

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам директора по ИР Института
физики прочности и материаловедения
СО РАН

д.ф.-м.н. Лотков А.И.


10 декабря 2014 г.



Отзыв

ведущей организации на диссертационную работу

Колесниковой Елены Александровны «Температурное условие адгезии и определение температурных полей в системе «капля-подложка», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы. Диссертационная работа Колесниковой Елены Александровны посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию адгезии капли металла на металлической поверхности и определению температурных полей в системе «капля-подложка». Вопрос адгезии и определение температурных условий, влияющих на этот процесс, в системе «металлическая капля – подложка» является актуальным. Актуальность работы заключается в получении достоверных расчетных данных при определении оптимальных диапазонов технологического процесса, требуемых для достижения качественной адгезии металлических покрытий на металлических поверхностях. Предложенное температурное условие адгезии в системе «капля – подложка» позволяет при заданных температурах капли и подложки и известных теплофизических характеристик материалов (теплоемкость, теплопроводность, плотность), определить минимальные температуры капли и подложки, соответствующие условиям возникновения процесса адгезии капли к подложке.

Цель диссертационной работы Колесниковой Е. А. – экспериментальное и расчетное определение температурного условия адгезии металлической капли к металлической подложке и расчет температурных полей методом выравнивания температур малых соседних кубических объемов в системе «капля-подложка» для

оптимизации технологического процесса при нанесении металлических покрытий на металлическую основу.

Анализ содержания диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка используемой литературы из 136 наименования. Диссертация изложена на 116 страницах, включая 28 рисунков и 6 таблиц.

Во введении дается краткое обоснование выбора темы диссертации, ее актуальность, сформулирована цель, задачи исследований, изложены положения, выносимые на защиту. Приведена научная и практическая значимость работы.

В **первой главе** работы представлен обзор и анализ литературы по рассматриваемой проблеме. Рассмотрено современное состояние вопроса взаимодействия расплавленных частиц порошковых материалов с поверхностью металлической подложки. Проведен анализ существующих критериев достижения качественной адгезии и обзор физических и математических моделей процесса взаимодействия расплавленной капли с подложкой. Рассмотрены факторы, влияющие на условие достижения качественной адгезии, к которым относятся состояние поверхности, на которую наносится покрытие, формы сплэта, температуры подложки, давление и состав газов окружающей среды. Отмечено, что в анализируемых работах отсутствует температурное условие достижения адгезии.

Автором проведен анализ расчетных методов определения температурного поля при нанесении расплавленных частиц на подложку. Рассмотрены методы конечных разностей, конечных элементов. Особое внимание уделено приближенному методу Ваничева А.П. для решения задач теплопроводности при переменных константах как наиболее близкому к предложенному в третьей главе методу выравнивания температур малых соседних кубических объемов. В завершении главы сформулированы выводы, в которых отмечено, что учет наличия или отсутствия адгезии в системе «капля-подложка» до сих пор представляет проблему для расчетов, и что, несмотря на прогресс в численном моделировании процесса нанесения капли на подложку, сохраняется необходимость в разработке и усовершенствовании расчетных методов.

Во **второй главе** рассматривается процесс адгезии металлического сплэта на металлическую подложку. Получено выражение начальной контактной температуры для случая, когда она не превышает температуру плавления подложки. На основе начальной контактной температуры получено расчетное температурное условие, определяющее достижение адгезии капли при известных температурах и величинах теплопроводности, теплоемкости и плотности материалов капли и подложки. Основой условия достижения адгезии является необходимость плавления металла подложки под каплей. Сделан вывод, что частичному плавлению поверхности под каплей соответствует неполная адгезия, а полному плавлению контактной поверхности подложки - максимальная адгезия. Адекватность полученных температурных условий адгезии подтверждается экспериментами по осаждению капель олова и свинца на оловянную и свинцовую подложки. Показано отсутствие заметного влияния диффузии на процесс адгезии.

В **третьей главе** рассматривается предложенная автором методика расчета нестационарного температурного поля в системе «капля – подложка» методом выравнивания температур малых соседних кубических объемов. Метод, предложенный автором, апробирован на примерах расчета температурного поля бесконечной пластины и шара. Приведенные в обоих случаях результаты соответствуют известным результатам, полученным при аналитическом расчете. Адекватность определения температурного поля методом выравнивания малых соседних кубических объемов подтверждается экспериментально полученными значениями температур поверхности образца, моделирующего бесконечную пластину во времени.

В **четвертой главе** представлены результаты численного расчета температурных полей методом выравнивания температур малых соседних кубических объемов и исследовано изменение границы между жидкой и твердой фазами в системе «капля-подложка». Для полусферического сплэта разных форм и подложки рассчитана глубина плавления подложки на оси симметрии системы «капля-подложка». Показано, что форма сплэта влияет как на время плавления и затвердевания подложки, так и на форму границы плавления и ее движение.

Новизна полученных результатов.

1. На основе выражения для расчета контактной температуры между каплей расплава и подложкой получено температурное условие адгезии в системе «капля–подложка», позволяющее оценить адгезию сплэта на поверхности подложки в зависимости от начальных температур и теплофизических характеристик материалов капли и подложки.

2. Предложена методика расчета температурного поля в системе «капля – подложка», основанная на методе выравнивания температур малых соседних кубических объемов, учитывающая фазовые переходы и зависимость теплофизических характеристик материалов капли и подложки от температуры. Адекватность и достоверность методики подтверждена тестовыми расчетами и экспериментальными результатами.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций. Автор корректно использует известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Колесникова Е.А. изучила и проанализировала методы определения достижения адгезии и методы расчета температурных полей. Достоверность полученных экспериментальных результатов, научных положений и выводов обеспечивается корректностью постановки цели работы, решаемых задач, их физической обоснованностью, хорошим уровнем экспериментальных исследований с применением современных методов, а также непротиворечивостью полученных результатов существующим представлениям об адгезии и расчете температурных полей. Результаты сравнения полученных результатов с известными литературными данными показывают хорошее качественное согласие результатов.

Практическая ценность работы.

1. Получено температурное условие адгезии в системе «капля–подложка», позволяющее оценить адгезию капли на поверхности подложки в зависимости от начальных температур и теплофизических характеристик материалов капли и подложки, что может быть использовано для выбора оптимальных режимов процесса термического нанесения порошковых материалов.

2. Представлена методика расчета температурного поля в системе «капля-подложка» методом выравнивания температур малых соседних кубических объемов, которая может быть использована для расчета нестационарных температурных полей.

По работе сделаны следующие замечания.

1. Проверка температурного условия адгезии проводилась на металлах с низкой температурой плавления. Рекомендовано провести подобные эксперименты с материалами, имеющими более высокую температуру плавления.

2. Не проведена оценка временных и ресурсных затрат для предложенного метода выравнивания температур малых соседних кубических объемов по сравнению с имеющими наибольшее применение методами конечных разностей и метода конечных элементов.

Высказанные замечания принципиально не влияют на общую положительную характеристику работы. В целом, работа выполнена на высоком научном и профессиональном уровне. Ее результаты опубликованы в 13 печатных работах, в том числе в 6 статьях, 3 из которых – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация соответствует п.2. «Исследование и разработка рекомендаций по повышению качества и улучшению теплофизических свойств веществ в жидком, твердом (кристаллическом и аморфном) состояниях для последующего использования в народном хозяйстве» паспорта специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа Колесниковой Елены Александровны «Температурное условие адгезии и определение температурных полей в системе «капля-подложка», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника представляет собой законченное исследование соответствует всем требованиям пунктов 9 – 14, предъявляемым к кандидатской диссертации «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г., №842, а ее автор Колесникова Елена Александровна заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен на заседании расширенного семинара лаборатории физики наноструктурных биокompозитов Института физики прочности и материаловедения СО РАН, протокол № 43 от 9 декабря 2014 г.

Председатель семинара,
зав. лабораторией физики наноструктурных
биокompозитов Института физики прочности и
материаловедения СО РАН,
доктор физ. – мат. наук, профессор



Шаркеев Ю.П.

Секретарь семинара,
научный сотрудник лаборатории
физики наноструктурных биокompозитов
Института физики прочности и
материаловедения СО РАН,
кандидат технических наук



Ерошенко А.Ю.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИФПМ СО РАН)

Адрес: 634021, Российская Федерация,

г. Томск, просп. Академический, 2/4

Телефон: +7 (3822) 492-850;

E-mail: sharkeev@ispms.tsc.ru

Сайт ИФПМ СО РАН: <http://www.ispms.ru>

Шаркеев Юрий Петрович

Ерошенко Анна Юрьевна