

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Колесниковой Елены Александровны "ТЕМПЕРАТУРНОЕ УСЛОВИЕ АДГЕЗИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМЕ «КАПЛЯ – ПОДЛОЖКА»", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы диссертации. Растекание и затвердевание капель металлических расплавов при их соударении с поверхностью твердой подложки представляет известный интерес для различных высоких технологий, включая: APS, LPPS, HVOF, детонационное напыление, электродуговую металлизацию, микропайку в электронике, спленингование для получения аморфных и микрокристаллических порошков и т.п. При этом сценарии формирования сплэтов (растекшихся и затвердевших на подложке частиц) могут существенно различаться и зависят от температуры, которая устанавливается в контакте "растекающаяся капля расплава - основа". В свою очередь, контактная температура определяется теплофизическими свойствами материалов частицы и подложки, а также ключевыми физическими параметрами (КФП): скорость, размер и температура капли, температура подложки и состояние ее поверхности.

Изучение особенностей взаимодействия капли расплава с основой остается по-прежнему актуальной задачей, несмотря на большой объем исследований, проведенных за последние 30 лет. Это связано с рядом причин, к числу которых можно отнести: 1) недостаточность детальной информации о протекающих в зоне взаимодействия гидродинамических и теплофизических процессов из-за отсутствия до последнего времени надежных экспериментальных методик, обеспечивающих требуемое быстрое действие при одновременном измерении температуры, скорости и размера микрокапель непосредственно перед соударением с подложкой; 2) невозможность локального измерения температуры в объеме растекающейся капли расплава и в основе, включая границу раздела капля – поверхность с использованием бесконтактных методов диагностики; 3) отсутствие достаточно надежных, физически обоснованных, практически апробированных и информативных теоретических моделей явления, позволяющих проводить критериальное обобщение и интерпретацию получаемых экспериментальных данных; 4) отсутствие представительного банка модельных данных по сплэтам для верификации физико-математических моделей и программных кодов, используемых для прямого численного моделирования растекания и затвердевания микрокапель расплавов, соударяющихся с основой.

Учитывая сказанное, тема и цели диссертационной работы являются, несомненно, *актуальными*.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 139 наименований. Работа изложена на 116 страницах текста, включая 28 рисунков и 6 таблиц.

Во *введении* выполнено обоснование актуальности диссертационной работы, сформулированы: цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения об апробации полученных результатов.

В *первой главе* выполнен краткий обзор и анализ современного состояния проблемы формирования сплэтов при взаимодействии расплавленных порошковых частиц с поверхностью подложки в условиях газотермического напыления (ГТН). Основное внимание диссертанта уделено анализу существующих физических и математических моделей, используемых для описания процесса взаимодействия расплавленной частицы с подложкой, а также подходов для оценки прочности связи сформированного сплэта с подложкой.

Отмечается, что, несмотря на постоянное совершенствование технологий ГТН, вопросы дальнейшего улучшения функциональных характеристик покрытий, прежде всего, прочности связи с подложкой остаются актуальными, и требуют дальнейших исследований.

К сожалению, уже начиная с обзора и далее по тексту, по мере изложения результатов, заметна ограниченность представлений автора о многообразии процессов при газотермическом напылении и, в частности, при формировании сплэтов. По-видимому, диссертант не знаком с монографией (Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О.П. Солоненко, А.П. Алхимов, В.В. Марусин и др. - Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. - 425 с.), в которой подробно анализируются и экспериментально иллюстрируются 4 базовых сценария формирования сплэтов на примере соударения капель металлических расплавов с металлическими подложками. В зависимости от соотношения между температурой T_c , устанавливающейся в контакте, и температурами T_{pm} и T_{bm} плавления материалов частицы и основы, формирование сплэтов реализуется по одному из базовых сценариев:

(1) – растекание и одновременное затвердевание капли на твердой подложке и последующее охлаждение сплэта ($T_{pm} > T_c < T_{bm}$);

(2) – растекание, затвердевание капли и одновременное подплавление основы в пятне контакта с частицей с последующим затвердеванием подплавленного слоя и охлаждением системы “сплэт – подложка” ($T_{pm} > T_c \geq T_{bm}$);

(3) – полное растекание капли на твердой основе, последующее охлаждение и затвердевание жидкого слоя с одновременным его сворачиванием под действием сил поверхностного натяжения ($T_{pm} \leq T_c < T_{bm}$);

(4) – полное растекание капли с одновременным подплавлением основы в пятне контакта ее с частицей, последующее охлаждение и затвердевание растекшейся капли с возможным утолщением приповерхностного слоя расплава в подложке, завершающееся охлаждением и затвердеванием системы “сплэт – подложка” ($T_{pm} \leq T_c \geq T_{bm}$).

Уместно отметить, что 1-й сценарий наиболее распространен в технологии ГТН, поэтому основное внимание исследователей, начиная с работ В.В. Кудинова, Н.Н. Рыкалина, М.Х. Шоршорова и др., сконцентрировано на развитии и применении теоретических представлений об установлении связи сплэта с подложкой, определяемой кинетикой установления топохимической связей на границе раздела “затвердевающая частица - твердая подложка”.

Четвертый же сценарий формирования сплэтов, являющийся объектом исследования в диссертации Е.А. Колесниковой, реализуется в технологии ГТН при напылении металлических порошков на металлические подложки крайне редко. Он требует значительных перегревов капель, а в ряде случаев и одновременного подогрева подложки, что приводит к нежелательному окислению напыляемых частиц и разбрызгиванию капель при соударении с подложкой, вследствие очень низкой вязкости металлических расплавов. Кроме того, при взаимодействии пары различных металлов частица - подложка, находящихся в расплавленном состоянии, возможно образование эвтектик, твердых растворов, интерметаллидов и т.д.

Все это существенно ограничивает *практическую значимость* выполненных исследований.

Очевидно, что при стабильном формировании сплэтов по 4-му сценарию прочность их связи с подложкой будет высокой, поскольку взаимодействие материалов происходит в жидкой фазе в условиях их объемного перемешивания. Само определение адгезии в данном случае, используемое диссертантом, отличается от общепринятых определений в науке и технике, поскольку процесс соединения металлической капли с подплавляемой металлической подложкой происходит по механизму микросварки.

Вторая глава посвящена попытке сформулировать условия формирования металлических сплэтов на металлических подложках в рамках 4-го сценария. Вполне

очевидно, что если обеспечить подплавление подложки в пятне ее контакта с растекшейся в форму тонкого диска каплей расплава, то будет реализована более прочная связь материалов, характерная той, что имеет место при микросварке. Для этого контактная температура должна быть выше температуры плавления, как материала частицы, так и материала подложки.

Однако, при получении выражения (2.5) для контактной температуры было допущена **некорректная запись** условия сопряжения тепловых потоков (выражение (2.2)) для тонких слоев в капле и подложке. К тому же, автор не учитывает теплоту плавления материала подложки. Следовательно, в общем случае для произвольной пары материалов частица - подложка формула (2.5), а также формулы, являющиеся ее следствием, неверны. Она может быть использована в качестве грубого приближения для оценки контактной температуры только в случае, когда коэффициенты теплопроводности материалов частицы и подложки одинаковы. Но в этом случае формулу (2.5) можно получить непосредственно из выражения (2.1) без каких-либо дополнительных умозаключений. **Принципиальным недостатком** полученного решения является то, что оно не учитывает интенсивный теплоотвод в подложку при растекании капли расплава.

В этой связи, остается лишь пожелать диссертанту на будущее: перед тем, как что-то изобретать, необходимо внимательно ознакомиться с публикациями других авторов по исследуемому вопросу. В частности, это касается контактной температуры. Существует точное классическое решение задачи нестационарного сопряженного кондуктивного теплообмена между двумя полубесконечными слоями разнородных материалов, находящихся в идеальном контакте и не претерпевающих фазовых превращений. Данное решение для контактной температуры, применительно в формированию сплэтов, обсуждается в одной из цитируемых в диссертации работ В.В.Кудинова.

Для проверки адекватности полученных температурных условий адгезии (терминология автора) были проведены эксперименты с осаждением капель олова и свинца на оловянную и свинцовую подложки. Для этого была создана физическая установка, позволяющая осаждать капли легкоплавких металлов (диаметр 2-4 мм) с заданной температурой при их свободном падении с высоты ~ 5 см на металлическую подложку. Условия подплавления подложки проверялись с использованием формулы (2.5) для контактной температуры. Поэтому **вопрос корректности** интерпретации экспериментальных сплэтов олова на свинцовой подложке и сплэтов свинца на оловянной подложке **остается открытым**.

Качество соединения сплэта с подложкой проверялось по виду его среза с подложки. Если при давлении ножа на боковую поверхность сплэта отрыв происходил по поверхности контакта, то считалось, что соединение отсутствовало. Оно имело место в том случае, когда срез имел блестящую зеркальную поверхность. Качество соединения оценивалось по отношению площади блестящей поверхности среза к полной площади под сплэтом. Если это отношение было близко к единице, прочность соединения сплэта с подложкой считалась максимально возможной.

Учитывая некорректность формулы (2.5) для случая разнородных материалов частицы и подложки, вывод диссертанта о положительном результате интерпретации экспериментов можно объяснить выбранным методом определения прочности связи сплэта с подложкой, при которой количественные оценки носят весьма размытый характер. Используемый автором метод определения прочности сцепления сплэта с подложкой является скорее качественным, чем количественным методом, поскольку используемые легкоплавкие металлы (олово, свинец) очень пластичны. В данном разделе работы **диссертант не упоминает** об уникальной и более корректной методике, использованной ранее В.В. Кудиновым при исследовании прочности соединения сплэтов с подложкой. Кроме того, следовало бы упомянуть диссертацию (А.В. Смирнов, Экспериментальное исследование

взаимодействия капель металлических расплавов с основой, Новосибирск, ИТПМ СО РАН, 2000), автор которой приводит представительный набор сплэтов (более 600) при осаждении капель легкоплавких металлов (In, Sn, Pb, Zn, Ag) на металлические подложки при полном контроле КФП.

В *третьей главе* рассмотрен предложенный автором метод расчета нестационарного температурного поля в системе «капля – подложка» методом выравнивания температур малых соседних кубических объемов. Его можно считать как дальнейшее развитие инженерного метода, предложенного А.В. Ваничевым в 1946 году для приближенного решения задач теплопроводности с помощью составления элементарных тепловых балансов.

Диссертант почему-то считает, что "процесс передачи тепла приближается к стационарному процессу при уменьшении временных и размерных интервалов". Согласно этому утверждению автора, производная температуры по времени в любой точке пространства и в любой момент времени приближается к нулю, если рассматривается уменьшающийся интервал времени. Но это далеко не так, поскольку на стадии растекания капли ее теплообмен с подложкой носит существенно нестационарный характер.

Предложенный метод, по существу, является явным условно сходящимся методом первого порядка точности, и, по-видимому, может использоваться для прогноза при больших значениях времени протекания процесса, когда происходит выравнивание температурного поля системы «капля-подложка».

Я не могу согласиться с диссертантом, что достоинством метода является возможность "уйти от дифференциальных уравнений". Численное исследование любой краевой задачи должно начинаться с ее строгой постановки.

Предложенный автором метод прошел тестирование на примере расчета температурного поля бесконечной пластины при постоянных величинах теплопроводности и теплоемкости и трехмерного температурного поля шара. Полученные в обоих случаях результаты согласуются с известными результатами аналитических решений. Однако, строгие постановки модельных краевых задач, для которых проводилось тестирование предложенного метода, отсутствуют. Отсутствуют также дискретные аналоги уравнений и их отдельных членов, ответственных за тот или иной процесс. Это привело к тому, что автор уделяет неоправданно много места в работе обсуждению элементарных вопросов переноса тепла. Достоверность расчетов температур по предложенному методу подтверждена также их удовлетворительным согласием с результатами собственного эксперимента. Однако, следует отметить, что тестирование используемого метода расчета выполнено на слабо неизотермических модельных задачах, весьма далеких от условий ГТН, для которых формирование сплэтов происходит при разности температур между каплей и подложкой $\sim 2000^\circ\text{C}$ и более. Корректность применения разработанного метода в данном случае требует дополнительного обоснования.

В *четвертой главе* по методике, описанной в третьей главе, предпринята попытка расчета температурных полей и движения фронтов фазовых переходов, как в объеме сплэта, так и в объеме подложки. Для расчета использована феноменологическая методика, описанная в третьей главе. При этом гидродинамические особенности растекания капли и ее одновременного теплообмена с подложкой не учитывались, что существенно упрощает расчет, но снижает *практическую ценность и новизну* полученных результатов. Хорошо известно, что формирование металлических сплэтов на металлической подложке происходит одновременно при растекании и одновременном интенсивном теплообмене капли с основой, поскольку число Прандтля для металлических расплавов $Pr \ll 1$. Момент образования конечной формы сплэта, которую диссертант задает произвольно в виде цилиндра, диска, шара или сегмента шара, принимался за начало процесса теплообмена.

Рассчитаны температурное поле и движение границы жидкой и твердой фаз в системе «капля-подложка» для перечисленных форм сплэтов. Материал капли - легированная сталь, материал подложки – обычная сталь.

Учитывая существенные упрощения постановки задачи, можно считать, что полученные результаты представляются полезными, но носят скорее качественный нежели количественный, характер и не претендуют на какие-либо обобщения.

При оценке *степени новизны, достоверности и обоснованности* выводов по диссертации необходимо констатировать, что выводы 1, 2 и 7 носят частный характер. Остальные выводы можно считать достаточно обоснованными, поскольку, в целом, они не противоречат существующим представлениям о формировании сплэтов и прочности их связи с основой при газотермическом напылении порошковых покрытий.

Основные результаты диссертации, в целом, прошли апробацию. Они опубликованы в 6 печатных работах, в том числе 3 работы опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Два доклада представлялись на Всероссийской конференции. Однако, хотелось бы видеть апробацию основных результатов на конференциях, близких к теме диссертации, например, на Международной конференции "Пленки и покрытия", которая проходит раз в два года в Санкт-Петербурге.

Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

Оформление автореферата и диссертации вполне удовлетворительное, хотя при прочтении обнаружены многочисленные опечатки и неточности формулировок. Однако они не влияют на адекватное понимание сути излагаемого материала.

В заключение следует отметить, что, несмотря на отмеченную ограниченность теоретического подхода, положенного в основу исследования, и фрагментарность полученных экспериментальных данных, а также амбициозность целей работы и сформулированных автором основных результатов, можно считать, что диссертация Колесниковой Елены Александровны "Температурное условие адгезии и определение температурных полей в системе <<капля - подложка>>" является вполне завершенной, по совокупности и объему, квалификационной работой, отвечающей требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

Солоненко Олег Павлович
докт. техн. наук, профессор,
зав. лабораторией плазмодинамики
дисперсных систем ИТПМ СО РАН
г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1
раб. тел.:(383) 3301642
e-mail: solo@itam.nsc.ru
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и
прикладной механики
им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения
Российской академии наук
02.12.2014

