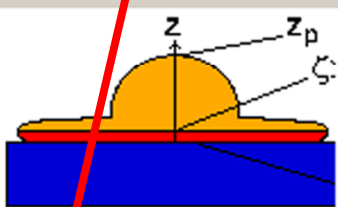


Корреляции	
Материалы	
Материал частицы	Ag
Материал подложки	Cu
Аргумент	
$T_p \text{ min, K}$	1730
$T_p \text{ max, K}$	2100
$u_{p0}, \text{ м/с}$	100
$D_{p0}, \text{ мкм}$	40
$T_{b0}, \text{ K}$	400
Аргумент	T_{p0}

Определение параметров процесса

\bar{D}_s	Безразмерный диаметр сплэта
\dot{T}_{av}	Средняя скорость охлаждения капли при формировании сплэта
\bar{d}_1	Среднее расстояние между первичными осями дендритов при формировании сплэта
\bar{d}_2	Среднее расстояние между вторичными осями дендритов при формировании сплэта
$d\zeta/dt$	Скорость движения поверхности раздела твердое - жидкое (фронта затвердевания)
c_s	Константа затвердевания
T_c	Температура в контакте

Сценарий	
Сценарии	
Функция	
Функция	\bar{h}_s Безраз
Параметры	
Автор	Madejski-1

Перечень параметров зависит от выбранной функции, в примере предлагается выбрать метод расчета толщины сплэта

Автор
Madejski-1
Kurukawa
Collings
Cheng
Akao
Chandra
McPherson
Jones
Solonenko

Рис. 3.41. Отображение действий пользователя при настройке блока корреляций

Запуск вычислений происходит по нажатию специальной кнопки «Старт», находящейся внизу меню. Считывание данных, заданных при настройке меню, происходит перед запуском вычислительных блоков после нажатия кнопки «Старт». При этом происходит проверка на корректность значений переменных, установленных пользователем при настройке меню. В случае появления ошибок на экран выдается предупреждение, работа программы может останавливаться или продолжаться в зависимости от критичности обнаруженной ошибки. Программа сама пытается откорректировать введенные данные в случае их некорректности, однако это не всегда возможно. В случае невозможности корректировки данных ошибка вызывает принудительную остановку вычислений с соответствующим сообщением. В этом случае пользователю необходимо откорректировать входные данные. Результат работы программы отображается во второй половине окна.

3.6.3. Модуль отображения графической информации

Для отображения результатов работы программного комплекса на экране используются технологии GDI и OpenGL [77]. Первая из них разработана компанией Microsoft и является стандартным средством отображения графики в системе, вторая разработана группой независимых разработчиков для отображения 3D графики. Стандарт OpenGL является кроссплатформенным и может использоваться для графических устройств различного типа.

В программе существуют следующие режимы отображения результатов [77]:

- 1) Отображение пространства КФП в виде куба с усеченными гранями.
- 2) В виде двумерного графика функции.
- 3) Отображение покрытия в изометрии.
- 4) Отображение шлифов с графиками пористости.
- 5) Отображение срезов покрытия, параллельных подложке.

Из перечисленных режимов 1-ый и 3-ий имеют возможность движения сцены для того, чтобы пользователь мог «рассмотреть объект».

В режиме 1 происходит отображение данных, хранящихся в двух трехмерных массивах m_cube и m_colors_cube . В данном режиме отображения участок пространства, размером порядка 70% от площади экрана, резервируется под куб пространства КФП. Подписи по осям куба зависят от выбранного пространства, оси вместе с разметкой отображаются на экране.

Разметка производится прямыми линиями с цифровыми отметками. Первая отметка соответствует минимальному значению параметра (не обязательно нулю). Это делается для экономии отведенного для отображения пространства. Куб отображается в виде соединяющихся вершин и находится в центре сцены. Вершина куба выводится только в том случае, если соответствующий ей элемент массива m_cube имеет значение ИСТИНА. Соединения проводятся между соседними вершинами, отличающимися по значению их индексов на ± 1 . Прямая проводится в том случае, если обе вершины имеют значение ИСТИНА. Цвет вершины зависит от значения в массиве m_colors_cube . Линии окрашиваются в цвета, соответствующие вершинам. В том случае, если вершины имеют разные цвета, тогда цвет линии меняется по градиенту. Пример работы представлен на рис. 3.42.

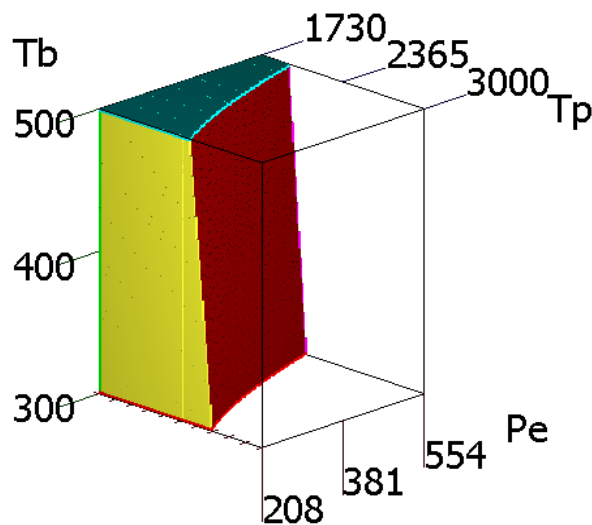


Рис. 3.42. Пример работы функции отображения «Пространство 1»

В режиме 2 используется двумерное пространство для отображения зависимостей параметров сплэта от одного из КФП. Результаты вычислений хранятся в одномерном массиве data и не имеют цвета.

Для отображения графика выделяется 90% от области экрана. Параллельно осям абсцисс и ординат проводятся прямые, делящие пространство на 100 частей (10 строк, 10 столбцов). В качестве минимальных значений в процессе разметки осей выступают числа: по оси X – введенное значение минимума выбранного КФП и по оси Y – минимальное значение из массива data. Аналогично определяются максимальные значения при разметке осей. В том случае, когда минимальное и максимальное значения по оси ординат совпадают, тогда максимальное значение увеличивается на 1.

Вывод графика происходит путем соединения соседних точек, хранящихся в массиве data в виде прямых линий. Поскольку число точек велико, поэтому создается эффект гладкости графика. После вывода графика происходит вывод подписей осей координат, наносится линейка (рис. 3.43). Масштаб по оси ординат корректируется автоматически и отображается в подписи к оси после единицы измерения.

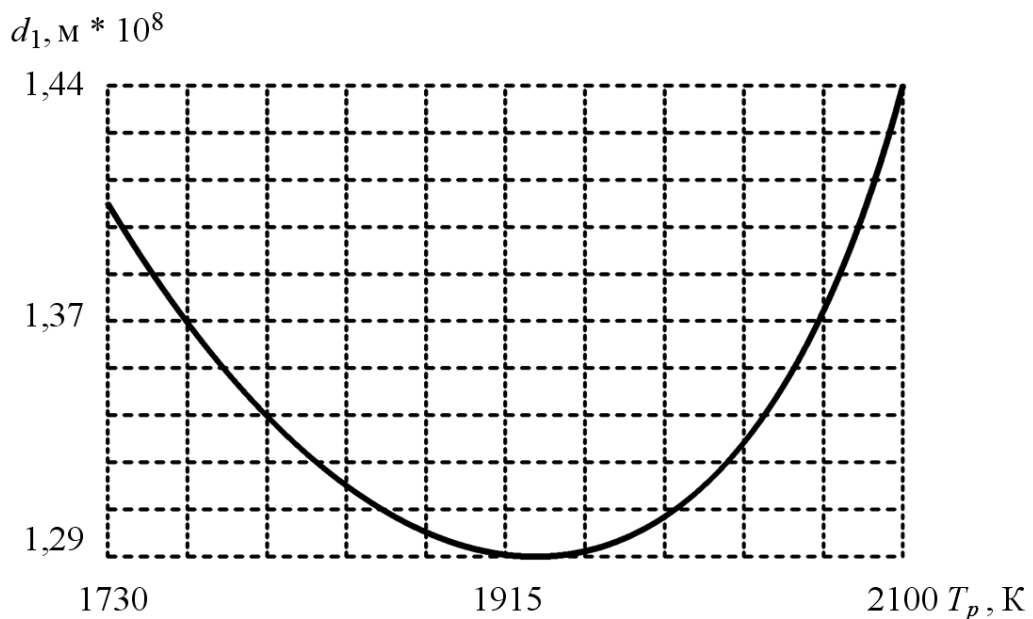


Рис. 3.43. Пример работы функции отображения графика корреляционной зависимости

При выводе на экран в режиме отображения покрытия в качестве основного массива используется массив *field*, являющийся двумерным, в отличие от массива *up*, хранящего информацию о всей структуре покрытия. Массив *field* хранит информацию только о поверхности покрытия. Учитывая, что при выводе на экран внутренние слои будут скрыты, их можно не выводить, тем самым существенно уменьшив число полигонов.

Для вывода используются два вложенных цикла, перебирающие элементы по каждому измерению. Как только выбран нужный элемент происходит считывание значений координат X, Y, Z . Вывод осуществляется полигонами по три соседние вершины, которые соединяются отрезками (рис. 3.44). Данный режим вывода называется «проволочным». Для использования освещения сцены вычисляется вектор нормали к плоскости, образованной вершинами полигона. Цвет вершины также хранится в массиве *field*.

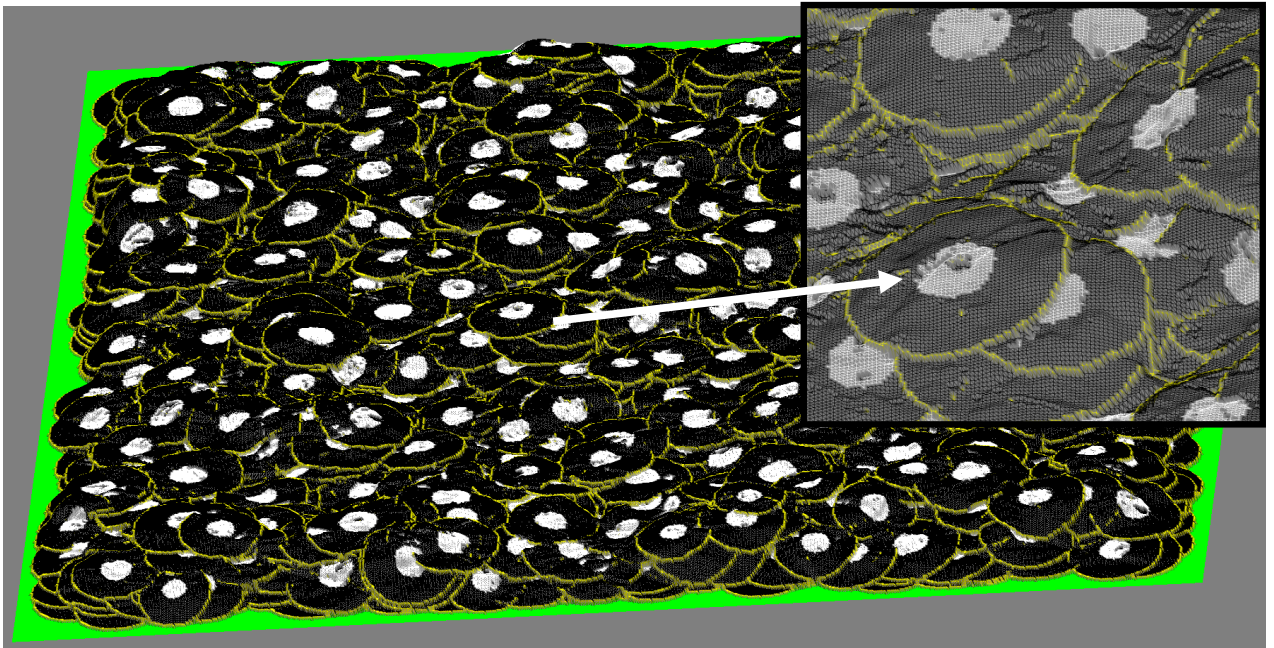


Рис. 3.44. Пример работы функции отображения покрытия

Модуль визуализации отображает шлифы, параллельные плоскости XZ . Каждому шлифу соответствует определенное значение координаты Y . Данный режим отображения состоит из двух этапов. На первом отображается

шлиф покрытия, путем перебора элементов массива *up* и вывода прямоугольников шириной в один дискрет и высотой от значения, хранящегося в поле *s1* элемента структурного типа, и до значения, хранящегося в поле *s2*.

Разметка осей выводится после отображения шлифа покрытия. В данном случае разметка начинается с нуля и продолжается на всю длину покрытия. Для разбиения используется алгоритм, который пытается подобрать наиболее подходящие округленные значения для разбиения по осям. Это реализуется за счет подбора возможных масштабов и выборки из них оптимального.

Суммарные показатели по пористости вычисляются в процессе выполнения отображения шлифа. Второй режим отображает гистограмму распределения пористости по каждому участку покрытия. Сопроводительная информация отображается справа от гистограмм распределения (рис 3.45).

Особенностью данного режима является то, что покрытие получается не высокое и достаточно протяженное. Отобразить его в один экран не представляется возможным, поэтому пользователь вынужден использовать «прокрутку» для данного режима просмотра.

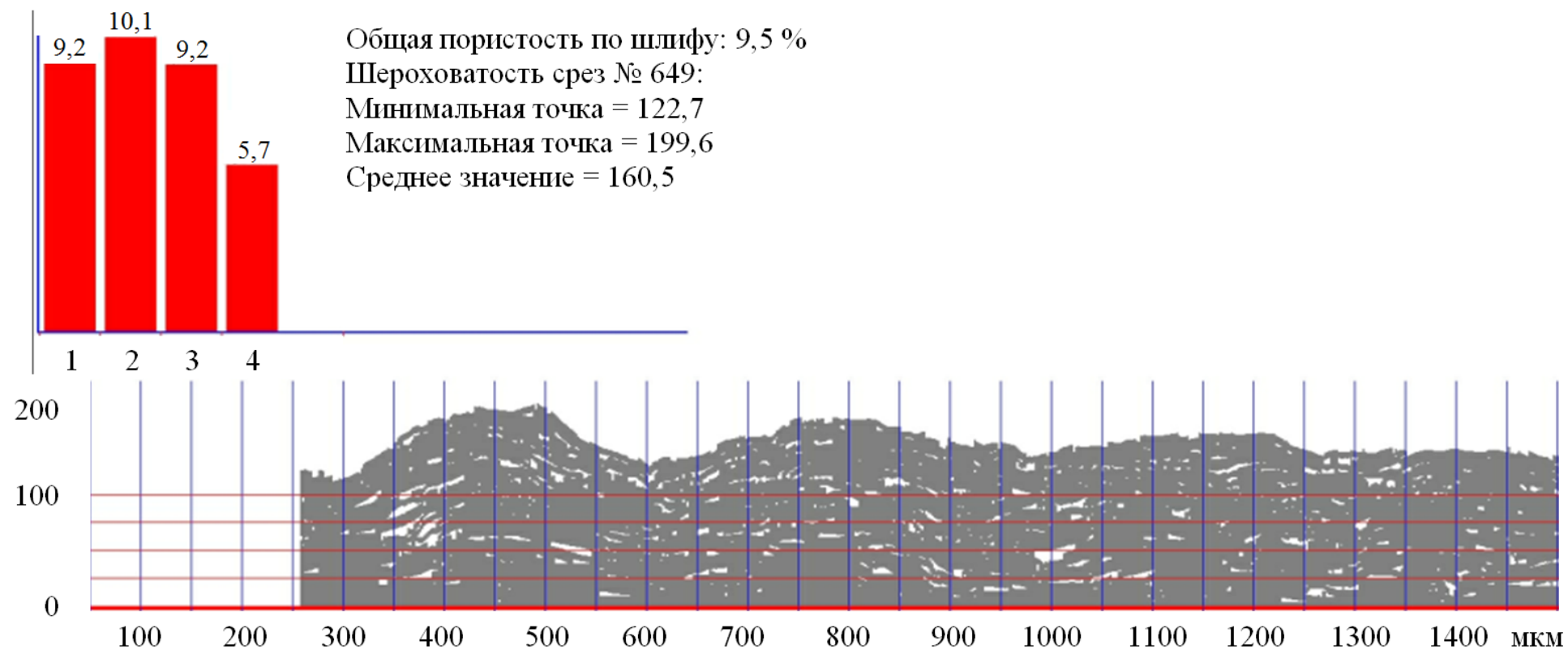


Рис. 3.45. Пример работы функции отображения шлифа покрытия

Последним режимом является режим отображения изображения первого монослоя покрытия (вид со стороны подложки на монослой контактирующих с подложкой сплэтов, выделенных черным цветом), характеризующего относительный вклад в адгезионную прочность связи покрытия с подложкой (рис. 3.46). Данные для изображений шлифов хранятся в массиве `up`, который сканируется при поиске значений цвета для заданной точки. Каждая точка выводится на экран в виде прямоугольника (практически неразличимого глазом) определенного цвета в зависимости от типа точки. В том случае, если точка принадлежит поре, она отображается серым цветом, иначе она принадлежит сплэту и отображается чёрным цветом.

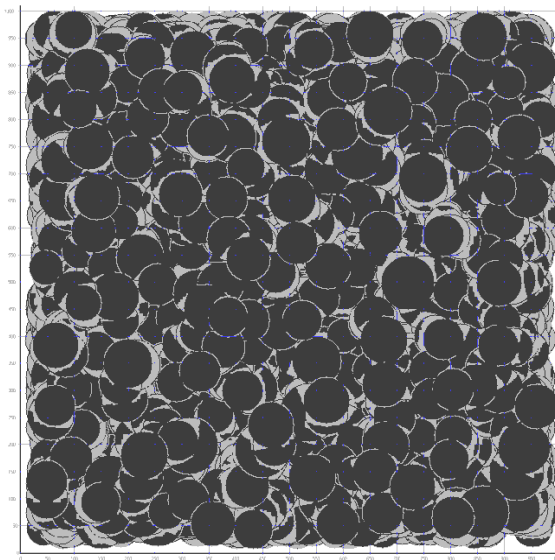


Рис 3.46. Пример работы функции отображения адгезионного контакта (вид со стороны подложки)

3.7. Практическая апробация программного комплекса

3.7.1. Проверка на адекватность развитого подхода к моделированию формирования покрытий

Для исследования возможностей практического использования подсистемы «ПОКРЫТИЕ» была проведена серия вычислительных экспериментов

для установления основных зависимостей изменения адгезии, шероховатости и пористости покрытий от КФП и других параметров. Полученные результаты, по возможности, сравнивались с известными литературными данными.

Получение достоверных оценок функциональных характеристик плазменных порошковых покрытий (адгезии, шероховатости, пористости и др.) является достаточно сложной задачей. Это объясняется, в первую очередь, стохастичностью процесса напыления. В процессе напыления при соблюдении, казалось бы, одинаковых условий можно получить покрытия, отличающиеся по своим характеристикам на несколько процентов. Например, на практике для оценки величины пористости покрытия предварительно готовятся шлифы покрытия. Для каждого шлифа полученное значение пористости характеризует локальные свойства, которые подвержены флуктуации. Кроме того, механическое воздействие в процессе подготовки шлифа может вносить вклад в разброс оценки пористости. В методике расчета пористости используются методы анализа изображений, которые оценивают площади областей в изображении, отличающиеся по цвету. Данная техника также вносит погрешности в результат. Кроме того, пористость различается по масштабу: макро-, мезо- или микропористость. Поэтому уменьшения случайной погрешности необходимо добиваться проведением большой серии испытаний (накоплением достаточно представительной статистики). Разработанный моделирующий комплекс рассчитывает для одного варианта моделируемого покрытия значение пористости. Серия вычислительных экспериментов дает возможность усреднения результатов пористости на этапе моделирования.

В реальности параметры покрытия чувствительны к размерам и температурам частиц, а также к статистическому разбросу значений других КФП. Результаты модельных экспериментов и реальных опытов могут отличаться, так как в процедуре моделирования формирования структуры покрытия невозможно учесть все особенности и различного рода флуктуации параметров запыленной металлическими частицами плазменной струи, оказывающих существенное влияние на функциональные характеристики покрытия. Ниже

предпринята попытка проверки развитого подхода к моделированию формирования слоистой структуры покрытия на адекватность ее реальному процессу напыления.

В работе [11] приводятся результаты экспериментов по исследованию относительной прочности сцепления одиночных сплэтов (серебро, медь), осажденных на подложки из серебра. При этом материал в виде проволоки распрыскивался плазменной струей. Средняя скорость капель при соударении с подложкой была около 30 м/с. Экспериментальная зависимость изменения относительной прочности сцепления сплэтов с подложкой от температуры в контакте “капля - подложка” показана на рис. 3.47. Результаты моделирования отражены на рис. 3.48.

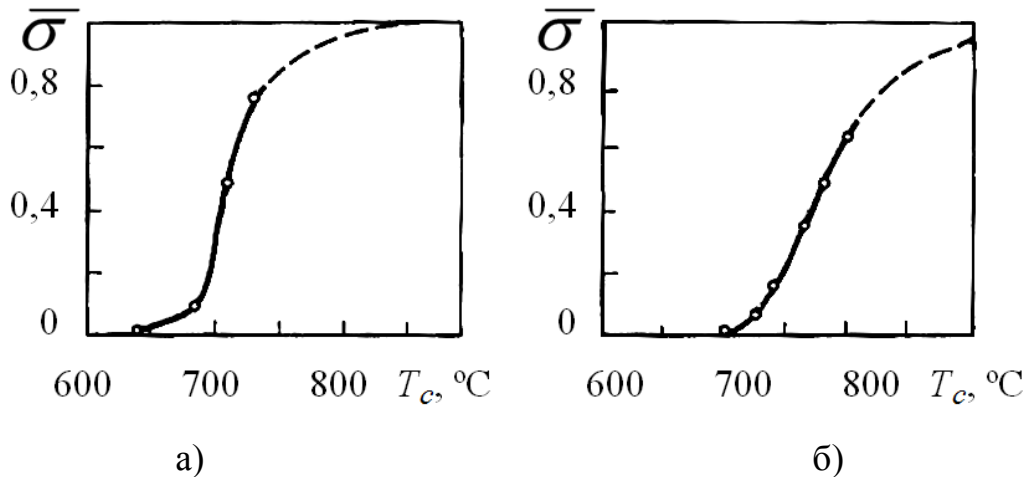


Рис 3.47. Экспериментальные зависимости относительной прочности сцепления сплэтов с подложками из серебра от контактной температуры:

а) – частицы серебра; б) – частицы меди

Были выбраны значения параметров модели: подложка из чистого серебра, скорость частиц $u_{p0}=30$ м/с, температура подложки $T_{b0}=300$ К, диапазон температур частиц $T_p=1200-2000$ К для системы «частицы Ag – подложка Ag» и диапазон температур частиц $T_p=1400-2200$ К для системы «частицы Cu – подложка Ag», диаметр частиц $D_p=50$ мкм. При этом изменение контактной температуры обеспечивалось за счет изменения температуры частиц.

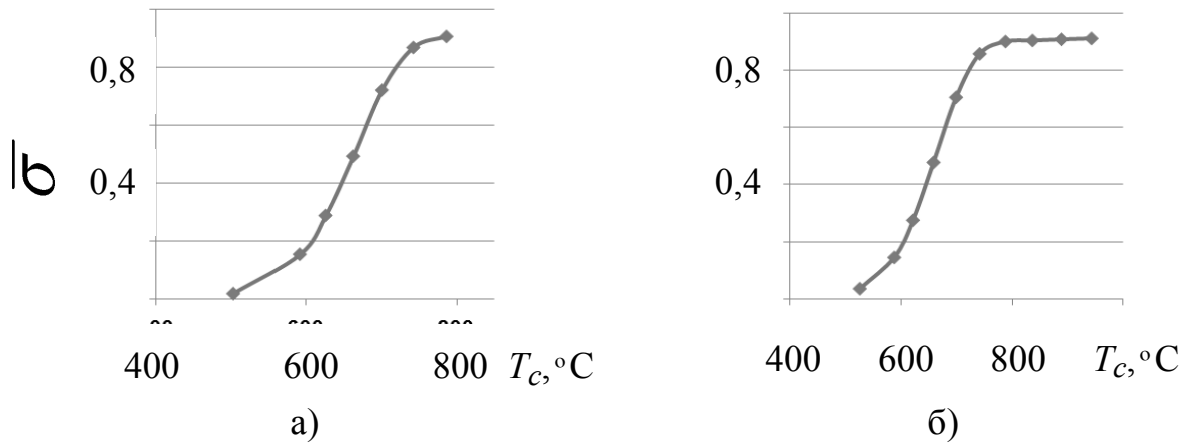


Рис. 3.48. Расчетные зависимости относительной прочности сцепления сплэтов с подложками из серебра от контактной температуры:

а) – частицы серебра; б) – частицы меди

Полученные результаты качественно согласуются друг с другом. Относительное смещение расчетных и экспериментальных кривых вдоль оси температур обусловлено как расчетными, так и измерительными погрешностями оценки контактных температур между растекающейся и затвердевающей капли расплава и подложкой.

Сравнение экспериментальных значений пористости (рис. 3.49), приведенных в работе [43], с результатами моделирования (рис. 3.50) кластеров покрытий, полученных напылением частиц никеля на стальную подложку. Параметры процесса плазменного нанесения покрытия: диаметр частиц $D_p=50$ мкм, их скорость $u_p=50-200$ м/с, и температура $T_p=1845$ К, температура подложки $T_b=300$ К. Толщина моделируемого КП соответствовала экспериментальным образцам покрытий, анализируемых в работе [43].

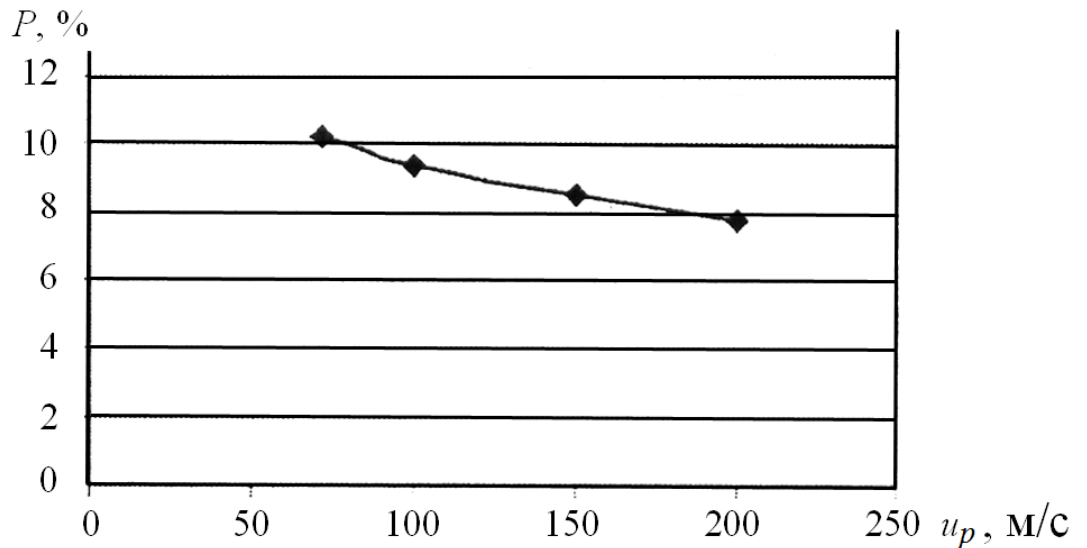


Рис 3.49. Экспериментальная зависимость изменения пористости покрытия от средней скорости напыляемых частиц никеля

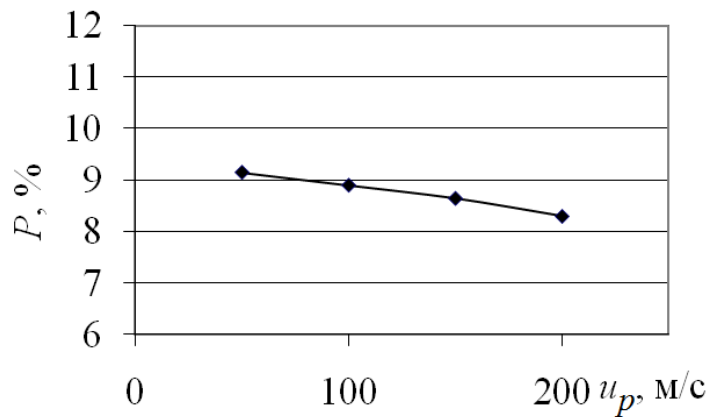


Рис 3.50. Зависимость изменения пористости покрытия от средней скорости напыляемых частиц никеля, полученная в результате модельного вычислительного эксперимента

Результаты эксперимента и моделирования (рис. 3.49 и 3.50) характеризуют линейный характер падения пористости покрытий с увеличением скорости напыляемых частиц. Можно констатировать достаточно хорошее согласие между результатами физического и вычислительного экспериментов.

На рис. 3.51 приведено сравнение изображений экспериментального [44] и модельного шлифов покрытий, полученных напылением частиц никеля на подложку из стали при следующих значениях КФП: диаметр частиц

$D_p=43$ мкм, их скорость $u_p=62$ м/с, и температура $T_p=1843$ К, температура подложки $T_b=300$ К. Как видно из сравнения рис. 3.51,а и 3.51,б, наблюдается подобие (схожесть) конфигураций пор в экспериментальном и модельном шлифах.

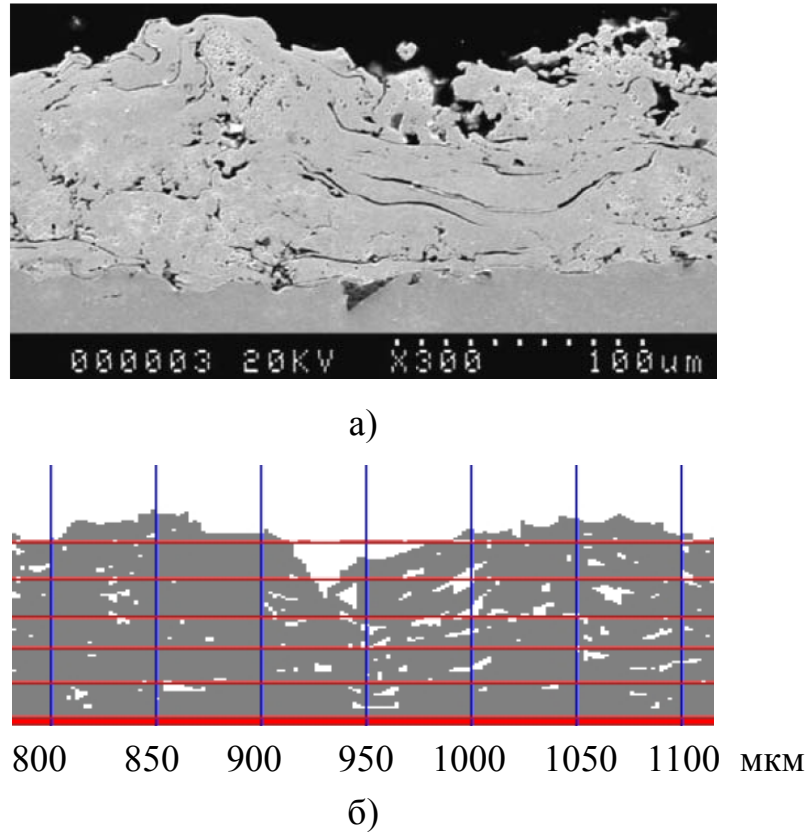


Рис 3.51. Экспериментальный – а), и расчетный – б), поперечные разрезы шлифы покрытий

В работе [44] приводится усредненная по шлифу пористость покрытия, которая составила 7,7%, а визуально определенная для данного шлифа шероховатость поверхности покрытия около 30 мкм. В то же время, интегральная пористость по кластеру модельного покрытия, полученного нами, составила 7,6%, а шероховатости для шлифов, полученных в результате моделирования, оказались в диапазоне 18–39 мкм (среднее значение – 29,6 мкм). В экспериментальном шлифе, приведенном на рис. 3.51, шероховатость порядка 24 мкм. Можно констатировать, что результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с результатами эксперимента. Следовательно, подход,

развитый в настоящей работе, позволяет моделировать покрытия с правдоподобной структурой пористости.

3.7.2. Проверка на сходимость функциональных характеристик покрытия при переходе от дискретного к непрерывному представлению формы сплэтов

Погрешность рассчитываемых в программе функциональных характеристик покрытий, в первую очередь, зависит от шагов дискретизации координат узловых точек в плоскости XU . В асимптотике стремления шагов дискретизации к нулю ($d_x, d_y \rightarrow 0$), поведение функциональных характеристик покрытия, при условии корректности моделирования, должно стабилизироваться (значения практически уже не должны изменяться).

С целью такой проверки на сходимость была проведена серия модельных вычислительных экспериментов при одних и тех же значениях КФП (частицы Ni, подложка Cu: $D_p=60$ мкм, $T_p=2000$ К, $u_p=50$ м/с, $T_b=300$ К; толщина покрытия – 150 мкм), но с различным шагом дискретизации $d=d_x=d_y$. Результаты расчетов показаны на рисунках 3.52 и 3.53.

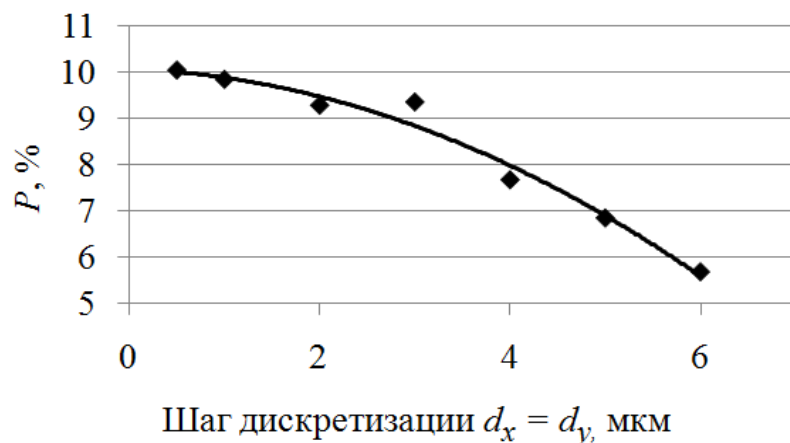


Рис 3.52. Зависимость общей пористости покрытия от шага дискретизации $d=d_x=d_y$: маркерные точки - результаты модельных экспериментов, сплошная линия – аппроксимация в виде тренда

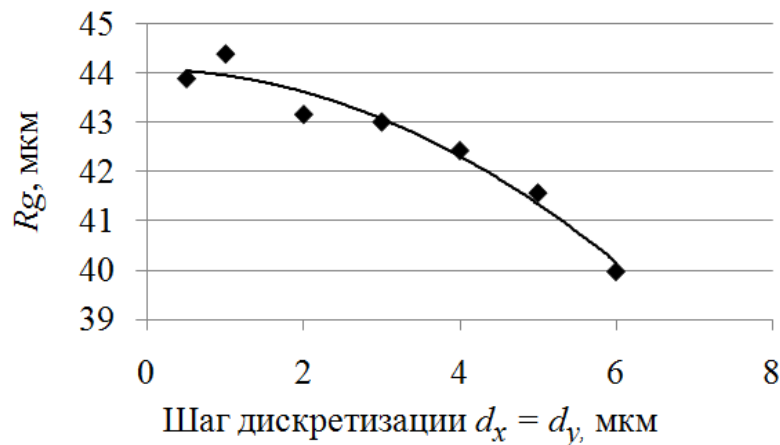


Рис 3.53. Зависимость средней шероховатости покрытия от шага дискретизации $d=d_x=d_y$: маркерные точки – результаты модельных экспериментов, сплошная линия – аппроксимация в виде тренда

Результаты экспериментов подтвердили необходимое для моделирования условие о том, что с уменьшением шага дискретизации параметры пористости и шероховатости покрытия стабилизируют свои значения. Графические зависимости, представленные на рис. 3.52 и 3.53 позволяют вносить поправки результатов моделирования при последующем практическом использовании программного комплекса, так как при очень малых шагах дискретизации ($1 < d < 1,5$ мкм) время, затрачиваемое на моделирование даже одного кластера покрытия, занимает уже несколько часов чистого счета (время счета с уменьшением шага дискретизации растет нелинейно).

3.7.3. Исследование зависимостей изменения функциональных характеристик покрытия от изменения КФП

В работе был выполнен цикл вычислительных экспериментов по исследованию влияния КФП на функциональные характеристики покрытия. В данных экспериментах моделировалось напыление частиц никеля на плоскую медную подложку, размеры которой во всех расчетах были фиксированы и равны 2х2 мм. Толщина напыляемого слоя была 150 мкм. Полученные

зависимости приведены на рисунках 3.54-3.64, на которых маркерные точки – результаты модельных экспериментов, а сплошная линия – аппроксимация, показывающая тренд. Для того, чтобы можно было оценить роль вклада каждого КФП в адгезионную прочность, все зависимости определялись при одних и тех же значениях остальных параметров, которые не варьировались в каждом сеансе моделирования покрытия.

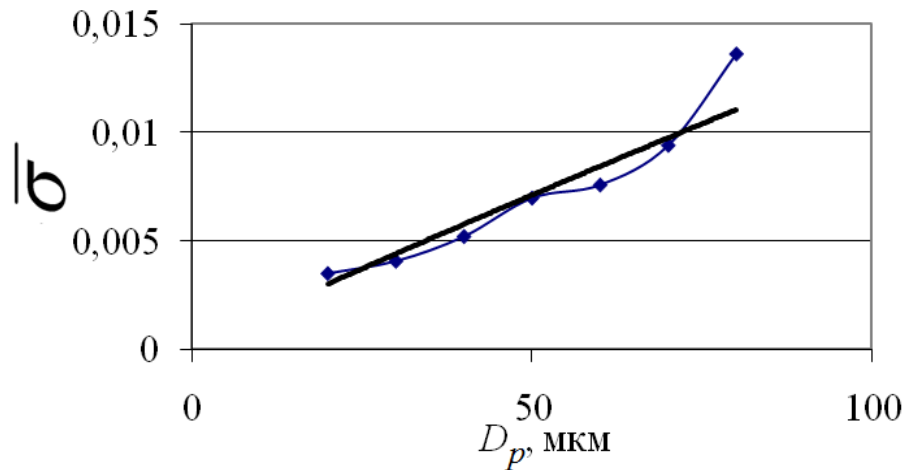


Рис 3.54. Зависимость относительной прочности связи покрытия с подложкой от диаметра напыляемых частиц: $T_p=2000$ К, $u_p=70$ м/с, $T_b=300$ К

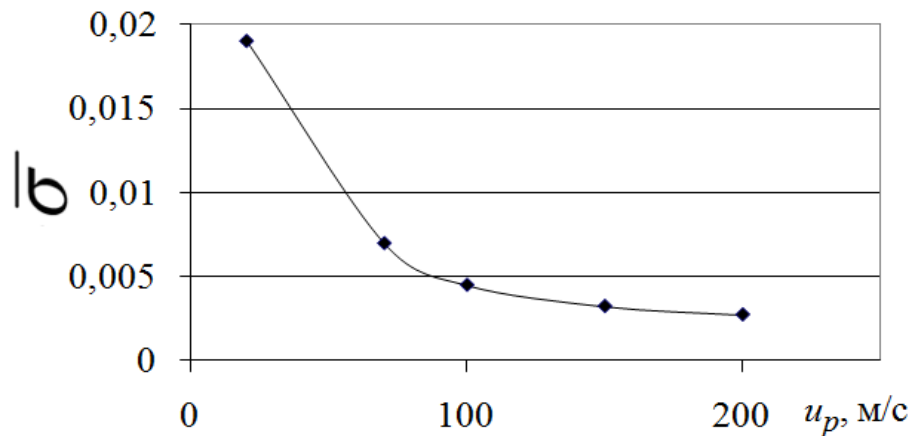


Рис 3.55. Зависимость относительной прочности связи покрытия с подложкой от скорости напыляемых частиц:

$D_p=50$ мкм, $T_p=2000$ К, $u_p=20-200$ м/с, $T_b=300$ К

С увеличением диаметра напыляемых частиц увеличивается прочность сцепления покрытия с подложкой (рис 3.54), поскольку при прочих равных условиях увеличивается время формирования сплэта при фиксированной контактной температуре.

Как видно из рис. 3.55, адгезионная прочность с увеличением скорости частиц уменьшается. Это связано с тем, что уменьшается время формирования сплэта, которого оказывается не достаточно для формирования прочной связи. Кроме того, при возрастании скорости напыляемых частиц, при прочих равных условиях, происходит уменьшение толщины сплэтов, что приводит к более быстрому их охлаждению. Все сказанное приводит к уменьшению времени химического реагирования на границе раздела «сплэт - подложка».

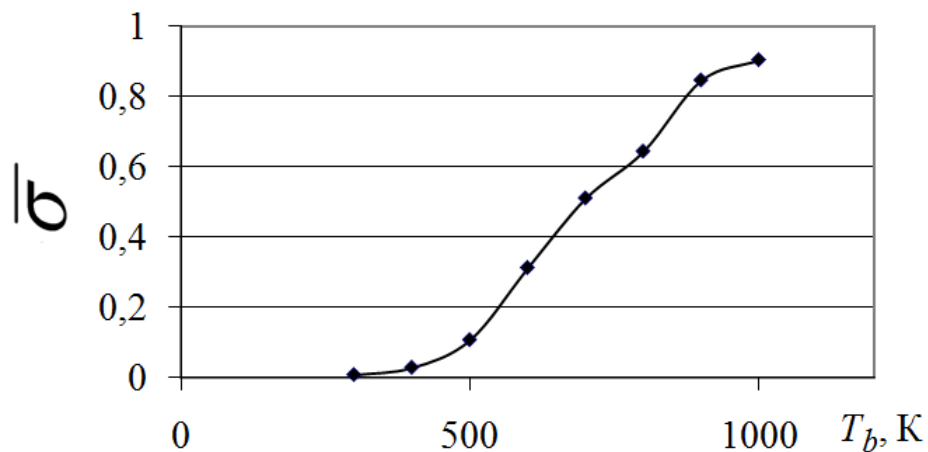


Рис 3.56. Зависимость адгезионной прочности от изменения температуры

подложки: $D_p=50$ мкм, $T_p=2000$ К, $u_p=70$ м/с, $T_b=300-1000$ К

Как видно из материалов, представленных на рис. 3.56 и 3.57, прочность связи покрытия с подложкой нелинейно растет при увеличении температуры частиц и подложки. Это приводит к увеличению контактной температуры, в результате чего большему количеству атомов подложки, находящихся в контакте с атомами частицы, передается часть энергии активации, и, следовательно, большее число атомов подложки вступают в химическое

взаимодействие с атомами частицы. В случае установления в зоне контакта температуры выше температуры плавления обоих материалов, происходит взаимодействие расплавленных слоев материалов частицы и подложки, при котором может иметь место приваривание частицы к подложке, а значение адгезионной прочности достигать своего максимального значения.

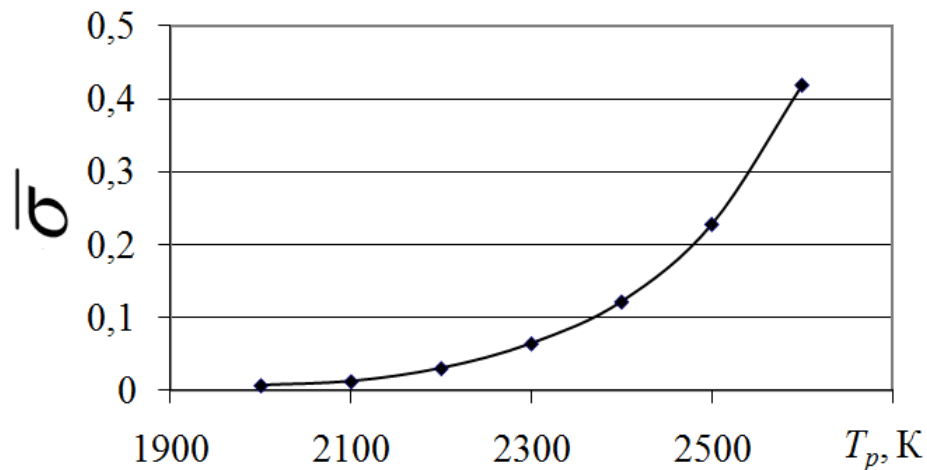


Рис 3.57. Зависимость адгезионной прочности от изменения температуры частиц: $D_p=50$ мкм, $T_p=2000-2600$ К, $u_p=70$ м/с, $T_b=300$ К

Температура подложки вносит более существенный вклад в температуру контакта, т.к. масса подложки существенно больше общей массы частиц. При увеличении температуры частиц и подложки на одну и ту же величину подложка приобретет больше энергии, а значит, дает больший вклад в адгезию. Результаты модельных экспериментов подтверждают широко используемый на практике прием увеличения прочности покрытий путем подогрева подложки.

На рис. 3.58 отражена зависимость изменения пористости от изменения размеров напыляемых частиц, на которой отмечается уменьшение пористости.

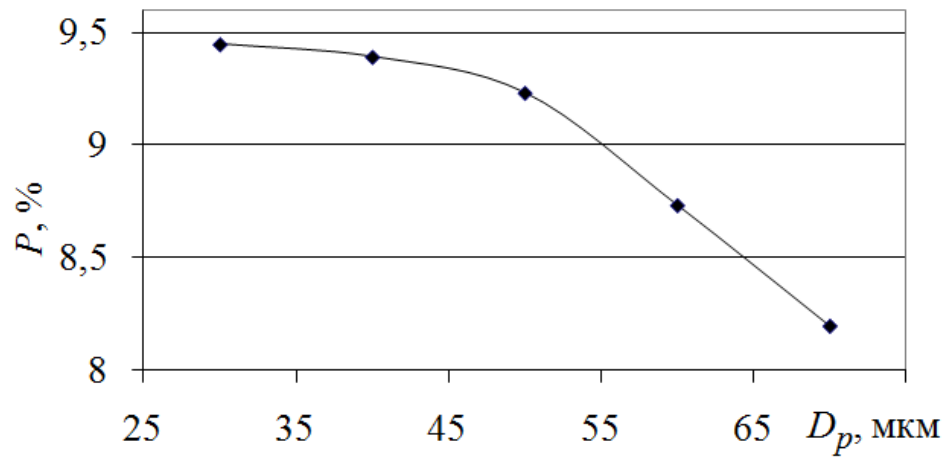


Рис 3.58. Зависимость пористости покрытия от изменения размера частиц:

$$D_p=30-70 \text{ мкм}, T_p=2000 \text{ К}, u_p=50 \text{ м/с}, T_b=300 \text{ К}$$

На рисунках 3.59 и 3.60 иллюстрируется зависимость пористости покрытия от изменения температур частиц и подложки, соответственно. Данное увеличение температур, при прочих равных условиях, приводит к увеличению диаметров сплэтов и, следовательно, аналогично зависимости, приведенной на рис. 3.58, должно приводить к уменьшению пористости.

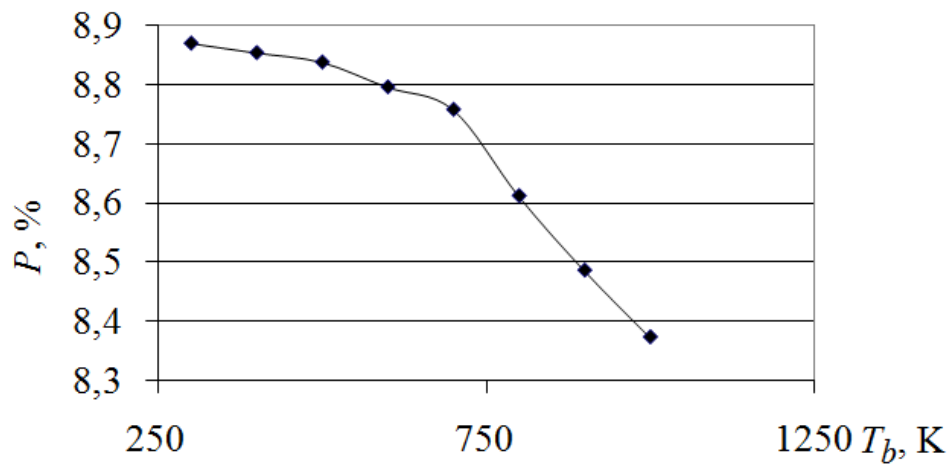


Рис 3.59. Зависимость пористости покрытия от изменения температуры

$$\text{подложки: } D_p=60 \text{ мкм}, T_p=2000 \text{ К}, u_p=50 \text{ м/с}, T_b=300-1000 \text{ К}$$

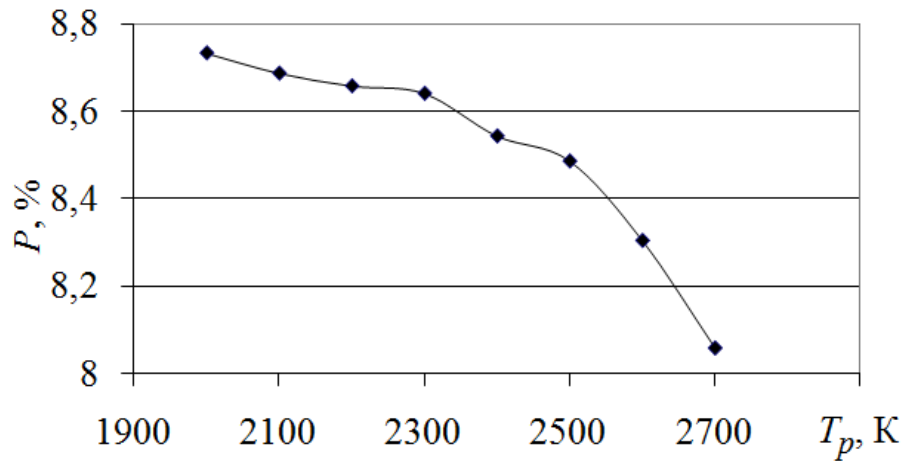


Рис 3.60. Зависимость пористости покрытия от изменения температуры частиц: $D_p=60$ мкм, $T_p=2000-2700$ К, $u_p=50$ м/с, $T_b=300$ К

Расчетная зависимость изменения пористости покрытия от изменения скорости частиц, на которой отмечается уменьшение пористости с ростом скорости напыляемых частиц, приведена на рис. 3.61.

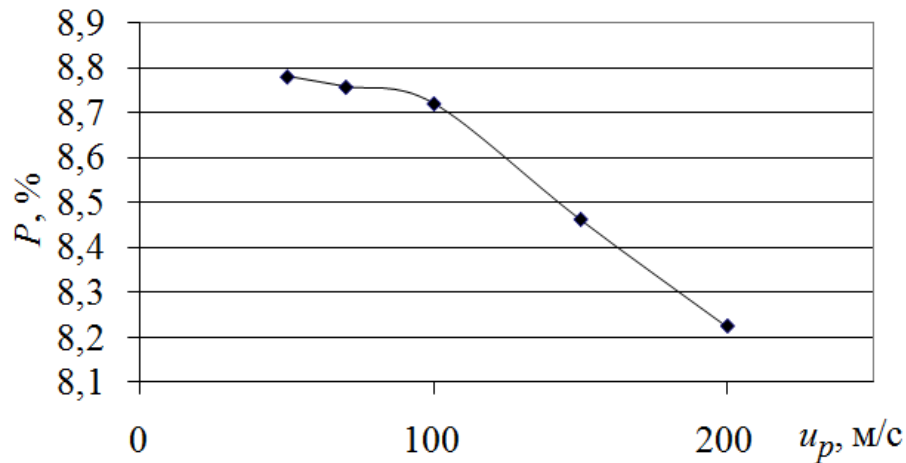


Рис 3.61. Зависимость пористости покрытия от скорости частиц: $D_p=60$ мкм, $T_p=2000$ К, $u_p=50-200$ м/с, $T_b=300$ К

Характер данной зависимости общеизвестен, поскольку эта закономерность стимулировала развитие различных методов газотермического напыления. В частности, известен метод сверхзвукового напыления HVOF, для которого характерны повышенные скорости напыляемых частиц. Покрытия,

получаемые этим способом, обладают малой пористостью (порядка 1-3%). Результаты моделирования, приведенные на рис. 3.61, которые отвечают диапазону скоростей, характерному для широко используемого атмосферного плазменного напыления (APS), находятся диапазоне значений пористости 6-15%, типичном для этого метода.

Рисунки 3.62-3.64 отражают зависимость средней шероховатости покрытия от изменения КФП. Для плазменного напыления свойственен широкий диапазон значений шероховатости поверхности покрытия, которые могут принимать значения от десятков до сотен микрон. Разработанная нами модель в достаточной степени идеализирована, поскольку оперирует значениями параметров, полученными с помощью датчиков «псевдослучайных» чисел, близким к идеальным.

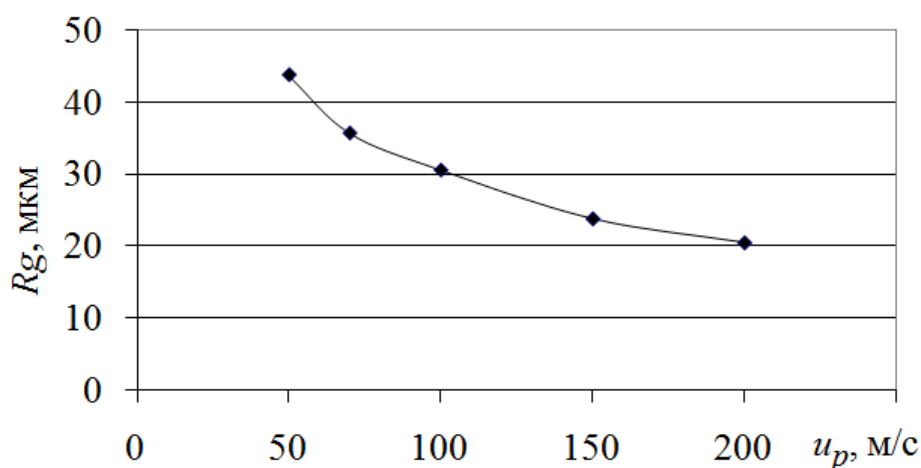


Рис 3.62. Зависимость средней шероховатости покрытия от скорости частиц:

$$D_p=60 \text{ мкм}, T_p=2000 \text{ К}, u_p=50-200 \text{ м/с}, T_b=300 \text{ К}$$

В реальном процессе плазменного напыления шероховатость является следствием: 1) неравномерности и нестационарности процесса загрузки струи порошком, которая даже при равномерного перемещения подложки относительно пятна напыления наследуется напыляемым покрытием; 2) неоднородностью распределений расхода порошковых частиц, их скорости и температуры в сечении пятна напыления. Поэтому полученные зависимости можно считать качественными и применимыми для достаточно идеализированных условий.

Рисунок 3.62 характеризует зависимость средней шероховатости покрытия от скорости частиц, которая показывает практически двухкратное снижение средней шероховатости покрытия в диапазоне скоростей частиц от 50 до 200 м/с.

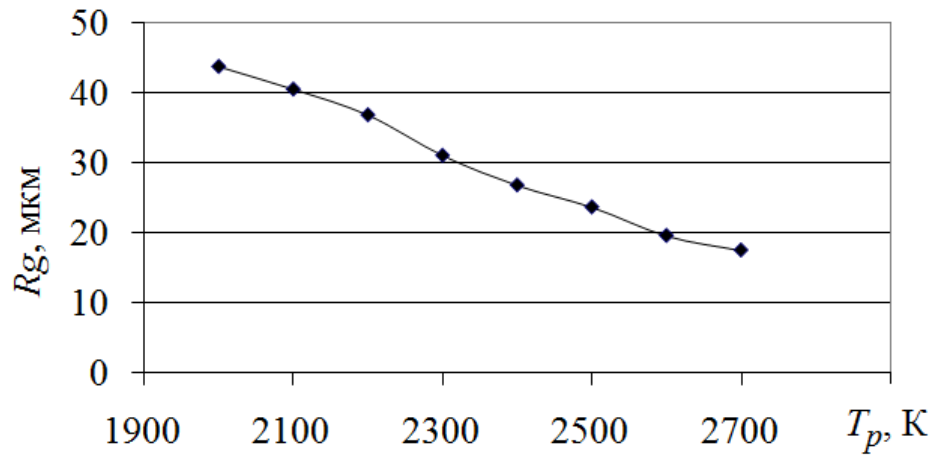


Рис 3.63. Зависимость средней шероховатости покрытия от изменения температуры частиц: $D_p=60$ мкм, $T_p=2000-2700$ К, $u_p=50$ м/с, $T_b=300$ К

В работе также производилась попытка установления зависимости шероховатость покрытий от размеров частиц. Вычислительные эксперименты показали, что с изменением размеров частиц в диапазоне от 30 до 70 мкм шероховатость покрытий оказалось подверженной флуктуации относительно среднего значения 35 мкм, и ее зависимость от изменения диаметра частиц установить не удалось.

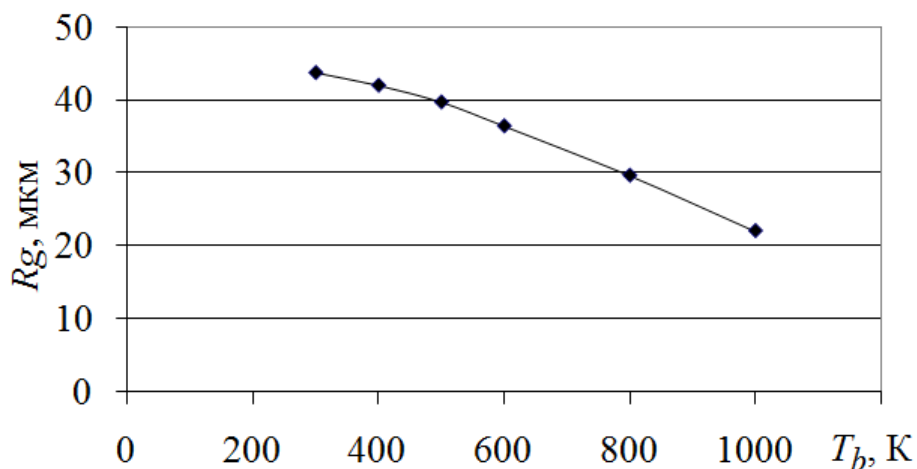


Рис 3.64. Зависимость средней шероховатости покрытия от изменения температуры подложки: $D_p=60$ мкм, $T_p=2000$ К, $u_p=50$ м/с, $T_b=300-1000$ К

Выводы по главе 3

Завершая описание подсистемы «ПОКРЫТИЕ» созданного проблемно-ориентированного программного комплекса, можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что моделирование всего покрытия требует больших вычислительных затрат, поэтому для изучения свойств покрытий имеет смысл моделировать только кластер покрытия (КП) и анализировать его характеристики.

2. Разработан и программно реализован комплекс эффективных алгоритмов, обеспечивающий математическое моделирование процесса растекания и затвердевания капли расплава на поверхности основы с произвольно заданным рельефом, учитывающий радиальную и нормальную составляющую скорости вязкого растекания капли, изменение угла затекания расплава в углубления на поверхности, а также сглаживание поверхности растекшегося слоя под действием сил поверхностного натяжения. Все сказанное позволяет более достоверно определять форму сплэта, пор и поверхности покрытия.

3. Произведено тестирование реализованных эффективных алгоритмов проблемно-ориентированного программного комплекса на поверхностях со сложным рельефом, что позволяет сделать заключение об адекватности выбранного подхода.

4. Реализована методика оценки характеристик получаемых покрытий, включающая оценку пористости и шероховатости КП, а также относительной адгезионной прочности сцепления покрытия с подложкой.

5. Реализованные подсистемы объединены в единый проблемно-ориентированный программный комплекс и дополнены интерфейсом, обеспечивающим наглядное 2D- и 3D- отображение результатов расчета.

6. Результаты, полученные при моделировании покрытий, качественно, а в ряде случаев и количественно согласуются с экспериментальными дан-

ными, а также обладают свойством сходимости при уменьшении шага дискретизации.

7. Выполнено исследование зависимостей изменения функциональных характеристик покрытия из частиц никеля, напыляемого на медную подложку от изменения ключевых физических параметров. Полученные зависимости дают представление о характере изменения свойств покрытий при различных режимах напыления и могут быть полезны исследователям, инженерам и технологам для поиска оптимальных режимов при проектировании порошковых покрытий различного функционального назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, полу-

ченных 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Madejski J. Solidification of Droplets on a Cold Surface / Int. J. Heat Mass Transfer. 1976. Vol. 19. P. 1009-1013.
2. Попов В.Н. Моделирование затвердевания металлической капли на холодной подложке // Математическое моделирование. 2001. Т.13, № 9. С. 119-127.
3. Lugscheider E., Bobzin K., Nickel R. Application of Multiscale Modeling in the Coating Formation Simulation of APS-PYSZ-TBCs / Proc. of the 2006 Int. Thermal Spray Conf.. 2006. P. 537-544.
4. Bae G., Kang K., Na H., Lee C. Thermally Enhanced Kinetic Sprayed Titanium Coating: Microstructure and Property Improvement for Potential Applications / Thermal Spray 2009: Proc. of the Int. Thermal Spray Conf.. 2009. P. 290-295.
5. Ilyuschenko A., Lakubenya A., Gromyko G., Zayats G. Mathematical Modeling of Deformation and Solidification of Molten Droplet on a Flat Substrate in a Plasma Spray Process / Proc. of the 2001 Int. Thermal Spray Conf.. 2001. P. 959-966.
6. Maruo H., Hirata Y., Matsumoto Y. Deformation and Solidification of a Molten Droplet by Impact on a Planar Substrate / Proc. of the 14th Int. Thermal Spray Conf.. 1995. Vol. 1. P. 341-346.
7. Bertagnolli M., Marchese M., Jacucci G. Modeling of Particles Impacting on a Rigid Substrate under Plasma Spraying Conditions / J. of Thermal Spray Technology. 1995. Vol. 4 (1). P. 41-49.
8. Mostaghimi J., Chandra S. Splat Formation in Plasma-Spray Coating Process / Pure Appl. Chem.. 2002. Vol. 74 (3). P. 441-445.
9. Trapaga G., Matthys E., Valencia J.J., Szekely J. Fluid-flow, heat-transfer, and solidification of molten-metal droplets impinging on substrates: Comparison of numerical and experimental results / Metallurgical Transactions B.. 1992. Vol. 23 (6). P. 701-718.
10. Li W.-Y., Liao H., Coddet C., Li C.-J., Bang H.-S. Modeling on Deformation Behavior of Al Particles Impacting on Al Substrate and Effect of Surface Oxide Films on Interfacial Bonding in Cold Spraying / Proc. of the 2007 Int. Thermal Spray Conf.. 2007. P. 248-253.

11. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.
12. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белашенко В.Е., Солоненко О.П., Сафиуллин В.А. Нанесение покрытия плазмой. М.: Наука, 1990. 408 с.
13. Солоненко О.П., Алхимов А.П., Марусин В.В., Оришич А.М., Рахимьянов Х.М., Салимов Р.А., Щукин В.Г., Косарев В.Ф. Высокоэнергетические процессы обработки материалов. Новосибирск: Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 425с.
14. 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.
15. O.P. Solonenko Fundamental problems of plasma-spraying / Thermal Spray: Int. Advances in Coating Technology, Proc. of the 13th Intern. Thermal Spray Conf., 28 May – 5 June, 1992, Orlando, Florida. USA: ASM Int.. P. 787-792.
16. O.P. Solonenko, M.F. Zhukov State-of-the art of thermophysical fundamentals of plasma spraying, In book: Thermal Plasma and New Materials Technology, Cambridge. England: Cambridge Int. Science Pub., 1995. Vol.2. P. 7-97.
17. O.P. Solonenko, A.V. Smirnov Conjugate heat transfer and phase transitions during a metallic drops flattening and solidification on a substrate / Proc. of 3rd European Congress on Thermal Plasma Processes, 19-22 September 1994, Aachen. Germany, 1994. P. 504-516.
18. O.P. Solonenko, A.V. Smirnov, A. Ohmori, Sh. Matsuno Deformation and solidification of melt microdroplets impinging on substrate. Theory and experiment. / Proc. of 14th Intern. Thermal Spray Conf., 25-28 May 1995, Kobe, Japan. P. 359-364.
19. O.P. Solonenko, A.V. Smirnov Comparative analysis and testing of different theories characterizing a diameter and thickness of plasma sprayed splats / Proc. of 12th Intern. Symp. on Plasma Chemistry, Minneapolis, USA, 1995. P.921-926.

20. O.P. Solonenko, A.V. Smirnov Generalized map of the plasma sprayed splats formation / Proc. of 3rd Asia-Pacific Conf. on Plasma Science and Technology, Tokyo, 15-17 July, Japan, 1996. P. 247-252.
21. O.P. Solonenko, A.V. Smirnov Criterion of stable formation of plasma sprayed splats on a smooth substrate / Proc. of 13th Intern. Symp. on Plasma Chemistry, Beijing, China, 1997. P. 1422-1427.
22. О.П. Солоненко, А.В. Смирнов Соударение капли расплава с поверхностью. Теория и модельный эксперимент // Доклады РАН. 1999. Т. 363, № 1. С. 46-49.
23. Steinke T., Baker M. Monte Carlo Simulation of Thermal Sprayed Coatings / Proc. of the 2006 Int. Thermal Spray Conf.. 2006. P. 329-334.
24. Parizi H.B., Rosenzweig L., Mostaghimi J., Chandra S., Coyle T., Salimi H., Pershin L., McDonald A., Moreau C. Numerical Simulation of Droplet Impact on Patterned Surfaces / Proc. of the 2007 Int. Thermal Spray Conf.. 2007. P. 213-218.
25. Кундас С.П., Достанко А.П., Ильющенко А.Ф., Кузьменков А.Н., Lugscheider E., Eritt U. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий. Мн.: Бестпринт, 1998. 212 с.
26. Предтеченский М.Р., Черепанов А.Н., Попов В.Н., Варламов Ю.Д. Исследование динамики соударения и кристаллизации жидкометаллической капли с многослойной подложкой // Прикладная механика и техническая физика. 2002. Т. 43, №1. С. 112-123.
27. Trapaga G., Szekely J. Mathematical-modeling of the isothermal impingement of liquid droplets in spraying processes / Metallurgical Transactions B.. 1991. Vol. 22 (6). P. 901–914.
28. Hale D. L., Berry R. A. Development of a Coupled Model to Predict Droplet Deformation and Solidification During Splatting / Proc. of the 2001 Int. Thermal Spray Conf.. 2001. P. 975-983.
29. Bussmann M., Mostaghimi J., Chandra S. On a three dimensional volume tracking model of droplet impact / Phys. Fluids. 1999. Vol. 11 (6). P. 1406-1417.
30. Bussmann M., Chandra S., Mostaghimi J. Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface / Phys. Fluids 12 (12), 2000. P. 3121-3132.

31. Raessi M., Mostaghimi J., Bussmann M. Droplet Impact During the Plasma Spray Coating Process – Effect of Surface Roughness on Splat Shapes / Proc. of 17th Int. Symposium on Plasma Chemistry. 2005. P. 916-917.
32. Xue M., Mostaghimi J., Chandra S. Formation of Pores in Thermal spray Coatings due to Incomplete Filling of Voids under Solid Particles / Proc. of the 2006 Int. Thermal Spray Conf.. 2006. P. 1143-1148.
33. Knotek O., Elsing R. Monte Carlo simulation of the lamellar structure of thermally sprayed coatings / Surf. Coat. Technol.. 1987. Vol 32. P. 261-272.
34. Liu H., Krishnan S., Marella S., Udaykumar H.S. Sharp interface Cartesian grid method II: A technique for simulating droplet interactions with surfaces of arbitrary shape / J. of Computational Phys., 210. 2005. P. 32-54.
35. Chandra S., Fauchais P. Formation of Solid Splats During Thermal Spray Deposition / J. of Thermal Spray Technology.. 2009. Vol. 18(2). P. 148-180.
36. Клименов В.А., Негрескул С.И., Солоненко О.П., Остапенко С.А. Компьютерное моделирование укладки частиц при газотермическом напылении. Томск: Инст. физ. прочн. и материаловедения СО РАН, 1993. 23 с.
37. Kalita V.I., Gnedovets A.G. Plasma Spraying of Capillary Porous Coatings: Experiments, Modeling, and Biomedical Applications / Plasma Processes and Polymers.. 2005. Vol. 2. P. 485-492.
38. Cirolini S., Harding H., Jacucci G. Computer Simulation of Plasma-Sprayed Coatings Deposition Model / Surface and Coatings Technology. №48. 1991. P. 137-145.
39. Cirolini S., Marchese M., Harding J.H., Mulheran P.A. Modeling the Microstructure of Thermal Barrier Coatings / Materials and Design Technology. № 162. 1994. P. 189-198.
40. Kanouff M.P., Nieser R.A., Roemer T.J. Surface Roughness of Thermal Spray Coating Made with Off- Normal Spray Angle / J. of Thermal Spray Technology. 1998. 7(2). P. 219-228.
41. Bussmann M., Mostaghimi J., Chandra S. On a three-dimensional volume tracking model of droplet impact / Phys. of Fluids. 1999. 11(6). P. 1406-1417.

42. Pasandideh-Fard M., Bhola R., Chandra S., Mostaghimi J. Deposition of tin droplets on a steel plate: simulations and experiments / *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 1998. Vol. 41, №19. P. 2929-2945.
43. Ghafouri-Azar R., Mostaghimi J., Chandra S. Deposition Model of Thermal Spray Coatings / *Proc. of the 2001 Int. Thermal Spray Conf.*. 2001. P. 951-958.
44. Ghafouri-Azar R., Mostaghimi J., Chandra S., Charmchi M. A Stochastic Model to Simulate the Formation of a Thermal Spray Coating / *J. of Thermal Spray Technology*.. 2003. Vol. 12(1). P. 53-69.
45. Bobzin K., Bagcivan N., Parkot D., Schafer M., Petkovic I. Modeling and Simulation of Microstructure Formation for Porosity Prediction in Thermal Barrier Coatings Under Air Plasma Spraying Condition / *J. of Thermal Spray Technology*.. 2009. Vol. 18(5-6). P. 975-980.
46. Fukanuma H. A Porosity Formation and Flattening Model of an Impinging Molten Particle in Thermal Spray Coatings / *J. of Thermal Spray Technology*.. 1993. Vol. 3(1). P. 33-44.
47. 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.
48. Madejski J. Droplets on impact with a solid surface / *Int. J. Heat Mass Transfer*.. 1983. Vol.26 (7). P. 1095-1098.
49. Liu H., Lavernia E.J., and Rangel R.H. Numerical simulation of impingement of molten Ti, Ni and W droplets on flat substrate// *J. Therm. Spr. Tech.*. 1993. Vol. 2. P. 369-378.
50. Yoshida T. Development of an integrated fabrication process for solid oxide fuel cells by using novel plasma spraying / *Proc. of the Conf. Energy Conversion and Utilization With High Efficiency*, 1990. P. 99-104.
51. Watanabe T., Kuribayashi I., Honda T., Kanzawa A. Deformation and solidification of a droplet on a cold substrate / *Chemical Eng. Science*. 1992. Vol.47 (12). P. 3059-3065.

52. Kanta A.-F., Planche M.-P., Montavon G., Coddet C. In-flight and upon impact particle characteristics modeling in plasma spray process / *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 24, № 8-9. P. 1542-1548.
53. Гасин Д.А., Урюков Б.А. Динамика взаимодействия жидкой частицы с поверхностью / *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.*, 1988. Вып. 3, № 16. С. 95-100.
54. Kurokawa M., Toda S. Heat transfer of an impacted single droplet on the wall// *Proc. ASME/JSME Therm. Eng. Joint Conf.*, 1991. Vol. 2. P. 141-146.
55. Collings E.W., Markworth A.J., McCoy J.K., and Saunder J.H. Splat-quench solidification of freely falling liquid-metal drops by impact on a planar substrate// *J. Mat. Sci.*. 1990. Vol. 25. P. 3677-3682.
56. Cheng L. Dynamic spreading of drops impacting onto a solid surface / *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*. 1977. Vol.16 (2). P. 192-197.
57. Akao F., Araki K., Mori S., Moriyama A. Deformation behaviors of a liquid droplet impinging onto hot metal surface// *Trans. Int. Steel Inst. Japan*, 1980. Vol. 20. P. 737-743.
58. Wachters L.H.J., Westerling N.A.J. The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state// *Chem. Eng. Sci.*. 1966. Vol. 21. P. 1047-1056.
59. Chandra S., Avedisian C. On the Collision of a Droplet with a Solid Surface / *Proc.: Math. and Phys. Sciences*, 1991. Vol. 432, № 1884. P. 13-41.
60. McPherson R. The relationship between the mechanism of formation micro-structure and properties of plasma sprayed coatings / *Thin Solid Films*. 1981. Vol. 83. P. 297-310.
61. Jones H. Cooling, freezing and substrate impact of droplets formed by rotary atomization / *J. Phys. D: Appl. Phys.*. 1971. Vol. 4, P. 1657-1660.
62. Solonenko O.P. Advanced thermophysical fundamentals of “melt droplet - substrate” interaction and its application in thermal spraying / *Werkstofftechnologie auf dem Weg in das Jahrhundert: Vortrage und Veroffentlichungen des gleichnamigen 15. Dortmunder Hochschulkolloquiums am 17, und 18 Oktober 1996 in Dortmund*. P. 47-64.

63. Solonenko O.P. Equilibrium solidification of melt microdroplets under their collision with substrate: theory and its application in thermal spray technology / Thermal Plasma Torches and Technologies. 1999. Vol.2. P. 130-148.
64. Жуков М.Ф., Солоненко О.П., Федорченко А.И. Равновесная кристаллизация расплавленных частиц на поверхности при плазменном напылении / ДАН СССР, 1990. Т. 314, № 2. С. 369-374.
65. Solonenko O.P. Advanced thermophysical fundamentals of melt microdroplet flattening and solidification on a substrate / Proc. of 8th National Thermal Spray Conf.. 1995. P. 237-242.
66. 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.
67. 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.
68. 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.
69. 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.
70. 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.

71. Шикин Е.В., Плис А.И. Кривые и поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователя. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. 240 с.

72. 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.

73. Руссинович М., Соломон Д. Внутреннее устройство Microsoft Windows: Windows Server 2003, Windows XP и Windows 2000. 4-е изд. СПб.: Питер, 2005. 970 с.

74. Бледнов В.А., Иордан В.И., Солоненко О.П. Расширение доступа к оперативной памяти за счет «параллелизма приложений» в задачах моделирования порошковых покрытий на компьютере с многоядерным процессором // Многоядерные процессоры и параллельное программирование. Системы обработки сигналов на базе ПЛИС и цифровых сигнальных процессоров: сб. ст. регион. науч.-практ. конф.. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2011. – С. 20-25.

75. 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.

76. 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.

77. Краснов М. OpenGL графика в проектах Delphi. Серия «Мастер». СПб., БХВ-Санкт-Петербург, 2002. 352 с.