

## Отзыв

Официального оппонента на диссертационную работу Шутова Ильи Владиславовича  
**“Формирование микроструктуры и прочностных свойств Al сплавов AMg6 при  
высокотемпературной пайке припоями Zn-Cu-Al и Al-Si”**,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 2.6.17 – Материаловедение

### **Актуальность диссертационной работы**

Актуальность темы диссертации И.В. Шутова продиктована необходимостью создания в России высокотехнологического производства изготовления деталей из Al сплавов методами высокотемпературной пайки (ВТП). Несмотря на имеющийся положительный опыт производства качественных деталей, широко применяемых в важных отраслях промышленности, таких как машиностроение, авиастроение и космическая отрасль, требуется дальнейшее совершенствование технологического цикла с использованием высокотемпературной пайки. В качестве материалов для исследований, выполненных в рамках этой диссертационной работы, выбраны алюминиевые сплавы, содержащие более 3 % магния, типа магналей, которые имеют важное значение как материалы для ответственных деталей, работающих в экстремальных условиях эксплуатации. Этот фактор также служит доказательством актуальности темы диссертации, а её результаты по выбору состава припоев и определению режимов пайки Al-Mg сплавов реакционно-контактным методом и новым реакционно-флюсовым методом пайки сплава АД1 имеют важное научное и практическое значение.

Представленные в диссертации исследования выполнены в рамках целевых работ по заказам АО “УНИИмаш” (г. Королёв), что также показывает инновационный потенциал данной тематики.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений и подтверждается приоритетными направлениями развития науки, технологии и техники РФ.

### **Содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа изложена на 142 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 110 источников, и двух приложений.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертации, её цель, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна работы и её практическая значимость.

*Первая глава* содержит обзор литературных данных по теме диссертации. Рассмотрены и проанализированы вопросы, касающиеся современного состояния технологий пайки Al сплавов разными методами, и определены преимущества и недостатки метода ВТП.

*Во второй главе* дано описание материалов, методов исследования и оборудования, используемых в работе. Подробно изложены вопросы подготовки образцов паяных соединений различными методами ВТП.

*В третьей главе* представлен экспериментальный материал по влиянию условий термических испытаний (скорости нагрева и охлаждения, времени выдержки и состава среды) на структуру и фазовый состав сплавов AMg3 и AMg6 с Zn-Cu-Al припоями. Подробно описаны результаты ДСК при нагреве припоем разного состава, представлен энергодисперсионный анализ зоны взаимодействия припоя и основного материала.

*Четвёртая глава* посвящена изучению разрушения паяных соединений, описаны испытания на растяжение образцов после пайки и определены их механические свойства. Для описания механизмов разрушения и определения оптимальных режимов пайки представлены результаты фрактографического анализа изломов после разрушения.

*В пятой главе* представлены сравнительные результаты реакционно-контактного и реакционно-флюсового методов пайки на примере модельного сплава АД1 с Al-Si припоем с внедрённым флюсом  $KAlF_4$ . Подробно проанализированы экспериментальные результаты ДСК и описана структура паяных образцов. Установлены основные характеристики процесса пайки – температура выдержки и скорость охлаждения, и их взаимосвязь с микроструктурой и фазовым составом границы раздела припой-подложка.

В конце каждой главы приведены краткие выводы. Общие выводы сформулированы в *Заключении*.

#### **Научная новизна, обоснованность и достоверность результатов и выводов**

В качестве наиболее важных и новых научных результатов можно указать следующие.

- Показана эффективность использования припоя из сплава Zn-2%Cu-1%Al для бесфлюсовой реакционно-активной пайки Al-Mg сплавов с высоким содержанием Mg типа AMg6. Установлено положительное влияние меди в составе припоя на процессы его растекания. Проведено сравнение механизмов растекания припоя при различных методах пайки и подобран оптимальный режим пайки для сохранения достаточной пластичности паяного соединения.

- На основании данных фрактографического анализа определён вязко-хрупкий механизм разрушения паяного шва в сплаве АМгб с помощью Zr-Cu-Al припоя и доказано повышение сопротивления к трещинообразованию таких соединений.

- Определён режим реакционно-флюсовой пайки с помощью композита Al-Si сплав + внедрённый флюс  $KAlF_4$  для образования дисперсной эвтектической структуры, способствующей созданию паяного соединения высокого качества из сплава Д1.

**Достоверность экспериментальных данных** обеспечивается большим объёмом выполненных экспериментов на аттестованных образцах с применением разнообразных современных методов исследования: металлографии, дифференциально-сканирующей калориметрии, сканирующей электронной микроскопии, локального рентгеноспектрального анализа, измерения физических и механических свойств. Полученные результаты дополняют и хорошо согласуются с известными данными других исследователей.

### **Практическая значимость работы**

Полученные новые экспериментальные результаты послужили основой для разработки методических рекомендаций по способу пайки деталей радиоэлектронной аппаратуры на предприятии АО «Элеконд» и научно-технического оборудования на предприятии ООО «Эковектор» (имеется акт внедрения). Предложенные режимы высокотемпературной пайки и составы припоев для Al сплавов с высоким содержанием магния безусловно будут востребованы и использованы для развития инновационных технологий в различных отраслях промышленности.

Несмотря на общую положительную оценку диссертационной работы, можно сделать ряд критических замечаний

1. В главе 3 (стр. 57) указано, что «важным управляющим параметром, который детально исследован, является толщина лужёного слоя припоя, которая составила 100, 400 и 1000 мкм». Тем не менее, представленные экспериментальные данные не дают подробного ответа о влиянии этого параметра на характеристики переходной зоны «припой-основной металл». Кроме того, эти результаты не отражены в выводах.
2. Аналогичное замечание касается данных о влиянии такого варьируемого параметра при высокотемпературной пайки как среда (вакуум, воздух, инертная атмосфера). Возникает вопрос. Как проводились сравнительные опыты, и каково влияние среды на процессы плавления и диффузии компонентов припоя в матрицу?
3. В главе 5 приведены экспериментальные данные о реакционно-флюсовом методе пайки сплава Д1 с использованием композитного припоя сложного состава Al-10%+

внедрённый флюс  $KAlF_4$ , полученного по шведской технологии TRILLIUM™. Так как данная технология является новой, желательно сформулировать, какие преимущества она даёт по сравнению с традиционно применяемой технологией пайки Al-Si припоями.

4. В главе 5 (стр. 125) автор утверждает, что при увеличении скорости охлаждения Al-Si эвтектика имеет “меньшее межпластинчатое расстояние”. Такое описание Al-Si эвтектики является некорректным, т.к. данная эвтектика относится к классу аномальных эвтектик с нерегулярным расположением пластин чешуйчатой формы. Её характеристиками являются форма и размеры эвтектического Si, которые задают морфологический тип эвтектики и её твёрдость.
5. Из текста главы 5 не ясно, почему при  $t^0=620^{\circ}C$  рост первичных кристаллов Al твердого раствора ухудшает свойства паяного соединения, вызывая его охрупчивание. Более логично предположить, что причиной является наличие первичных кристаллов Si и огрубление эвтектики.
6. Несмотря на грамотное оформление диссертации, в тексте обнаружены незначительные опечатки и неудачные выражения. Например, на стр. 52 *металлургическое соединение*, на стр. 36 *рост морфологии*. Ошибочно на стр. 62 указана ссылка [74] и т.д.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают её научной и практической значимости.

### **Заключение**

Диссертация Шутова Ильи Владимировича является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены новые результаты в области материаловедения, направленные на повышение качества материалов и изделий, полученных высокотемпературной пайкой.

Содержание диссертации, её цели и задачи полностью соответствуют паспорту научной специальности 2.6.17 *Материаловедение (технические науки)* и направлениям исследования (пункты 1 и 3).

Диссертация написана грамотным языком и хорошо оформлена. Текст автореферата в полной мере отражает содержание диссертации.

Полученные результаты, выводы и технические рекомендации подтверждены экспериментально, апробированы и опубликованы. Результаты диссертационной работы изложены в 10 публикациях, включая 3 статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Считаю, что диссертационная работа “Формирование микроструктуры и прочностных свойств Al сплавов АМг6 при высокотемпературной пайке припоями Zn-Cu-Al и Al-Si” полностью удовлетворяет всем критериям, установленным п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а её автор, Шутов Илья Владиславович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение.

Я, Бродова Ирина Григорьевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент  
доктор технических наук, профессор  
Главный научный сотрудник  
лаборатории цветных сплавов  
ФГБУН Института физики металлов  
имени М.Н. Михеева УрО РАН

Ирина Григорьевна Бродова

*Почтовый адрес: 620108 г. Екатеринбург,  
ул. С. Ковалевской, д. 18.  
тел. (343)378-36-11  
e-mail: [brodova@imp.uran.ru](mailto:brodova@imp.uran.ru)*

Учёный секретарь И  
кандидат физ.-мат. н

И.Ю. Арапова