

Просьба сослаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Шутов, И.В. Изучение разрушения паяных соединений сплава АМг6 / И.В. Шутов, М.Д. Кривилев, М.Н. Королев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 42–49. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.1.05

Please cite this article in English as **(Perm Polytech Style)**:

Shutov I.V., Krivilyov M.D., Korolev M.N. Fracture analysis of brazed Al-Mg-Mn joints. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2024, vol. 26, no. 1, pp. 42-49. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.1.05

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 26, № 1, 2024
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2024.1.05

УДК 621.791.312.3:620.184.6

И.В. Шутов, М.Д. Кривилев, М.Н. Королев

Удмуртский государственный университет, Ижевск, Российская Федерация

ИЗУЧЕНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА АМГ6

Исучен процесс разрушения паяных соединений сплава АМг6, полученных методом реакционно-контактной пайки с цинковым припоем марки НТС-2000. Реакционно-контактная пайка подразумевает бесфлюсовый процесс удаления оксидной пленки путем механического воздействия на поверхность образцов и использование диффузионно-активных припоев. За счет активного растворения цинка в алюминии при высоких температурах происходит взаимодействие припоя и основного паяемого материала. Под действием термических напряжений оксидная пленка растрескивается, это приводит к затеканию припоя в трещины, что обеспечивает контакт припоя с основным материалом. Дополнительное механическое удаление оксидной пленки способствует смачиванию припоем поверхности основного материала.

Получены результаты механических испытаний на срез при комнатной температуре и температуре -80°C . Определены значения максимального сдвигового напряжения при разрушении паяных внахлестку образцов. Проведен металлографический, электронноскопический, энергодисперсионный и фрактографический анализы изломов после разрушения для выявления причины разрушения паяных швов. Полученные результаты показывают, что предварительная подготовка поверхности основного материала и режимы пайки существенно влияют на механические свойства соединений. Температура механических испытаний оказывает незначительное влияние на значения максимального сдвигового напряжения. Экспериментальные данные свидетельствуют, что механизм разрушения смешанный и включает в себя зоны хрупкого (фасетчатого) и вязкого (чашечного) излома. Фрактографический анализ показал, что разрушение при срезе протекает по механизму распространения трещины в середине паяного образца по самым сильнонапряженным элементам микроструктуры, к ним относятся интерметаллидные фазы, оксиды и дефекты. Наличие оксидных включений в зоне шва подтверждается результатами картирования распределения химических элементов методом энергодисперсионного анализа.

Ключевые слова: высокотемпературная пайка, пайка натиранием, реакционно-контактная пайка, сплавы алюминия, цинковый припой, паяное соединение, пайка внахлест, разрушение на срез, фрактографический анализ изломов, механизм разрушения.

I.V. Shutov, M.D. Krivilyov, M.N. Korolev

Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

FRACTURE ANALYSIS OF BRAZED AL-MG-MN JOINTS

The fracture process of soldered AMg6 alloy (Al-6Mg-Mn) joints obtained by contact-reaction brazing using the zinc HTS-2000 braze was studied. The active contact brazing implies flux-free process where the oxide layer is removed via mechanical treatment of the sample surface and utilization of active brazes. Owing to intensive dissolution of zinc in aluminum at high temperatures, an interaction between the braze and bulk material occurs. Simultaneously, high thermal stresses facilitate fragmentation of the oxide layer. Thus the braze penetrates in cracks and reacts with bulk material. Additional mechanical scratching assists to better wetting of the bulk material.

The results of mechanical shear tests at room temperature and at $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ have been evaluated. The values of maximum shear stress at failure of lap-soldered specimens have been determined. SEM/EDAX and fractographic analysis of fractures were carried out to identify the cause of solder joint fracture. The obtained results show that the preliminary preparation of the bulk material surface and brazing conditions significantly affect the mechanical properties of the joints. The temperature of test environment does not influence the mechanical properties of the joints. Experimental data indicate that the fracture type is mixed, including brittle and ductile fracture zones. The fracture analysis revealed that fracture under shear stress occurs via formation of an extended crack perpendicular to the brazed seam. The crack spread along load elements of microstructure like intermetallic phases, oxides and defects. Presence of oxide inclusions along the seam is confirmed by element mapping using the EDAX technique.

Keywords: brazing, friction brazing, contact-reaction brazing, aluminum alloys, zinc braze, brazed joint, lap brazing, shear failure, fractographic fracture analysis, fracture mechanism.

Введение

Сплавы марки АМг, соответствующие тройной системе Al–Mg–Mn, обладают высокими механическими и эксплуатационными свойствами, сочетая хорошую пластичность, трещиностойкость и высокий предел текучести [1; 2]. Сплавы АМг имеют высокие показатели коррозионной стойкости и хорошей свариваемости в среде аргона и защитной атмосфере. Учитывая, что сплавы АМг хорошо поддаются формовке в горячем и холодном состоянии и обладают малым весом, они широко используются в авиационном и космическом машиностроении [3; 4]. В основном на производстве при создании сборных конструкций космического машиностроения используется технология сварки. Структура и однородность сварного шва обеспечивает конструкционную прочность, но при этом присутствует недостаточная надежность при значительных вибрационных и ударных нагрузках. В ряде технических задач при создании космической техники требуется соединять тонкостенные конструкции Al-сплавов, подверженные циклическим вибрационным нагрузкам, такие как элементы фюзеляжа, тепловые радиаторы, топливные баки [5]. В этом случае метод сварки неприменим, основным методом соединения деталей является пайка [3; 6; 7].

Сварка относится к металлургическому способу соединения деталей, пайку целесообразно отнести к физико-химическим методам [6; 7]. При пайке не происходит существенного изменения механических свойств матричного материала, так как соединение осуществляется за счет кристаллизации расплава припоя без значительного переплава матричного материала [8]. При этом важно обеспечить надежное соединение деталей, учитывая подготовку поверхности матричного материала, режимы пайки и способы нанесения припоя [9; 10]. Одной

из основных методик оценки механических свойств в паяном соединении является измерение максимального сдвигового напряжения при разрушении зоны паяного шва [11; 12]. В связи с этим в настоящей работе проведено исследование прочности паяных соединений сплава АМг6 методом разрушения на срез. Для этого выполнено комплексное исследование, включающее непосредственно механические испытания, анализ поверхности изломов методами фрактографии, металлографии и электронной микроскопии. Получены новые данные о взаимосвязи механических и структурно-фазовых характеристик паяных швов.

Материалы и методы исследования

Проведены испытания прочности паяных соединений пластин, изготовленных из сплава АМг6 с химическим составом согласно табл. 1. Пайку производили припоем HTS-2000 с химическим составом 97 вес. % Zn, 2 вес. % Cu, 1 вес. % Al [10; 13; 14]. Справочные механические свойства сплава АМг6: $\sigma_{0,2} - 120 \div 275$ МПа, $\sigma_B - 275 \div 375$ МПа, $\delta - 6 - 15$ %, $\tau_{cp} - 140 \div 170$ МПа (разброс данных связан с наличием или отсутствием механической обработки полуфабриката) [15; 16].

Таблица 1

Химический состав сплава АМг6 согласно ГОСТ [15; 16]

Сплав	Содержание элементов, вес. %					
	Al	Mg	Si	Mn	Ti	Be
АМг6	91,1–93	5,8–6,8	<0,4	0,5–0,8	0,02–0,1	0,0002–0,005

Для изготовления образцов для механических испытаний использовали пластины, вырезанные из листа АМг6 толщиной 1,5 мм. Заготовки имели геометрию и размеры, представленные на рис. 1.

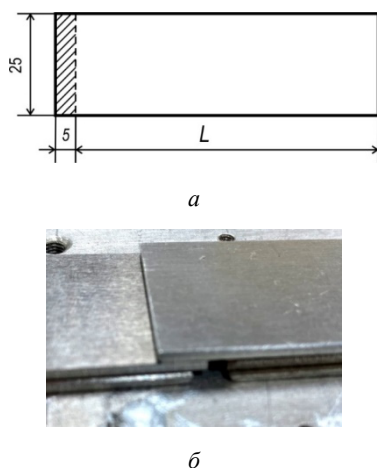


Рис. 1. Схема пластины (а) АМг6 для пайки внахлест. Номинальная толщина листа 1,5 мм. Длина L выбиралась для нижней пластины 80 мм, для верхней – 105 мм. Конеч (25 мм) более длинной пластины отгибали, чтобы удерживать и перемещать пластину в процессе пайки. Ширина пластины 25 мм, зона пайки 5 мм. Фотография двух пластин, расположенных внахлест перед пайкой (б)

Образцы готовили с помощью методики реакционно-контактной пайки, перед сопряжением пластин АМг6 поверхность образцов лудилась [17]. Температурный режим пайки устанавливали с помощью программируемого ПИД-регулятора «Овен ТРМ251», контроль температуры осуществляли термопарой ТХА. Лужение пластин проводилось трением прутка припоя о поверхность, при этом осуществлялось механическое удаление оксидной пленки [18; 19]. Образцы для механических испытаний получали путем соединения луженых заготовок методом пайки внахлест [20]. При пайке нагрев производили от комнатной температуры до 350 °С со скоростью 25 °С/мин и от 350 °С до 405 °С – со скоростью 5 °С/мин. После расплавления припоя пластины прижимали друг к другу и смещали пластины вдоль поверхности соприкосновения с целью механического разрушения образовавшегося на поверхности припоя слоя оксида цинка. Далее, не снижая усилия сжатия, образцы охлаждали до температуры 350 °С со скоростью 12 °С/мин. Затем продолжали охлаждение с той же скоростью без приложения прижимающего усилия до $t = 250$ °С.

Механические испытания проводили на испытательной машине Shimadzu, оснащенной термокамерой, позволяющей испытывать образцы при комнатной температуре и температуре –80 °С. Погрешность измерений обусловлена статистической ошибкой прибора: точность измерения силы $\pm 0,5$ % от измеренной величины, точность скорости траверсы $\pm 0,1$ %, жесткость рамы 120–180 кН/мм. Фактический режим механических испытаний представлял собой испытания на срез. Прило-

женное к зоне сая сдвиговое напряжение рассчитывали, относя приложенную нагрузку к площади сая по формуле:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{ср}}}{a \cdot b}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{ср}}$ – разрушающее напряжение при срезе, $F_{\text{ср}}$ – максимальная приложенная сила перед разрушением, a и b – длина и ширина зоны сая.

Фрактографическое исследование изломов производили с использованием анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел в составе оптического микроскопа Olympus GX53, системы оцифровки изображения и управляющей программы SIAMS 800 и растрового электронного микроскопа FEI Inspec. Макрофотографирование поверхности излома осуществляли с помощью оптического цифрового микроскопа Levenhuk DTX 700 LCD.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных механических испытаний приведены в табл. 2. По полученным данным видно, что температура в термокамере оказывает несущественное влияние на значения максимального напряжения при срезе. Среднее значение максимального сдвигового напряжения для серии испытаний составило порядка 50 МПа. Разрушение всех образцов происходило по месту пайки, кроме образца № 5, во время испытания которого произошло проскальзывание в захватах. После анализа результатов серии механических испытаний для дальнейшего изучения излома был выбран образец № 7 с наибольшим значением сдвигового напряжения.

Экспериментальные исследования в технических науках как обязательный элемент включают расчет погрешности полученных данных при установленном уровне достоверности. Проведенные механические испытания методологически сложно анализировать с применением стандартной теории ошибок по следующим причинам. Погрешность, вызванная случайным отклонением измеряемой величины от среднего значения, в статистических методах оценивается на основе гипотезы о характере распределения значений. Другими словами, требуется априорное знание или оценка функции распределения вероятности.

В работе проведено по четыре механических испытания для двух температур в термокамере (комнатной и –80 °С). Применить гипотезу о нормальном распределении вероятности не представляется возможным по следующим причинам. Эксперимент по пайке можно считать многофакторным, где расчет погрешностей по критерию

Стьюдента для каждой серии испытаний затруднен, так как множество параметров процесса влияют на конечный экспериментальный результат. К таким параметрам относятся не только температура, но и величина нахлеста, количество припоя, скорости нагрева и охлаждения, время выдержки и состояние поверхности основного материала после лужения припоем. Неучтенным фактором является исходное состояние основного материала, когда в нем присутствуют дефекты кристаллического строения и трещины, наследованные после нагартовки. Таким образом, в настоящем эксперименте надежно оценить погрешность возможно только для систематической ошибки, связанной с точностью измерительного оборудования. Полуколичественная оценка случайной погрешности проведена в виде определения интервала разброса значений и составила ± 15 МПа.

На участке пластической деформации присутствуют осцилляции, связанные с образованием микротрещин при нагружении образцов (рис. 2, а). Осцилляции связаны с резким снижением величины нагрузки, а вблизи значений, близких к разрушению

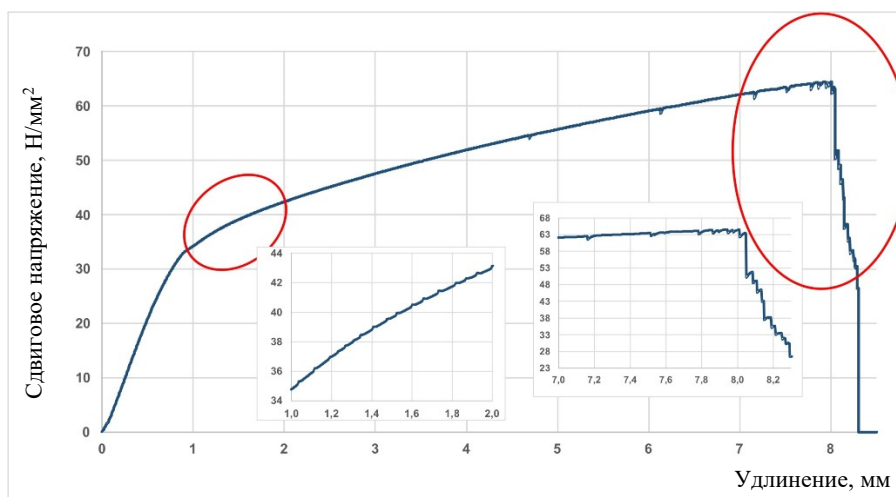
образца, осцилляции выражены сильнее. Существенное влияние на значения разрушающего напряжения при срезе оказывает деформация основного материала вблизи зоны пайки.

Таблица 2

Результаты механических испытаний на срез образцов АМгб, паяных внахлест

При температуре – 80 °С			При комнатной температуре		
№ обр.	максимальная сила $F_{ср}$	напряжения при срезе $\tau_{ср}$	№ обр.	максимальная сила $F_{ср}$	напряжения при срезе $\tau_{ср}$
	кН	МПа		кН	МПа
1	7400	55,7	2	7691	54,7
3	5435	40,4	6	7547	49,5
4	5639	37,6	7	9032	64,5
5	7220	54,0	8	7822	47,8

Отметим, что при испытаниях образцы фиксировались без проставочных пластин для поддержания соосности верхней и нижней пластин, что внесло определенную погрешность в результаты механических испытаний.



а



б

в

Рис. 2. Диаграмма нагружения образца № 7 в координатах «удлинение – сдвиговое напряжение», красным выделена область кратковременных снижений нагрузки вследствие образования микротрещин в зоне спая (а). Макроснимки изломов образца № 7 нижней и верхней пластин АМгб (б, в)

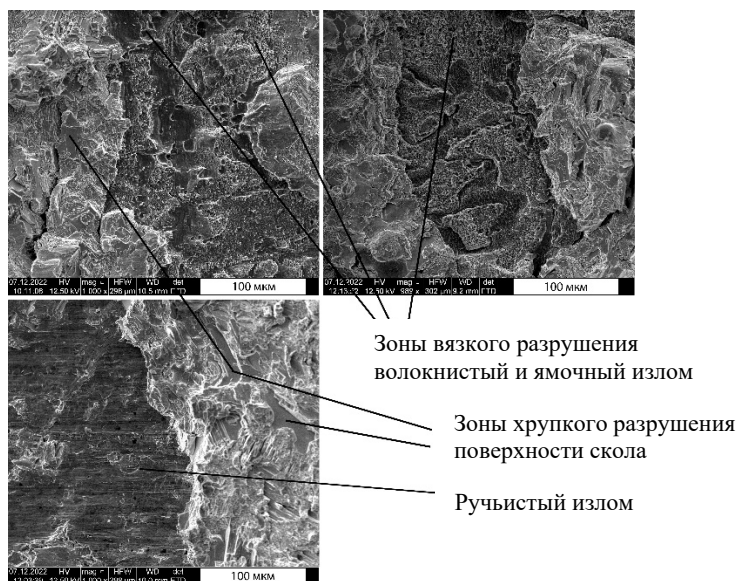


Рис. 3. Микрофотографии, полученные с помощью СЭМ, разрушения смешанного типа, где присутствуют зоны вязкого ямочного и волокнистого излома, фасетки скола и области хрупкого ручьистого излома

Если рассмотреть макроснимок образца после разрушения (рис. 2, б, в), то обнаруживается протяженная трещина вдоль зоны пайки на обеих сторонах изломов пластин. Предполагается, что образование трещины происходит по границе раздела двух типов микроструктур, где, соответственно, и наблюдаются зоны смешанного излома.

Сканирующий электронноскопический анализ образца № 7 (рис. 3) показал, что излом происходит по смешанному механизму: помимо фасетчатых областей хрупкого излома присутствуют зоны ямочного излома, соответствующие вязкому разрушению [21]. Области ямочного излома в основном находятся в порах или зонах глубоких трещин, это может говорить, что вязкий излом образуется в областях, обогащенных алюминием [22]. Размеры ямок излома порядка 20–30 мкм, что намного меньше областей хрупкого излома. Картирование рельефа изломов с помощью энергодисперсионного анализа EDAX подтверждает гипотезу, что механизм разрушения паяных образцов происходит по смешанному типу (рис. 4).

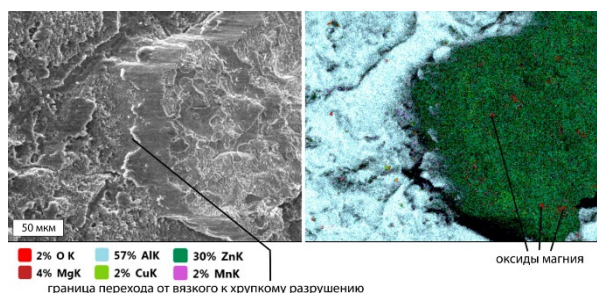


Рис. 4. EDAX картирование химического состава микрорельефа излома

На картах распределения химического состава (рис. 4) видно четкую границу перехода от шероховатого ямочного и волокнистого излома к ручьистому и фасетчатому виду. Сочетание механизмов при смешанном разрушении – скол в сочетании со срезом – представлено на рис. 5. Из рис. 4 с результатами СЭМ/EDAX видно, что в области разрушения распределены дисперсные включения, отмеченные красным цветом, это оксиды магния. Оксиды магния могут образовываться как на стадии подготовки образцов лужением, так и после разрушения образцов. В зоне спая соединения с магнием образуются благодаря диффузии магния из АМГб в зону расплава припоя.

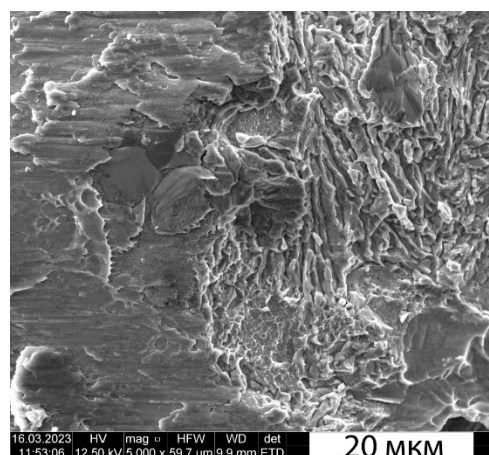


Рис. 5. Микрорельеф скола при смешанном разрушении

На основании фрактографического анализа всей совокупности образцов предложен механизм разрушения паяного соединения АМГб с цинковым припоем НТС-2000 (рис. 6). Предположительно,

разрушение при срезе протекает по механизму распространения трещины в середине паяного образца (см. рис. 6, а). Зоны галтели имеют прочное сцепление с подложкой АМг6, поэтому вблизи них разрушение идет по основному материалу, что наблюдается на отдельных пластинах АМг6 после разрушения (см. рис. 6, б). Зарождение трещины может происходить по включениям интерметаллидов в середине зоны шва.

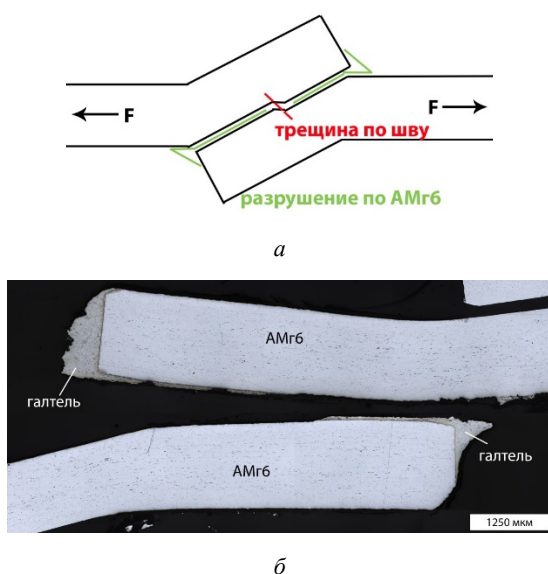


Рис. 6. Схема предложенного механизма разрушения паяного соединения (а). Разрушенный паяный образец после испытания на срез (б)

Модули упругости для алюминия и для цинка не сильно отличаются, поэтому можно сказать, что деформация протекает практически одинаково как для спая, так и для основного материала [10; 23; 24]. По достижении предела текучести алюминия нагрузка на спай намного возрастает, и возникают сильные напряжения в области спая. Это приводит к распространению трещины по самым сильнонапряженным элементам микроструктуры, к ним относятся интерметаллидные фазы, оксиды и дефекты [9; 25].

Заключение

Значения разрушающих напряжений $\tau_{ср}$ при срезе для паяных образцов из сплава АМг6 находятся в диапазоне 40–65 МПа и имеют разброс ± 15 МПа. При охлаждении от комнатной температуры до -80 °С не обнаружено значительного изменения прочности спая по результатам лабораторных механических испытаний в термокамере. Во всех случаях, когда разрушающее напряжение при срезе превышало порог 40 МПа, при напряжениях вблизи данного значения и выше на деформационной кривой регистрировались многочисленные кратковременные падения напряжения, что, вероятно, связано

с образованием и накоплением микротрещин в области спая. Указанные колебания напряжения (растягивающего усилия) регистрировались на участке пластической деформации до разрушения и отсутствовали на участке упругой деформации. Фрактрографический анализ показал, что при разрушении образцов образуется излом смешанного типа, где присутствуют области хрупкого рыхлого и вязкого ямочного излома протяженностью 30–100 мкм. Разрушение протекает с образованием множества микротрещин протяженностью от 100 до 200 мкм. Механические испытания на срез показали, что основными концентраторами напряжений являются зоны непропаев, которые образуются вследствие неполного удаления оксидов с поверхности матрицы и их последующей кристаллизацией в виде включений в зоне паяного шва. Наличие оксидных включение подтверждено результатами картирования распределения химических элементов комбинированным методом энергодисперсионного анализа.

Библиографический список

1. Мальцев, Т.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / Т.В. Мальцев. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1970. – 364 с.
2. Евстифеев, А.Д. Анализ скоростных зависимостей критических напряжений в алюминиевых сплавах системы Al–Mg при ударных нагрузках / А.Д. Евстифеев, И.В. Смирнов, Ю.В. Петров // Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62, вып. 11. – С. 1749–1754.
3. Davis, J.R. ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys / J.R. Davis // ASM International. – 1993. – 784 p.
4. Paton, B. Space Technologies, Materials and Structures / B. Paton // CRC Press. – 2003. – 565 p.
5. Creber, D.K. A Mechanistic Study of Aluminum Vacuum Brazing / D.K. Creber, J. Ball, D.J. Field // SAE Transactions. – 1987. – Vol. 96. – P. 648–655.
6. Никитинский, А.М. Пайка алюминия и его сплавов / А.М. Никитинский. – М.: Машиностроение, 1983. – 192 с.
7. Справочник по пайке / под ред. И.Е. Петрунина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 480 с.
8. Злобин С.К. Пайка тонкостенных волноводных трактов из сплавов на основе алюминия с использованием индукционного нагрева / С.К. Злобин, А.Н. Сдобников // Решетневские чтения. – 2010. – С. 59–60.
9. Сидельников, С.Б. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография / С.Б. Сидельников; Сиб. федер. университет, Ин-т цвет. металлов и материаловедения. – Красноярск, 2012. – 194 с.
10. Анализ смачивания и диффузионных процессов при контактном сплавлении припоев Zn–Cu–Al и Mg–Al со сплавом АМг3 / И.В. Шутов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. – № 8. – С. 80–86.

11. Лоцманов, С.Н. Руководство по пайке металлов / С.Н. Лоцманов. – М.: Оборонгиз, 1960. – 191 с.
12. Золоторевский, В.С. Механические свойства металлов / В.С. Золоторевский. – М.: МИСИС, 1998. – 400 с.
13. Фридляндер, И.Н. Высокопрочные сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu / И.Н. Фридляндер, О.Г. Сенаторова, Е.А. Ткаченко // Энциклопедия. Машиностроение. Т. 2–3: Цветные металлы и сплавы. – М.: Металлургия, 2001. – С. 94–128.
14. ГОСТ Р 3640-94 Цинк. Технические условия: постановлением Комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 27.06.96 N 433 введен в действие непосредственно в качестве государственного стандарта Российской Федерации.
15. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминия в деформируемые. Марки (с Изменениями N 1, 2, 3, с Поправками). – М., 1997.
16. ГОСТ 21631-76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. (с Изменениями N 1, 2, 3, с Поправками). – М., 1976.
17. ГОСТ 17325-79. Пайка и лужение. Основные термины и определения. – М., 1979. – 22 с.
18. EEA Aluminium Automotive Manual [Электронный ресурс]. – Joining Brazing, EEA. – Belgium. – 2015. – URL: <https://www.european-aluminium.eu/>
19. Петрунин, И.Е. Металловедение пайки / И.Е. Петрунин, И.Ю. Маркова, А.С. Екатова. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
20. TALAT Lecture 4601 Introduction to Brazing of Aluminium Alloys 1994 EAA. – European Aluminium Association. – 26 p.
21. Феллоуз, Дж. Фрактография и атлас фрактограмм: справочное издание / Дж. Феллоуз; пер. с англ. Е.А. Шур под ред. М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1982. – 489 с.
22. Ваулина, О.Ю. Макроскопический метод исследования металлов и сплавов Лабораторный практикум: метод, указ. по выполнению лаб. работы по курсу «Общее материаловедение. Материаловедение и технологии материалов» / О.Ю. Ваулина // Томск: Изд. ТПУ, 2015. – 21 с.
23. Song-Mao, Liang. Analysis of microstructure formation in cast Zn alloys derived from computational thermodynamics of the Zn–Al–Cu–Mg system / Song-Mao Liang // Journal of Materials Science. – 2019. – Vol. 54. – P. 9887–9906.
24. Антипов, В.В. Высокопрочные Al–Zn–Mg–Cu-сплавы и легкие Al–Li-сплавы / В.В. Антипов, О.Г. Сенаторова, Е.А. Ткаченко // МИТОМ. – 2011. – 19 с.
25. Барз, В.Р. Физические основы упрочнения и разрушения материалов: учебное пособие / В.Р. Барз, М.А. Филиппов. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2017. – 192 с.
1. Mal'tsev T.V. Metallografiia promyshlennykh tsvetnykh metallov i splavov [Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys]. Ed. T.V. Mal'tsev. 2nd. Izdatel'stvo «Metallurgii», 1970, 364 p.
2. Evstifeev A.D. at al. Analiz skorostnykh zavisimostei kriticheskikh napriazhenii v aluminievnykh splavakh sistemy Al–Mg pri udarnykh nagruzkakh [Analysis of velocity dependences of critical stresses in aluminum alloys of Al–Mg system under impact loads]. *Fizika tverdogo tela*, 2020, vol. 62, no.11, pp. 1749–1754.
3. Davis J.R. ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys. *ASM International*, 1993, 784 p.
4. Paton B. Space Technologies. *Materials and Structures*, CRC Press, 2003, 565 p.
5. Creber D.K. A Mechanistic Study of Aluminum Vacuum Brazing. *SAE Transactions*, 1987, vol. 96, pp. 648–655.
6. Nikitinskii A.M. Paika aliuminiia i ego splavov [Brazing of aluminum and its alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 192 p.
7. Spravochnik po paike [Soldering Handbook]. Ed. I.E. Petrunina. 3rd. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 480 p.
8. Zlobin S.K. Paika tonkostennykh volnovodnykh traktov iz splavov na osnove aliuminiia s ispol'zovaniem induktsionnogo nagreva [Brazing of thin-walled waveguide paths from aluminum-based alloys using induction heating]. *Reshetnevskie chteniia*, 2010, pp. 59–60.
9. Sidel'nikov S.B. Mekhanicheskie svoistva aluminievnykh splavov. Monografiia [Mechanical properties of aluminum alloys: monograph]. Sibirskii federalnyi universitet, Institut tsvetnykh metallov i materialovedeniia. Krasnoarsk, 2012, 194 p.
10. Shutov I.V. et al. Analiz smachivaniia i difuzionnykh protsessov pri kontaktnom splavlenii pripoev Zn–Cu–Al i Mg–Al so splavom AMg3 [Analysis of wetting and diffusion processes in contact alloying of Zn–Cu–Al and Mg–Al solders with the AMg3 alloy]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniia*, 2022, no. 8, pp. 80–86.
11. Lotsmanov S.N. Rukovodstvo po paike metallov [Guide to soldering metals]. Moscow: Oborongiz, 1960, 191 p.
12. Zolotorevskii V. S. Mekhanicheskie svoistva metallov [Mechanical properties of metals]. Moscow: MISIS, 1998, 400 p.
13. Fridliander I.N., Senatorova O.G., Tkachenko E.A. Vysokoprochnye splavy sistemy Al – Zn – Mg – Cu [High-strength alloys of the Al–Zn–Mg–Cu system]. *Entsiklopediia. Mashinostroenie*, vol. II-3 "Tsvetnye metally i splavy". Moscow: Metallurgii, 2001, pp. 94 – 128.
14. GOST R 3640-94 Tsink. Tekhnicheskie uslovia: postanovleniem Komiteta Rossiiskoi Federatsii po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii [Zinc. Technical conditions: by the Resolution of the Committee of the Russian Federation for Standardization, Metrology and Certification].
15. GOST 4784-97 Aliuminii i splavy aluminievye deformiruemye. Marki [Aluminum and aluminum deformable alloys. Grades] (s Izmeneniami N 1, 2, 3, s Popravkami).
16. GOST 21631-76 Listy iz aliuminiia i aluminievnykh splavov [Aluminum and aluminum alloy sheets] (s Izmeneniami N 1, 2, 3, s Popravkami). Moscow, 1976.
17. GOST 17325-79. Paika i luzhenie. Osnovnye terminy i opredeleniia [Soldering and tinning. Basic terms and definitions]. Moscow, 1979, 22 p.
18. EEA Aluminium Automotive Manual. – Joining Brazing, EEA. Belgium, 2015. URL: <https://www.european-aluminium.eu/>
19. Petrunin I.E., Markova I.Iu., Ekatova A.S. Metallovedenie paike [Metallurgy of brazing]. Moscow: Metallurgii, 1976, 264 p.

References

20. TALAT Lecture 4601 Introduction to Brazing of Aluminium Alloys 1994 EAA. European Aluminium Association, 26 p.

21. Fellouz Dzh. Fraktografiia i atlas fraktogramm Spravochnoe izdanie [Fractography and Atlas of Fractograms: Reference Edition]. Ed. Bernshteina M.L. Moscow: Metallurgiiia, 1982, 489 p.

22. Vaulina O.Iu. Makroskopicheskiy metod issledovaniia metallov i splavov Laboratornyi praktikum [Macroscopic method of investigation of metals and alloys Laboratory practice]. Tomsk: Izdatel'stvo TPU, 2015, 21 p.

23. Song-Mao L. Analysis of microstructure formation in cast Zn alloys derived from computational thermodynamics of the Zn–Al–Cu–Mg system. *Journal of Materials Science*, 2019, vol. 54, pp. 9887–9906

24. Antipov V.V., Senatorova O. G., Tkachenko E. A. Vysokoprochnye Al – Zn – Mg – Cu-splavy i legkie Al–Li-splavy. *MITOM*, 2011, 19 p.

25. Baraz V.R., Filippov M.A. Fizicheskie osnovy uprochneniia i razrusheniia materialov: uchebnoe posobie. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2017, 192 p.

Поступила: 27.11.2023

Одобрена: 27.12.2023

Принята к публикации: 15.02.2024

Об авторах

Шутов Илья Владиславович (Ижевск, Российская Федерация) – младший научный сотрудник лаборатории физики конденсированных сред (Российская Федерация, 426034, г. Ижевск, ул. Университетская 1, корп. 4, e-mail: shutiny@gmail.com).

Кривилев Михаил Дмитриевич (Ижевск, Российская Федерация) – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики конденсированных

сред (Российская Федерация, 426034, г. Ижевск, ул. Университетская 1, корп. 4, e-mail: mk@udsu.ru).

Королев Михаил Николаевич (Ижевск, Российская Федерация) – кандидат физико-математических наук, инженер кафедры общей физики (Российская Федерация, 426034, г. Ижевск, ул. Университетская 1, корп. 4, e-mail: korolev59@mail.ru).

About the authors

Ilya V. Shutov (Izhevsk, Russian Federation) – junior researcher at the Laboratory of Condensed Matter Physics of Udmurt State University (building 4, 1, Universitetskaya Str., Izhevsk, 426034, Russian Federation, e-mail: shutiny@gmail.com).

Mikhail D. Krivilyov (Izhevsk, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Condensed Matter Physics of Udmurt State University (building 4, 1, Universitetskaya Str., Izhevsk, 426034, Russian Federation, e-mail: mk@udsu.ru).

Mikhail N. Korolev (Izhevsk, Russian Federation) – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, engineer of the Department of General Physics of Udmurt State University (building 4, 1, Universitetskaya Str., Izhevsk, 426034, Russian Federation, e-mail: korolev59@mail.ru).

Финансирование. Проведение работ осуществлялось согласно техническому заданию в рамках СЧ ОКР «МКС (Наука) (Наука-1) по заказу АО «ЦНИИмаш» и ГК Роскосмос. Авторы выражают признательность за финансовую поддержку исследований в рамках целевых работ «РЕАЛ», проводимых на борту МКС.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.