

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Кармоковой Риты Юрьевны «Исследование поверхностных явлений в кавитационных пузырьках в расплаве алюминия», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

**Актуальность работы.** В настоящее время исследование поверхностей и границ раздела между различными фазами (твердое, жидкое, газ) является предметом экспериментальных и теоретических исследований различными методами. Особый интерес представляет исследование влияния внешних воздействий на свойства поверхности и границ раздела фаз. В Кабардино-Балкарском государственном университете с середины прошлого века эффективно ведутся исследования межфазных явлений металлов и сплавов при различных термодинамических условиях. Среди этих исследований большое внимание уделяется изучению процессов сегрегации примеси на свободные поверхности и межфазные границы. Результаты подобных исследований являются важными для совершенствования многих технологических процессов, связанных с границей раздела фаз, например, для процессов рафинирования металлических расплавов. С развитием современных технологий и нанотехнологий в авиастроении, электронике, космической технике, повысились требования к чистоте используемых материалов, особенно алюминия. В настоящее время, в отличие от существующих методов получения особо чистого алюминия, наиболее перспективным является звуковая и ультразвуковая обработка материалов. Однако этот метод малоизучен, и требуется проведение фундаментальных исследований процессов, протекающих на межфазных границах «расплав-газ» и «расплав-адсорбент» при акустических воздействиях.

В связи с этим, тема диссертационной работы Кармоковой Риты Юрьевны «Исследование поверхностных явлений в кавитационных пузырьках в расплаве алюминия», посвященная исследованию термодинамических

свойств межфазной границы раздела жидкого алюминиевого расплава с парогазовой фазой внутри кавитационного пузырька актуальна.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 10 таблиц, 61 рисунок и список литературы из 185 наименований.

### **Степень обоснованности научных положений и выводов.**

**Во введении** сформулированы актуальность, цели и задачи диссертационной работы, а также представлены научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, и апробация работы.

**Первая глава** содержит обзор работ, посвященных основным этапам производства и рафинирования алюминия, влиянию акустического воздействия на образование и динамику кавитационных пузырьков. Подробно описано явление кавитации и параметры, влияющие на кавитационную прочность жидкости. Также рассмотрены работы, описывающие теоретические и экспериментальные исследования процессов, протекающих на различных межфазных границах, и возможность изменения состава межфазного слоя, воздействуя на жидкий металл акустическими волнами. Из проведенного обзора следует, что влияние акустического воздействия на межфазную границу «расплав-кавитационный пузырек» в настоящее время является мало изученным, что является обоснованием целей и задач диссертации.

**Во второй главе** диссертант приводит описание экспериментальной установки для воздействия на жидкие металлы акустическими волнами, собранной ею для выполнения целей и задач, поставленных в диссертации. Описана методика проведения эксперимента и получения экспериментальных образцов. Кроме того, приведено описание приборов атомно-силовой микроскопии, сканирующей электронной микроскопии и



микрорентгеноспектрального анализа, с помощью которых проводили исследование микроструктуры и элементного состава полученных образцов. Для контроля процесса воздействия акустических колебаний на расплав алюминия проведены расчеты следующих параметров кавитации: число Маха, зависимость максимального радиуса от резонансной частоты с учетом плотности, вязкости и поверхностного натяжения, зависимость температуры кавитационных пузырьков от размера в процессе их образования.

В третьей главе Р.Ю. Кармоковой описаны результаты экспериментальных исследований и проведенных расчетов для межфазной границы «расплав – газ». Представлена модель измельчения и перемешивания адсорбента в расплаве при акустическом воздействии и установлено, что при уменьшении теплоты и увеличении температуры и давления диаметр частицы уменьшается. Проведен сравнительный анализ состава образцов алюминия, показывающий, что примеси сегрегируют в кавитационный пузырек. Показано, что с увлечением частоты акустических воздействий средний радиус кавитационных пузырьков уменьшается, а плотность их распределения на единицу площади увеличивается. Установлена зависимость эквивалентного (усредненного) коэффициента диффузии примесей (водород и магний) в алюминии от индекса кавитации и частоты акустических волн. Кармоковой Р.Ю. показано, что данный коэффициент при частоте акустического воздействия 20 кГц увеличивается для примеси водорода 2,9 раза, а для примеси магния в 1,43 раза. Из проведенного расчета состава межфазного слоя «расплав-кавитационный пузырек» диссертантом сделан вывод, что поверхностно-активными примесями в алюминии являются кремний, цинк и магний. Оценка сегрегации примесей на поверхность кавитационного пузырька показала, что суммарное число атомов примеси составляет порядка  $6 \cdot 10^{19}$  на  $1 \text{ см}^3$  жидкого алюминия, а суммарная площадь поверхности пузырьков может достигать  $0,4 \text{ м}^2$ . По результатам третьей главы соискателем сформулированы первые два положения, выносимые на защиту.

**В четвертой главе** предложена теоретическая модель адсорбции примеси сферическими частицами и кавитационными пузырьками, основанная на применении парного межатомного потенциала Леннарда-Джонса. Представленные зависимости свободной энергии Гиббса от радиуса кавитационных пузырьков для примесей, содержащихся в алюминии, показывают, что критический радиус пузырьков в расплаве алюминия составляет 0,27-0,35 мкм и согласуются с экспериментальными данными диссертационной работы. Показано, что для кавитационных пузырьков поверхностное натяжение увеличивается по сравнению с плоской межфазной поверхностью, что может приводить к усилению процесса адсорбции примеси, при малых радиусах кавитационных пузырьков. Также в рамках модели Дебая приведены расчеты длины Толмена, которая для кавитационного пузырька имеет отрицательный знак. По результатам этой главы диссертантом сформулированы третье и четвертое положения, выносимые на защиту.

**Оценка новизны и достоверности.** Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

– во-первых, проведенные исследования методами растровой электронной микроскопии и микрозондового анализа показывают скопление различных примесей в области кавитационных пузырьков, образующихся в результате акустического воздействия с частотой 5 и 15 кГц на расплав;

– во-вторых, экспериментально выявлено, что при воздействии акустических колебаний звуковой и ультразвуковой частоты в слое расплава алюминия толщиной ~ 20-30 мкм вблизи излучателя образуются кавитационные пузырьки, эффективно захватывающие растворенные примеси и способствующие шлакообразованию;

– в-третьих, с использованием парного межатомного потенциала взаимодействия разработана теоретическая модель растворения примеси и шлакообразования при акустическом воздействии на жидкие металлы;

– в-четвертых, оценка изменения свободной энергии Гиббса на внутренней поверхности пузырька показывает ее положительное значение,



начиная с радиуса 0,27 до 0,35 мкм для всех примесей, содержащихся в расплаве алюминия;

– в-пятых, в рамках модели Дебая установлена роль размерного эффекта поверхностного натяжения в кавитационных пузырьках. Показано, что поверхностное натяжение пузырька выше, чем поверхностное натяжение.

**Практическая ценность работы.** Полученные экспериментальные данные по временной зависимости концентрации примесей на межфазной границе «расплав-парогазовая фаза» от частоты звуковых волн и индекса кавитации в алюминии могут быть использованы в технологии очистки алюминия.

Результаты диссертационного исследования, а также созданная экспериментальная установка, могут быть внедрены в учебный процесс, использованы студентами при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ (бакалаврских работ и магистерских диссертаций), а также при проведении учебных занятий с аспирантами.

По результатам исследования разработан способ очистки жидкости и получен патент на изобретение.

**Автореферат** достаточно полно отражает содержание диссертации.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. Из текста диссертации не ясна возможность использования выражений 3.10 и 3.11 для расчета состава межфазного слоя «расплав-газ», так как не понятно, находится ли система в термодинамическом равновесии.

2. На рисунках 3.17 и 3.18 обозначения по осям координат написаны мелким шрифтом и плохо читаются.

3. В главе 2 в описании экспериментальной установки геометрические размеры тигля выражены не в системе СИ.

4. В некоторых литературных ссылках имеются несоответствие в оформлении по ГОСТу.

Приведенные замечания не снижают общего положительного впечатления о рассмотренной диссертационной работе и не снижают ее ценность.

## Заключение

Диссертационная работа Кармоковой Р.Ю. выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, практической ценностью, является самостоятельной и законченной научно-квалификационной работой. Работа выполнена на высоком научном уровне, результаты, полученные автором, достоверны, выводы обоснованы. Диссертационная работа отвечает требованиям пунктов 9-14 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (ред. 7 сентября 2021 г.), а ее автор, Кармокова Рита Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Манукянц Артур Рубенович



кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры физико-математических дисциплин  
ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский  
горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет)»

Шифр и наименование специальности, по которой подписавшийся защитил диссертацию: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Адрес: 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

Тел: +7 962 7452332

Эл. почта: [artmanukyants@mail.ru](mailto:artmanukyants@mail.ru)

Я согласен на обработку персональных данных.

Подпись доц. Манукянца А.Р. удостоверяю.

Ученый секретарь Ученого совета

ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)»

«14» января 2022 г.



Л. М. Базаева