рис. 6. Пример работы функции отображения покрытия (2740 частиц никеля на медной подложке размером 1x1 мм, толщина покрытия~50 мкм): $D_p=20-40$ мкм, $u_p=100$ м/с, $T_p=2000$ К, $T_b=300$ К, $d_x=1.5$ мкм, время счета 245 сек

3) Отображение срезов покрытия, параллельных подложке (рис. 7); 4) Отображение в виде графика функции (рис. 8); 5) Отображение шлифов с графиками пористости (рис. 9,б).

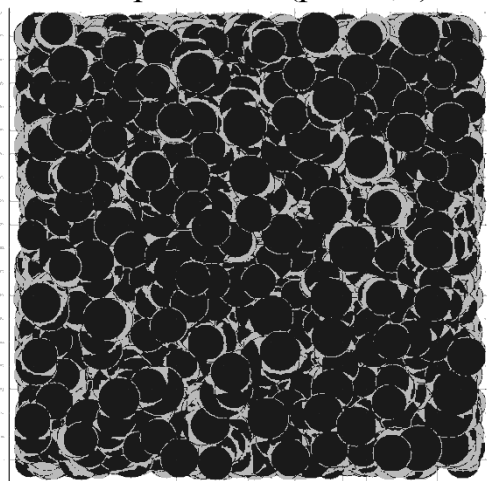


Рис. 7. Изображение адгезионного контакта (вид со стороны медной подложки): частицы никеля $D_p=20-40$ мкм, $u_p=60-200$ м/с, $T_p=2200-3000$ К, $T_b=300$ К

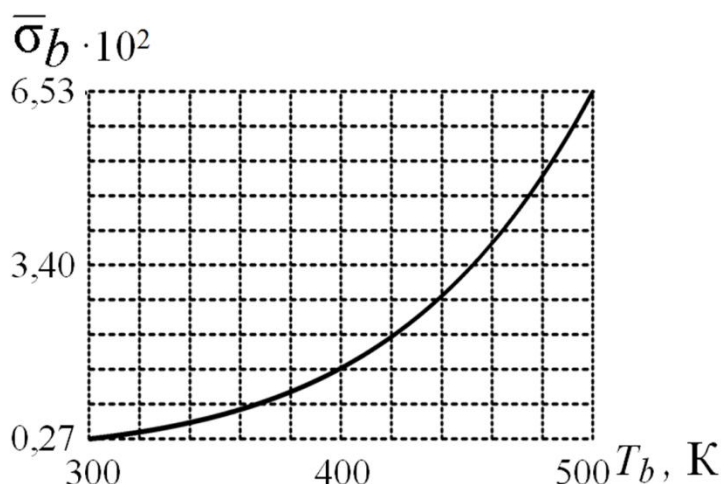


Рис. 8. Зависимость относительной прочности сцепления сплэта $\bar{\sigma}_b$ с медной подложкой от температуры основы ($\bar{\sigma}_b = f(T_{b0})$): температура частицы никеля $T_{p0} = 2000$ К, $T_{b0}=300-500$ К, $u_{p0} = 100$ м/с, $D_p = 40$ мкм

Подраздел 3.7 посвящен проверке на адекватность структур порошковых покрытий, реализуемых вычислительной технологией имитационного моделирования, структурам покрытий, получаемым при плазменном напылении.

В подпункте 3.7.1 производится качественное и количественное сравнение рассчитанных функциональных характеристик смоделированного покрытия с данными из научных публикаций. Результат моделирования шлифа покрытия хорошо согласуется с экспериментальным шлифом (рис. 9 а, б).

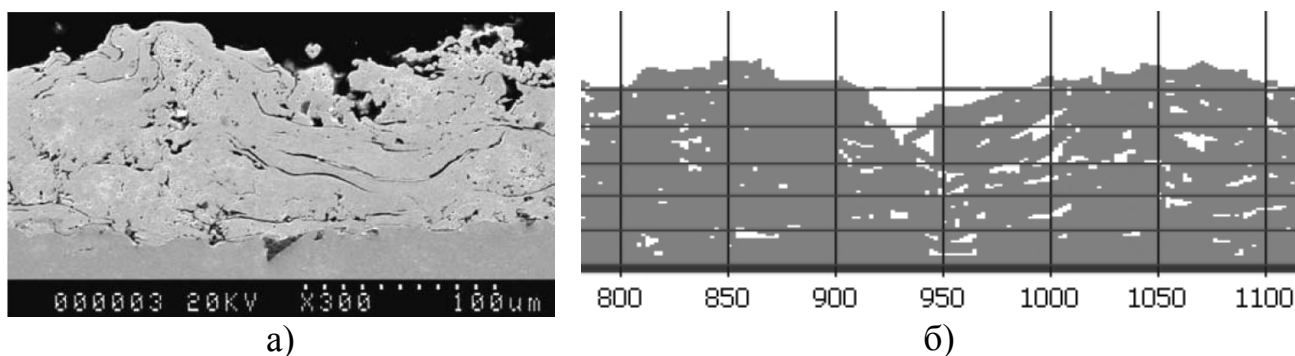


Рис. 9. Шлифы покрытий, полученных напылением частиц никеля на подложку из стали ($D_p=43$ мкм, $u_p=62$ м/с, $T_p=1843$ К, $T_b=300$ К): а) экспериментальный; б) результат моделирования

Также производится проверка на стабилизацию значений функциональных характеристик покрытия в асимптотике уменьшения шага дискретизации к нулю (**подпункт 3.7.2**). При уменьшении шага дискретизации значения характеристик асимптотически стремятся к своим стабилизированным значениям (рис. 10), что говорит о сходимости математической модели, определенной в дискретном координатном пространстве, к модели в непрерывных координатах.

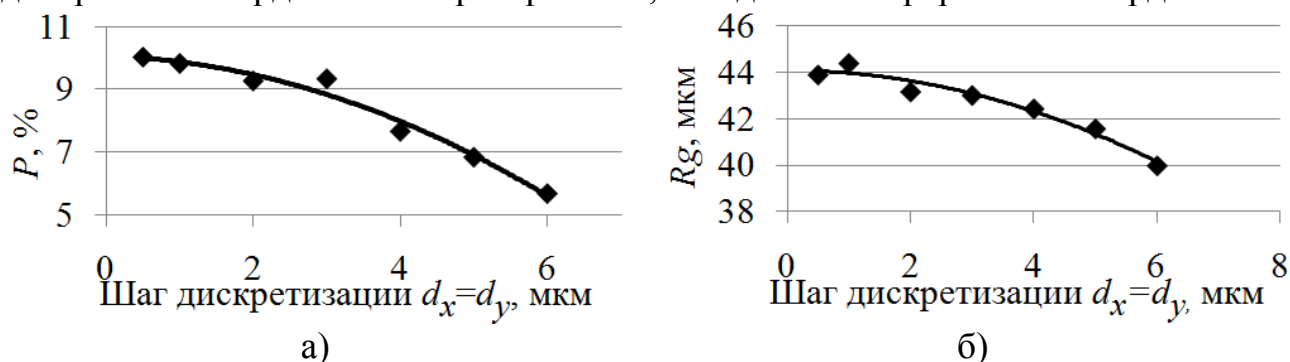


Рис. 10. Зависимости общей пористости покрытия (а) и средней шероховатости покрытия (б) от шага дискретизации: маркерные точки - результаты модельных экспериментов, сплошная линия – аппроксимация в виде тренда; диаметр частиц никеля $D_p=60$ мкм, $T_p=2000$ К, $u_p=50$ м/с; температура медной подложки $T_b=300$ К; толщина покрытия – 150 мкм

В подпункте 3.7.3 приведены зависимости изменения функциональных характеристик моделируемых на медной подложке покрытий от изменения раз-

личных КФП частиц никеля (рис. 11 – рис. 15), которые качественно и количественно хорошо согласуются с опытными данными из научных публикаций.

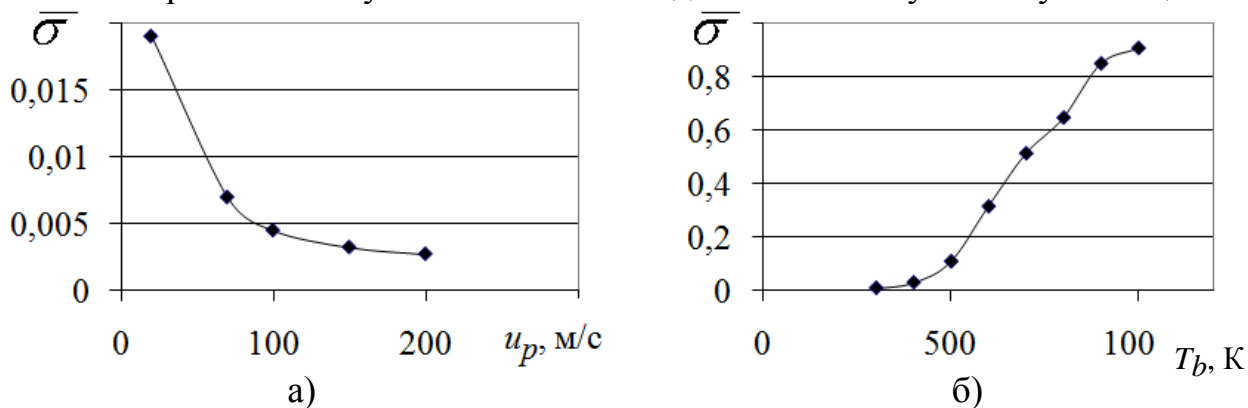


Рис. 11. Зависимости относительной прочности связи покрытия с подложкой: а) от скорости частиц ($D_p=50$ мкм, $T_p=2000$ К, $u_p=20-200$ м/с, $T_b=300$ К); б) от температуры подложки ($D_p=50$ мкм, $T_p=2000$ К, $u_p=70$ м/с, $T_b=300-1000$ К)

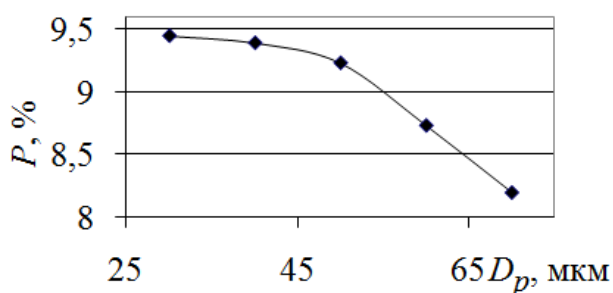


Рис. 12. Зависимость пористости покрытия от размера частиц: $D_p=30-70$ мкм, $T_p=2000$ К, $u_p=50$ м/с, $T_b=300$ К

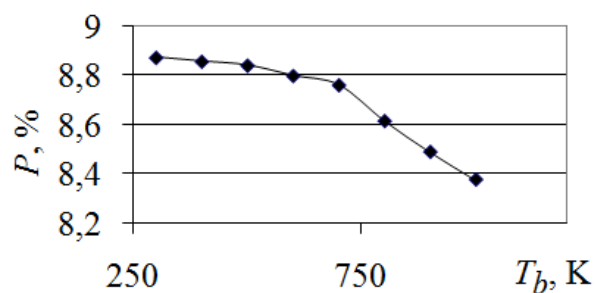


Рис. 13. Зависимость пористости покрытия от температуры подложки: $D_p=60$ мкм, $T_p=2000$ К, $u_p=50$ м/с, $T_b=300-1000$ К

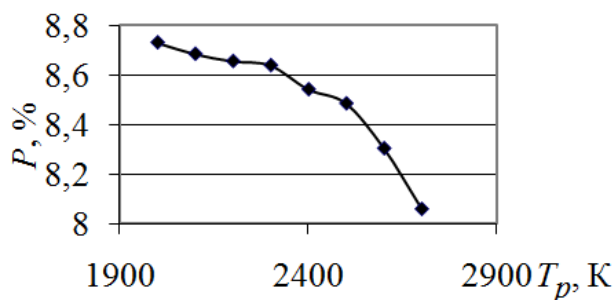


Рис. 14. Зависимость пористости покрытия от изменения температуры частиц: $D_p=60$ мкм, $T_p=2000-2700$ К, $u_p=50$ м/с, $T_b=300$ К

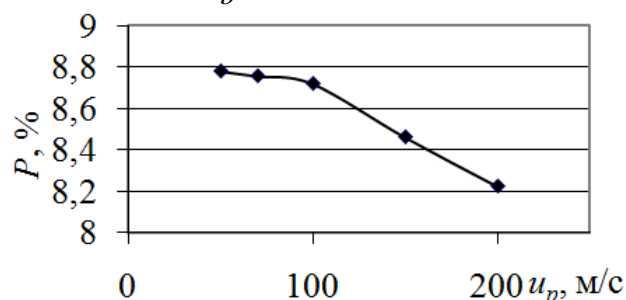


Рис. 15. Зависимость пористости покрытия от изменения скорости частиц: $D_p=60$ мкм, $T_p=2000$ К, $u_p=50-200$ м/с, $T_b=300$ К

В заключении диссертации сформулированы основные выводы и результаты.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе экспериментально апробированной теории растекания капель металлических расплавов на поверхности основы разработана эффективная численная методика, позволяющая определять диапазоны КФП, в которых обеспечивается получение металлических сплэтов с заданными характеристиками. Разработанная математическая модель сплэта по сравнению с ранее известными моделями позволяет точнее оценивать толщину и диаметр сплэта и тем самым, достовернее осуществлять моделирование покрытия.

2. Разработан эффективный алгоритм математического моделирования последовательной стохастической укладки сплэтов на поверхность с произвольно заданным, изменяемым рельефом при моделировании покрытия, включающий процедуры: генерации шаблона узловых точек основания сплэта; формирования опорного массива вершин посредством анализа рельефа поверхности; распознавания и заливки углублений на поверхности основы в контактных зонах с ядром сплэта и его периферийной кольцевой частью; сплайн-сглаживания поверхности основания сплэта. Изменение формы оснований сплэта в зависимости от рельефа поверхности, а также возможность изменения угла затекания расплава капли в зависимости от соотношения радиальной и нормальной составляющих скорости вязкого растекания капли позволяет более достоверно (чем в аналогичных работах других авторов, в частности: O.Knotek, T. Steinke, M. Baker) определять форму пор, образующихся под сплэтами.

3. На основе развитого подхода и разработанных алгоритмов создан проблемно-ориентированный программный комплекс, позволяющий производить вычислительные эксперименты и осуществлять: а) подбор КФП для получения сплэтов с заданными характеристиками; б) имитационное моделирование формирования слоистой структуры плазменных покрытий из порошков металлов; в) расчет функциональных характеристик покрытий, полученных в результате их моделирования, а также наглядное отображение результатов моделирования в виде 2D - и 3D - иллюстраций.

4. С использованием программного комплекса произведена проверка на адекватность структур порошковых покрытий, реализуемых вычислительной технологией имитационного моделирования, структурам покрытий, получаемым при плазменном напылении, а также, впервые, проведено комплексное исследование влияния КФП на свойства покрытий, получаемых путем нанесения порошка никеля на медные подложки. В работе показана сходимость функциональных характеристик покрытий, полученных в результате их моделирования, к своим стабилизированным значениям при уменьшении шага дискретизации.

Разработанный проблемно-ориентированный программный комплекс и полученные данные представляют практический интерес при проектировании и оптимизации плазменных порошковых покрытий, позволяющих существенно уменьшить количество физических и технологических экспериментов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бледнов В.А., Иордан В.И., Солоненко О.П. Моделирование формирования слоистой структуры и пористости плазменных порошковых покрытий с учетом изменяемой топологии поверхности при напылении // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т.317, №5. С. 82-87.
2. Бледнов В.А., Иордан В.И., Солоненко О.П. Компьютерное моделирование формирования плазменных покрытий и их характеристик // Известия Алтайского государственного университета. 2011. № 1(69). С.142-147.
3. Солоненко О.П., Бледнов В.А., Иордан В.И. Компьютерное проектирование газотермических покрытий из порошков металлов. Концепция, теоретические основы и программная реализация // Теплофизика и Аэромеханика. 2011. Т.18, № 2. С. 265-283.
4. Бледнов В.А., Иордан В.И., Солоненко О.П. 3D-моделирование формирования слоистой структуры плазменных порошковых покрытий // Материалы докладов III-ей Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине», 16-20 марта 2009. Новосибирск. С. 13-14.
5. Бледнов В.А., Иордан В.И., Солоненко О.П. Параллельная программная реализация численного анализа характеристик поверхности и пористой структуры плазменных порошковых покрытий // Суперкомпьютеры: вычислительные и информационные технологии: материалы международной науч.-практ. конф., 30 июня – 2 июля 2010. Хабаровск. С. 3-10.
6. Бледнов В.А., Иордан В.И., Солоненко О.П. Подсистема 3D-моделирования слоистой структуры покрытий в экспертной системе проектирования технологий плазменного напыления // Материалы X Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий» Улан-Уде, 20-26 июля 2009. Ч. 1. С. 44-48.
7. Бледнов В.А., Иордан В.И., Солоненко О.П. Сквозное компьютерное моделирование процесса плазменного напыления и обработки покрытий // Материалы докладов Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, 7-11 сентября 2009. Томск. С. 159-160.
8. Бледнов В.А., Иордан В.И., Солоненко О.П. Проблемно-ориентированный программный комплекс «СПЛЭТ-ПОКРЫТИЕ» для проектирования и оптимизации технологии плазменного напыления // XI Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Красноярск 26-27 октября 2010. Новосибирск. С. 38-39.
9. Бледнов В.А., Иордан В.И., Солоненко О.П. В-сплайновые поверхности в алгоритме адаптации формы сплэтов к изменяемой топологии напыляемой поверхности покрытия при моделировании формирования его структуры // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2010):

Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (19-20 ноября 2010). Ч.2. Томск. С. 155-160.

10. Солоненко О.П., Бледнов В.А., Иордан В.И., Компьютерное проектирование газотермических покрытий из порошков металлов. Концепция, теоретические основы и программная реализация // Труды 10-й Международной конференции “Пленки и покрытия”, 31 мая – 3 июня 2011 года, Санкт-Петербург. С. 17-21.

Подписано в печать 12.10.2011

Формат бумаги 60x84/16. Усл. печ. л. 1,0

Тираж 110 экз. Заказ № 1012.

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»
630090, г. Новосибирск, Институтская, 4/1