

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и программам
стра... ия Удмуртского
госу... университета,
докт... наук, профессор
Мам...

«19

2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Удмуртский государственный университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Формирование микроструктуры и прочностных свойств Al сплавов AMg6 и AD1 при высокотемпературной пайке припоями Zn-Cu-Al и Al-Si» выполнена на кафедре общей физики Удмуртского государственного университета.

В период подготовки диссертации соискатель Шутов Илья Владиславович работал в Удмуртском государственном университете на кафедре общей физики в должности старшего преподавателя и в лаборатории физики конденсированных сред Института математики, информационных технологий и физики.

В 2018 году окончил магистратуру государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Удмуртский государственный университет» по магистерской программе «Химия и физика материалов» (период обучения 2016-2018 гг.). Диплом магистра, выданный ФГБОУ ВО "Удмуртский государственный университет" (УдГУ) г. Ижевск, специальность 04.04.02 Химия, физика и механика материалов, квалификация Магистр, год выпуска 2018, диплом № 0094253 серия 101831, дата выдачи документа 06.07.2018 г.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент Кривилев Михаил Дмитриевич, заведующий лабораторией «Физика конденсированных сред» Удмуртского государственного университета.

По итогам обсуждения диссертации «Формирование микроструктуры и прочностных свойств Al сплавов AMg6 и AD1 при высокотемпературной пайке припоями Zn-Cu-Al и Al-Si» принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

- Проведен обзор экспериментальных и теоретических работ с детальным анализом технологии высокотемпературной пайки цветных сплавов, а также сопутствующих процессов структурообразования, вязкого течения, смачивания и кристаллизации. Проведен широкий обзор в области реакционно-контактной и реакционно-флюсовой

пайки, на основании которого выделены основные проблемные вопросы и намечены пути их решения.

- Сформулирована постановка задачи для описания процессов высокотемпературной пайки для Al сплавов с различным содержанием Mg. Составлена матрица эксперимента для различных типов пайки Al сплавов с учетом температурных режимов и присадочных материалов.
- Разработан экспериментальный стенд для проведения испытаний по высокотемпературной пайке с контролем температуры в контролируемой атмосфере.
- Проведены исследования влияния температурных режимов пайки для сплавов AMg3 и AMg6 с припоями Zn-Cu-Al, Zn-Al, а также для сплава АД1 с припоем Al-Si и флюсом $KAlF_4$, проведен полный анализ механизмов структурообразования при различных режимах пайки.
- Проведены механические испытания на срез паяных образцов и фрактографические исследования после разрушения, на основании которых предложен механизм разрушения паяных соединений после различных режимов пайки.

2. Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- Впервые показано, что использование сплава на основе Zn-2%Cu-1%Al в качестве припоя для пайки Al сплавов с содержанием магния от 3 до 6 вес. % позволило получить соединение с развитой микроструктурой и механическими характеристиками, удовлетворяющим паяным соединениям внахлест.
- Впервые получены данные о механизме структурообразования при реакционно-контактном методе пайки сплава AMg с припоем Zn-2%Cu-1%Al: при кристаллизации формируется зона столбчатых кристаллов твердого раствора Al(Zn) и Zn(Al), эвтектика ZnAl + β -Zn, эвтектоид α -Al + β -Zn + интерметаллид $CuZn_5$. При этом фазы, формирующиеся в эвтектической структуре, незначительно уменьшают пластичность паяного шва при сохранении его прочности.
- Предложен механизм разрушения паяных соединений AMg с припоем Zn-2%Cu-1%Al, протекающий по смешанному вязко-хрупкому механизму. На первом этапе разрушения происходит зарождение трещины в центральной части паяного шва, которое перетекает в механизм квазихрупкого разрушения. Трещина зарождается в области границы с различным типом микроструктур по сильнонапряженным элементам. На втором этапе протекает вязкое разрушение основного материала AMg6 по границе вдоль паяного шва. Соотношение площадей хрупкого и вязкого разрушения на изломах при выбранных режимах пайки близко к 50% : 50%.
- Предложена гипотеза, что плавление флюса $KAlF_4$, внедренного в слой плакированного припоя Al-Si, приводит к химическому взаимодействию припоя и основного материала на стадии нагрева в температурном интервале 550-580 °С, что приводит к структурной однородности поверхностного слоя и увеличению его сплошности. Это способствует активации взаимодействия припоя и основного

материала еще до плавления припоя, что позволит оптимизировать технологический процесс реакционно-флюсовой пайки Al сплавов.

3. Достоверность и обоснованность результатов подтверждается большим статистическим объемом экспериментальных данных, современными методиками обработки экспериментальных данных, согласованностью представленных результатов с данными других исследователей. Формулирование гипотез и их верификация осуществлялись на основе известных положений физического материаловедения, механики деформируемого твердого тела и теплофизики.

4. Практическая и теоретическая значимость работы заключается в предложенных методических рекомендациях для высокотемпературной пайки Mg-содержащих Al сплавов марок АМг и АД с учетом возможных режимов пайки и присадочных материалов. Результаты работы перспективны для использования в производстве космических комплексов и разработке элементов космической техники. Методические рекомендации по бесфлюсовой пайке позволили повысить технологичность процессов ремонта и восстановления деталей различной техники. В процессе проведения работы получено 3 заключения от ведущих промышленных предприятий России о практической ценности результатов.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационной работы Шутовым Ильей Владиславовичем опубликовано 10 научных работ, из них 1 статья в журнале, рекомендуемом ВАК, 3 статьи, опубликованных в изданиях, индексируемых Scopus и/или Web of Science, 6 в трудах конференций и тезисах докладов.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях:

1. **Shutov I.V.** Effect of processing parameters on microstructure in brazing of Al–Si alloys / I.V. Shutov, L.V. Kamaeva, M.D. Krivilyov, C.-N. Yu, S.M. Mesarovic, D.P. Sekulic // Journal of Crystal Growth. – 2020. – V. 530. – P. 125287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2019.125287> (Scopus)

Соискателем подготовлены экспериментальные композиционные образцы АД1 с нанесенным плакированным припоем Al-Si с внедренным флюсом $KAlF_4$, проведено металлографическое исследование образцов в исходном состоянии и после термической обработки, проведены анализ и обсуждение экспериментальных результатов.

2. **Шутов И.В.** Фазовые превращения при термической обработке композитного припоя Al-Si + флюс / И.В. Шутов, Л.В. Камаева, А.Р. Хамидуллина, М.Д. Кривилев,

Д.П. Секулич // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2021. – Т. 782. – № 8. – С. 10-14. (Scopus, ВАК)

Соискателем подготовлены экспериментальные композиционные образцы АД1 с нанесенным плакированным припоем Al-Si с внедренным флюсом KAlF₄, проведены металлографическое и электронноскопическое исследования образцов в исходном состоянии и после термической обработки, проведены анализ и обсуждение экспериментальных результатов.

3. **Шутов И.В.** Анализ смачивания и диффузионных процессов при контактном сплавлении припоев Zn–Cu–Al и Mg–Al со сплавом AMg3 / И.В. Шутов, Л.В. Камаева, Е.А. Баталова, М.Н. Королев, М.Д. Кривилев // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* – 2022. – № 8. – С. 80-86. (Web of Science)

Соискателем подготовлены экспериментальные образцы AMg3 луженые припоем Zn-Cu-Al, проведены металлографическое и электронноскопическое исследования экспериментальных образцов после термической обработки, проведено исследование химического состава образцов с помощью энергодисперсионного анализа, проведен анализ и обсуждение результатов.

4. **Шутов И.В.** Изучение разрушения паяных соединений AMg6 / И.В. Шутов, М.Н. Королев, М.Д. Кривилев // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение.* – 2024. – №1. – С. 42-49 (ВАК К2)

Соискателем проведены эксперименты по пайке образцов AMg6 с припоем Zn-Cu-Al внахлест, подготовлены экспериментальные образцы для исследования на срез на механической разрывной машине, проведены металлографическое и электронноскопическое исследования образцов после разрушения на срез, исследованы изломы образцов после разрушения на срез, построены графики зависимости “напряжение - время”, “напряжение - удлинение”, проведены анализ и обсуждение результатов.

В других изданиях:

1. **Шутов И.В.** Фазовые превращения и химические реакции при термообработке композитного припоя Al-Si + флюс / И.В. Шутов, Л.В. Камаева, М.Д. Кривилев, Д.П. Секулич, С.Д. Месарович // *Кристаллизация: Компьютерные модели, эксперимент, технологии. Тезисы VIII Международной конференции, Ижевск,* – 2019. – С. 37-38

Соискателем проведено металлографическое исследование образцов АД1 с нанесенным плакированным припоем Al-Si с внедренным флюсом KAlF₄ в исходном состоянии и после термической обработки.

2. **Шутов И.В.** Исследование фазовых превращений при термообработке композитного припоя Al-Si + флюс / И.В. Шутов, Л.В. Камаева, М.Д. Кривилев // *Пилотируе-*

мые полеты в космос. Материалы XIII Международной научно-практической конференции, Звездный, 2019. – С. 133-134

Соискателем проведено металлографическое исследование образцов АД1 с нанесенным плакированным припоем Al-Si с внедренным флюсом KAlF₄ в исходном состоянии и после термической обработки.

3. Груздь С.А. Космический эксперимент Реал: исследование эффекта смачивания алюминиевым сплавом поверхностей различных форм / С.А. Груздь, И.В. Шутов, М.Д. Кривилев, Л.В. Камаева // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIV Международной научно-практической конференции, Звездный, 2021. – С. 125-127

Соискателем проведены экспериментальные исследования смачивания расплавом алюминия поверхности основного материала для верификации численной модели.

4. Шутов И.В. Исследование особенностей структурообразования при смачивании поверхности АМг3 расплавом припоя Zn-Al-Cu при высокотемпературной пайке / И.В. Шутов, М.Н. Королев, М.Д. Кривилев // Кристаллизация: Компьютерные модели, эксперимент, технологии. Тезисы VIII Международной конференции, Ижевск, – 2022. – С. 138-140

Соискателем подготовлены экспериментальные образцы АМг3 луженые припоем Zn-Cu-Al и проведено металлографическое исследование образцов после различных режимов термической обработки.

5. Шутов И.В. Изучение разрушения паяных соединений сплава АМг6 / И.В. Шутов, М.Н. Королев, М.Д. Кривилев // Уральский форум сварки и контроля. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 135-летию изобретения Н.Г. Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом, Пермь, 2023. – С. 164-170

Соискателем подготовлены экспериментальные паяные образцы АМг6 с припоем Zn-Cu-Al внахлест и проведены металлографическое исследование образцов после разрушения на срез.

6. Шутов И.В. Изучение разрушения паяных соединений сплава АМг6 / И.В. Шутов, М.Н. Королев, М.Д. Кривилев // Быстрозакаленные материалы и покрытия. Материалы XX Международной научно-технической конференции, Москва, 2023. – С. 210-217

Соискателем подготовлены экспериментальные образцы и проведены металлографическое исследование образцов после разрушения на срез.

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Представленная Шутовым Ильей Владиславовичем диссертационная работа является самостоятельным научным исследованием в области физического

материаловедения и области технологии пайки. Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 2.6.17 – Материаловедение (технические науки), а именно:

п.2 – Установление закономерностей физико-химических и физико-механических процессов, происходящих в гетерогенных и композиционных структурах;

п.3 – Разработка научных основ выбора металлических, неметаллических и композиционных материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации деталей, изделий, машин и конструкций;

п.5 – Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок, и внешней среды.

7. Соответствие диссертационной работы требованиям «Положения о присуждении ученых степеней».

Диссертационная работа Шутова Ильи Владиславовича отвечает требованиям, установленным п. 14 Положения о присуждении ученых степеней. В диссертационной работе соискатель приводит ссылки на авторов и источники заимствованных материалов и отдельных результатов. Результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, материалах конференций, соответствующие ссылки присутствуют в тексте диссертации.

Диссертационная работа Шутова Ильи Владиславовича «Формирование микроструктуры и прочностных свойств Al сплавов АМг6 и АД1 при высокотемпературной пайке припоями Zn-Cu-Al и Al-Si» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение (технические науки).


Заключение обсуждено и принято на объединенном семинаре кафедры общей физики, лаборатории физики конденсированных сред и лаборатории физики и химии материалов Института математики, информационных технологий и физики Удмуртского государственного университета.

Присутствовало на заседании 14 человек. Результаты голосования: «за» – 14 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел. (протокол № 9 от 15.04.2024 г.).

Директор Института математики,
информационных технологий и физики
УдГУ, к.ф.-м.н.


Тонков Л.Е.

Заведующий лабораторией
физики и химии материалов УдГУ, д.т.н.


Харанжевский Е.В.

Заведующий кафедрой общей физики
УдГУ, к.ф.-м.н.

Белослудцев А.В.

Ведущий научный сотрудник
лаборатории физики конденсированных
сред УдГУ, к.ф.-м.н.

Гордеев Г.А.