

## ОТЗЫВ

о диссертации Суслиной Н.Н.

«Образование и рост промежуточных фаз в сложных металлических системах при контактном плавлении» на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальностям

01.04.07 – Физика конденсированного состояния и

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Эффект контактного плавления исследуется в нашей стране уже более 70 лет, начиная с работ П.А.Савинцева, который был учителем В.С.Саввина, одного из руководителей сегодняшнего диссертанта. Более 40 лет назад Савинцевым и Роговым была в основном разработана и методика экспериментального исследования этого явления. Несмотря на то, что в последующие годы были проведены многочисленные и главным образом экспериментальные исследования контактного плавления в различных металлических системах с точкой эвтектики, построение его теории еще далеко от завершения. Поэтому можно только приветствовать появление диссертации Н.Н.Суслиной, в которой, в отличие от большинства предшествующих работ, серьезное внимание уделено решению принципиальных теоретических вопросов и, в частности, сравнительному анализу применимости основных гипотез контактного плавления – диффузионной и адгезионной. При этом на по-прежнему высоком уровне выполнены и экспериментальные исследования состава контактной зоны при кристаллизации, сопровождающейся ростом интерметаллических фаз. Такой синтез потребовал привлечения второго руководителя-теоретика. В итоге появилась диссертация, которая представлена к защите по двум специальностям: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния и традиционной для этого направления 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

По мнению оппонента, такой «стыковый» характер диссертации вполне оправдан. С первой из заявляемых специальностей связаны разделы диссертации, посвященные разработке математических моделей построения фазовых диаграмм состояния, экспериментальному исследованию контактного плавления, а также образованию и росту промежуточных фаз при фазовых переходах I рода в контакте разнородных металлов. Теплофизическому направлению соответствует исследование процессов диффузии в жидкой прослойке, возникающей при контактном плавлении и моделирование процессов массообмена в жидком и твердом состоянии, а также выполненное диссертантом численное (компьютерное) моделирование процессов массообмена в приконтактной области разнородных веществ.

В теоретическом плане наиболее серьезным результатом защищаемой работы является формулировка системы уравнений, описывающей диффузионный рост жидкой прослойки в двухкомпонентной системе с интерметаллидами при контактном плавлении в нестационарно-диффузионном режиме. На основании этой системы предлагается оригинальный метод оценки концентрационной зависимости коэффициента диффузии в бинарном расплаве по результатам экспериментального исследования контактного плавления в соответствующей системе (т.е. без определения градиента концентрации, сопряженного с существенными погрешностями). Далее, на примере бинарной системы Bi-Pb этот метод применен как для оценки указанной зависимости, так и для оценки



радиусов диффундирующих частиц, и его применимость для оценочных расчетов продемонстрирована достаточно убедительно.

В 3-й главе диссертации тщательно анализируется возможность установления квазиравновесного состояния на межфазной границе путем диффузии атомов из жидкости в твердую фазу в условиях диффузионного роста жидкой фазы. Ранее возможность образования пересыщенного твердого раствора на границе с контактной зоной не была обоснована теоретически. Н.Н.Суслина показала, что действительно ни при каких временах отжига слои твердого вещества, прилегающие к жидкости, не только не пересыщаются, но даже и не насыщаются вторым компонентом. Таким образом, в диффузионном режиме глубина проникновения чужеродных атомов из жидкости в твердую фазу настолько мала, что не может обеспечить равновесия на межфазной границе, а тем более – ее пересыщения. Показано также, что при диффузии этих атомов из жидкости невозможно образование промежуточной твердой фазы. Эти выводы работы принципиально важны для построения последовательной теории контактного плавления.

Подтвержденный в ряде работ (в том числе и в рецензируемой) параболический закон роста ширины жидкой прослойки убедительно свидетельствует о том, что этот рост действительно лимитируется диффузией в расплаве и постоянством состава на его границах. Однако квазиравновесность граничных составов при этом вовсе не гарантируется. Это заключение служит основанием ранее высказанной без участия диссертанта гипотезы о существовании на границе контактной зоны квазиравновесия между нестабильным относительно солидуса твердым раствором и метастабильной жидкостью, отклонение состава которой от стабильного ликвидуса может быть обнаружено в эксперименте.

Подробнее остановлюсь на анализе экспериментальной части диссертации Н.Н.Суслиной.

Во-первых, здесь обращает внимание высокое качество эксперимента, выполненного с использованием простейшего оборудования, что присуще вообще работам, выполненным под руководством В.С.Саввина. В частности, диссертанту принадлежит методическая находка: при исследовании контактного плавления в сплавах с близкой плотностью компонентов, таких как олово-индий, в нижней части установки размещать не более тугоплавкий металл, имеющий большую плотность в расплавленном состоянии. Именно в этом случае обеспечивается отсутствие конвективного массопереноса с возникновением нестабильности Рэлея-Тейлора. Очень тщательно она относится к аттестации образцов для исследования. Так, для выявления возможного влияния химической неоднородности твердых растворов на результаты исследования контактного плавления отдельные образцы она отжигала в течение 8 часов, однако влияния данной термообработки на получаемые результаты не обнаружила.

Во-вторых, не может не вызвать высокой оценки предложенный в работе (и уже запатентованный!) метод построения линий солидуса на диаграммах состояния бинарных систем. Метод позволяет определять точку солидуса с точностью поддержания и измерения температуры расплава, то есть по своей точности он вполне конкурентоспособен с прочими методами определения ее положения. Примечательно, что уже при выполнении данной работы он был успешно использован Н.Н.Суслиной для уточнения линии солидус системы олово-таллий.

Наряду с частично ранее изученными системами с простой эвтектикой олово-свинец и с единственной промежуточной твердой фазой олово-таллий, в данной работе впервые



методика исследования роста контактной зоны была применена к сложной металлической системе индий-олово, в которой широкие области твердых растворов и промежуточные твердые фазы существуют по обе стороны от жидкой фазы. Для этой ситуации разработана новая методика расчета параметров, характеризующих рост жидкой прослойки при контактном плавлении в нестационарно-диффузионном режиме. Исходными материалами во всех перечисленных случаях служили не только чистые металлы, но и их твердые растворы и интерметаллиды различных составов.

Наиболее значимым подтверждением достоверности результатов как расчетов, так и экспериментального определения кинетического коэффициента является их совпадение с точностью до 1%. Это же совпадение демонстрирует и успешность теоретического анализа процесса контактного плавления, и присущее Н.Н.Суслиной мастерство экспериментатора. Удивительно, что это согласие не нашло отражения в разделе «Достоверность результатов» диссертации и автореферата. Однако и приведенных там аргументов достаточно для заключения об этой достоверности.

В рецензируемой работе трудно выделить слабые стороны. По-видимому, это связано и с тщательностью работы диссертанта над текстом, и с наличием у нее двух руководителей, каждый из которых является чрезвычайно «въедливым» (в хорошем смысле этого слова). В качестве единственного более или менее серьезного критического замечания могу отметить только некоторую вольность Н.Н.Суслиной в обращении с данными о плотностях исследуемых систем. Так, на с.50 она утверждает, что «в жидких металлических растворах изменение объема с составом происходит практически аддитивно (парциальные объемы от концентрации не зависят)». Если для простой эвтектической системы, такой как свинец-олово, это еще более или менее справедливо, то для более сложных систем, тем более содержащих ряд интерметаллических соединений, нелинейность концентрационных зависимостей плотности может быть очень существенной. В частности, в недавнем исследовании нашего аспиранта А.Р.Курочкина показано, что отклонение плотности расплавов медь-алюминий от аддитивной прямой может превышать 20%. Данные о плотностях жидких олова и индия диссертант заимствует из публикаций 1968 г., хотя позднее эти результаты были существенно уточнены с использованием метрологически аттестованного метода проникающего гамма-излучения.

Менее значимое замечание: вряд ли целесообразно было приводить в диссертации общеизвестные формулы для расчета навесок, необходимых для приготовления сплавов заданных концентраций (формулы 2.1-2.3, с.24).

Диссертация написана грамотным языком и практически не содержит стилистических ошибок. Единственное, что бросилось в глаза оппоненту – обилие сослагательного наклонения с союзом «бы» на с.53 и ошибочная ссылка на рисунок 2.2 вместо 1.2 на с.27.

Результаты диссертационного исследования докладывались на трех международных и 5 российских конференциях. Они опубликованы в 15 научных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 3 из которых индексируются в международных базах цитирования Scopus и WOS. Отдельные результаты работы защищены патентом РФ.

Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

Подводя итог анализу диссертации Н.Н.Суслиной, отмечу, что она соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, которые были сформулированы в п.9. «Положения о порядке присуждения ученых

степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Ее автор Суслина Н.Н заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент

Попель Петр Станиславович,

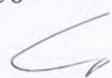
Заслуженный деятель науки РФ, д.ф.-м.н., профессор,

профессор кафедры физики и математического моделирования

Уральского государственного педагогического университета

620017 Россия, Екатеринбург, Пр. Космонавтов, 26

e-mail: [pspopel@mail.ru](mailto:pspopel@mail.ru); Тел.: 8 (343) 371 46 56



24 октября 2015 г.

г.Екатеринбург



Подпись П. С. Попель  
Заверяю нисл. ОК УрГПУ  
В. М. Карабинец