

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Салтыков, И.Р. Влияние качества поверхности пластины АМг6 на течение жидкого припоя Zn-Cu-Al под слоем оксида алюминия при бесфлюсовой наплавке / И.Р. Салтыков, С.А. Груздь, И.В. Шутов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 43–51. DOI: 10.15593/2224-9877/2025.1.05

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

Saltykov I.R., Gruzd S.A., Shutov I.V. Influence of AMg6 plate surface quality on Zn-Cu-Al liquid solder flow under aluminum oxide layer at fluxless surfacing. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2025, vol. 27, no. 1, pp. 43-51. DOI: 10.15593/2224-9877/2025.1.05

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 27, № 1, 2025
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2025.1.05

УДК 621.791.3; 621.791.36

И.Р. Салтыков, С.А. Груздь, И.В. Шутов

Удмуртский государственный университет, Ижевск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ АМг6
НА ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО ПРИПОЯ Zn-Cu-Al ПОД СЛОЕМ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ
ПРИ БЕСФЛЮСОВОЙ НАПЛАВКЕ

На сегодняшний день актуальной задачей является разработка технологии соединения изделий системы Al-Mg-Mn с помощью высокотемпературной пайки (ВТП). В данной работе исследуются закономерности процесса растекания припоя системы Zn-Cu-Al по подложке из сплава АМг6 в зависимости от качества поверхности основного материала (АМг6). Под качеством поверхности в данном случае понимается направление предварительной абразивной обработки и наличие крупных царапин. Исследуемые образцы подвергались нагреву по режиму пайки с увеличенным временем выдержки. Подготовка образцов включала предварительное лужение подложки материалом припоя. Для более эффективного взаимодействия производилась механическая зачистка оксида посредством трения пластины из поликристаллического оксида алюминия о поверхность основного материала под слоем расплава припоя. При достижении температуры плавления припоя наблюдалось его распространение под оксидной плёнкой основного материала АМг6. В результате область растекания припоя визуально разделялась на две зоны, которые были исследованы с помощью визуального наблюдения, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и оптической микроскопии. Выявленные зависимости скорости растекания от времени показывают влияние направления абразивной обработки поверхности основного материала на движение по ней расплава припоя. Показано также влияние отдельных более крупных дефектов (царапин) на поверхности основного материала. Механизм их воздействия на течение припоя схож с механизмом действия мелких царапин, оставляемых шлифовкой. Увеличение или уменьшение скорости растекания зависит от пространственной ориентации царапин относительно направления движения припоя. Перпендикулярно расположенные царапины уменьшают скорость растекания, совпадающие с направлением – увеличивают. Также полученные данные свидетельствуют об увеличении шероховатости в области взаимодействия припоя с основным материалом.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, АМг, цинковый припой, высокотемпературная пайка, бесфлюсовая пайка, растекание, смачивание, течение под оксидом, шероховатость, поверхностные дефекты.

I.R. Saltykov, S.A. Gruzdz, I.V. Shutov

Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

INFLUENCE OF AMg6 PLATE SURFACE QUALITY ON Zn-Cu-Al LIQUID SOLDER FLOW UNDER ALUMINUM OXIDE LAYER AT FLUXLESS SURFACING

Today, the development of technology for joining products of the Al-Mg-Mn system using brazing is an urgent task. In this paper we study the regularities of the flow process of solder of Zn-Cu-Al system on the substrate of AMg6 alloy depending on the surface quality of the base material (AMg6). The surface quality in this case means the direction of preliminary abrasive treatment and the presence of large scratches. The investigated samples were subjected to heating according to the soldering mode with increased holding time. Sample preparation included preliminary tinning of the substrate with solder material. For more effective interaction, mechanical stripping of the oxide was performed by friction of a polycrystalline aluminum oxide plate against the surface of the base material under the solder melt layer. When the melting temperature of the solder was reached, its spreading under the oxide film of the base material AMg6 was observed. As a result, the solder propagation area was visually divided into two zones, which were investigated by visual observation, scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy. The revealed time dependences of the spreading velocity show the influence of the abrasive treatment direction of the base material surface on the movement of the solder melt along it. The influence of some larger defects (scratches) on the surface of the base material is also shown. The mechanism of their influence on solder flow is similar to the mechanism of small scratches left by grinding. The increase or decrease of the flow rate depends on the spatial orientation of the scratches relative to the direction of solder flow. Perpendicularly located scratches decrease the spreading rate, those coinciding with the direction – increase it. Also the obtained data indicate an increase in roughness in the area of interaction of solder with the base material.

Keywords: aluminum alloys, AMg, zinc solder, brazing, fluxless brazing, spreading, wetting, flow under oxide, roughness, surface defects.

Введение

Актуальной проблемой космической техники на сегодняшний день является устранение повреждений на конструкционных элементах в условиях космоса, в частности на МКС. Их появление может быть вызвано мелкими твердыми частицами (космический мусор и т.п.), двигающимися по орбите с большой скоростью. Сталкиваясь с фюзеляжем станции, они вызывают появление механических повреждений, таких как сколы и трещины. Появление данных дефектов может приводить к снижению прочности конструкций и утечке кислорода. Для их ремонта на данный момент применяются полимерные материалы, которые могут герметизировать сквозные дефекты, но имеют малое упрочняющее влияние и быстро деградируют в условиях космоса [1; 2]. Ремонт такого рода не снижает вероятности зарождения новых трещин и роста старых, что в перспективе может приводить к ещё большему разупрочнению конструкций и утечке кислорода. Для решения данной проблемы предлагается применять высокотемпературную пайку (ВТП) [3]. Данный метод позволяет получать прочные и термостойкие металлургические соединения между паяемыми деталями [4]. Также с его помощью возможен ремонт дефектов на уже готовых изделиях. Технология ВТП занимает промежуточное положение между сваркой и пайкой. Для применения в условиях космоса такой метод является предпочтительным, так как в сравнении с аналогами более энергоэффективен, пожаробезопасен, может применяться в отсутствие флюсов и в условиях отсутствия гравитации. Реальные эксперименты также показали возможность применения данной технологии в условиях космоса [5–7].

Большинство видов пайки, в частности ВТП, являются сложными физико-химическими процессами, включающими явления смачивания и вязкого течения. Хорошая смачиваемость поверхности паяемого изделия обеспечивает возможность растекания расплавленного припоя в необходимой области, а хорошая жидкотекучесть расплава позволяет проникать в труднодоступные участки конструкций. При рассмотрении процессов смачивания важным параметром является вид предварительной механической обработки поверхности паяемого изделия [8].

Большое число конструкций в космической технике изготовлено с применением алюминиевых сплавов [9]. Их пайка затруднена наличием на поверхности паяемого изделия тугоплавкой оксидной пленки, которая препятствует взаимодействию между припоем и паяемым материалом [10]. Удаление оксидного слоя с поверхности металла в общем случае возможно двумя способами: механически и химически. Механическая зачистка проводится без доступа кислорода, чтобы препятствовать восстановлению оксида, химические методы удаления оксида относят к технологиям с применением флюсов [11; 12].

Для разрабатываемой технологии применение флюса нежелательно по ряду причин. Во-первых, использование флюсов может вызывать эрозию матричного материала и, как следствие, ухудшение его механических характеристик [13]. Во-вторых, при удалении оксидной пленки с поверхности в безвоздушном пространстве её восстановление после пайки затруднительно. Это обстоятельство может повлечь за собой снижение коррозионной стойкости и прочности ремонтируемых участков конструкций.

В данной работе представлены результаты исследования процессов смачивания и растекания припоя Zn-Cu-Al по пластинам из алюминиевого сплава АМг6. Рассмотрена зависимость кинетики движения жидкого припоя от шероховатости и направления механической обработки поверхности подложки. Отмечено, что взаимодействие припоя с основным материалом АМг6 происходит под слоем оксидной плёнки последнего.

Актуальность исследования прежде всего обоснована выбором исследуемых материалов. Сплавы системы Al-Mg-Mn активно применяются в авиакосмической промышленности [9], в частности из сплава АМг6 изготовлен фюзеляж российского сегмента МКС. Для изделий из сплавов АМг6 хорошо изучен способ соединения сваркой, однако сведений об их пайке в литературе крайне мало. Используемый припой системы Zn-Cu-Al был выбран на основе экспериментальных исследований по результатам, которых показал наиболее активное взаимодействие с основным материалом АМг6 и возможность получения прочных паяных соединений на его основе [14; 15].

Материалы и методы исследования

Проведено исследование растекания припоя HTS-2000 с элементным составом 97 вес. % Zn, 2 вес. % Cu, 1 вес. % Al [16; 17] по пластинам из алюминиевого сплава АМг6, химический состав которого представлен в табл. 1. Варьируемыми характеристиками выступали направление предварительной механической обработки пластин АМг6 и наличие отдельных крупных дефектов на их поверхности.

Таблица 1

Химический состав сплава АМг6
согласно ГОСТ [18–20]

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

Перед проведением термических испытаний пластины АМг6 подвергались шлифовке с помощью абразивных материалов. Исходные пластины АМг6 изготовлены методом проката и соответственно имеют так называемые «полосы проката», то есть определенную ориентацию макроскопических дефектов поверхности (различных неровностей и царапин). В соответствии с этим фактором образцы были подвергнуты шлифовке в различных направлениях: образец 1 – вдоль проката, образец 2 – перпендикулярно прокату, образец 3 – хаотично.

Также для отслеживания движения припоя на образцы была нанесена разметка. На образцы 1 и 2 наносились линии термостойким маркером, на образец 3 риски (царапины) с помощью твердосплавного резака. Информация о подготовленных образцах представлена в табл. 2.

Таблица 2

Данные по подготовке образцов

Параметр	Значение		
Номер образца	1	2	3
Геометрические размеры, мм	60×70	60×70	40×40
Направление шлифовки	По направлению проката	Перпендикулярно направлению проката	Хаотично
Размер абразива (маркировка по ISO 6344)	P2500	P2500	P2500
Масса припоя, г	0,45	0,23	0,10

Шероховатость поверхности пластин после подготовки измеряли оптическим методом. С помощью оптического микроскопа OLYMPUS с дополнительным программным обеспечением SIAMS 3D Viewer.

Схема проведения эксперимента показана на рис. 1. Подготовленная пластина располагалась на нагревательном элементе и фиксировалась болтами. После нагрева до 400 °С проводилось лужение. С помощью пластинки из поликристаллического Al₂O₃ производилось трение о поверхность пластины АМг6 под слоем расплава припоя. Далее образец охлаждался до комнатной температуры. На следующем этапе луженый образец проходил основной цикл термической обработки со скоростью нагрева $V_{\text{нагр}} \approx 7 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, выдержкой $t_{\text{выд}} = 1 \text{ ч}$, максимальной температурой $T_{\text{макс}} = 430 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и скоростью охлаждения $V_{\text{охл}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Результаты и их обсуждение

При достижении температуры плавления припой начинает растекаться по поверхности алюминиевой подложки под слоем оксида. Движение расплава происходит за счёт сил смачивания и диффузии преимущественно по дефектным структурам основного материала, например, по границам зёрен [21] и различным дефектам поверхности, таким как следы механической обработки (царапины, риски) [22]. Также стоит отметить вклад диффузионных процессов в динамику растекания. Процесс может ускоряться благодаря диффузии компонентов припоя в поверхностном слое подложки, где из-за высокой плотности дефектов коэффициент диффузии может на порядки превышать аналогичный

объёмный коэффициент [23; 24]. Однако это также ведёт к увеличению динамической вязкости жидкого припоя, так как в нем возрастает концентрация более тугоплавкого элемента (Al), который растворяется цинком. Предельное содержание алюминия в цинке при температуре выдержки демонстрирует диаграмма состояния Al-Zn (рис. 2).

Вид образцов после проведения эксперимента (рис. 3). На фотографиях пластин (см. рис. 3) отчетливо видна область растекания припоя, которая на всех образцах имеет симметричную форму относительно его начального положения. Однако на образце №1 (см. рис. 3, а) припой занял большую площадь в направлении проката, чем в поперечном.

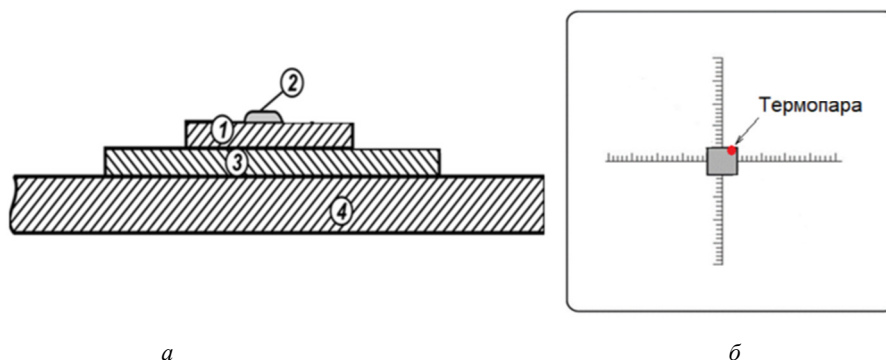


Рис. 1. Схема (а) расположения пластины на основании нагревательного элемента: 1 – пластина АМг6, 2 – припой HTS 2000, 3 – нагревательный элемент, 4 – основание; схема (б) экспериментального образца (вид сверху)

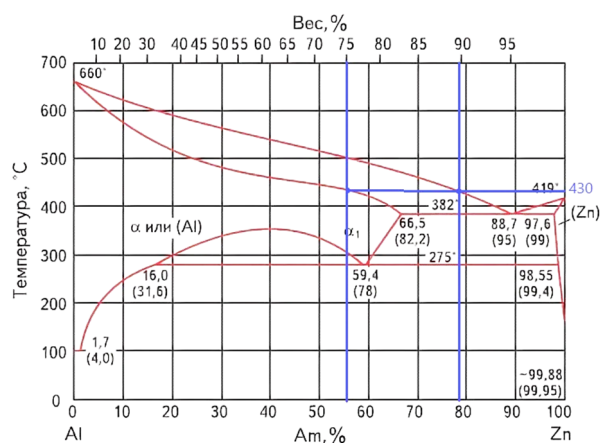


Рис. 2. Фазовая диаграмма Al-Zn. Синей линией отмечена температура выдержки и предельные концентрации растворенного Al во внутренней жидкой зоне припоя [25]

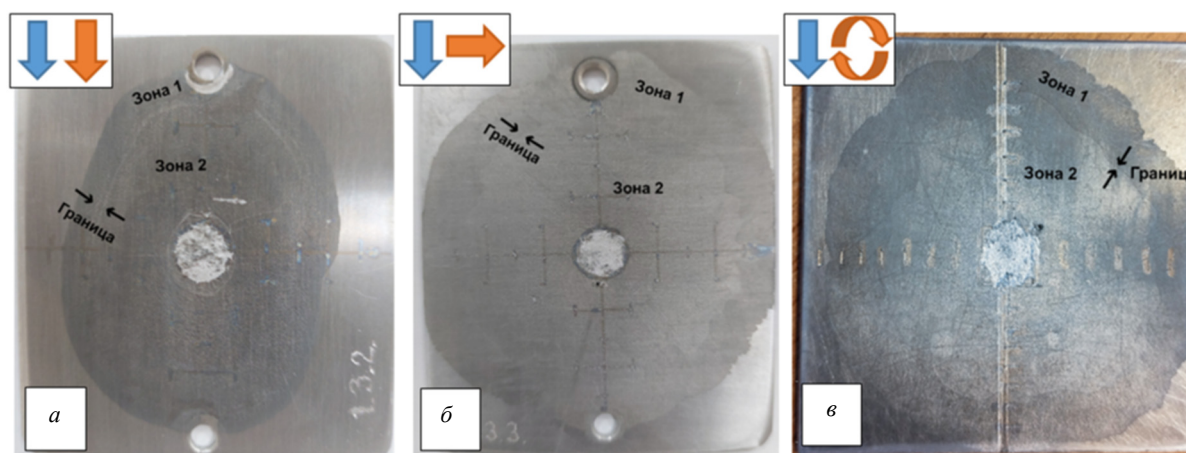


Рис. 3. Вид образцов после проведения эксперимента: а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3. Обозначены внешняя (зона 1) и внутренняя (зона 2) области растекания припоя и граница между ними. Большими стрелками показаны направление проката (синяя) и направление шлифовки (оранжевая)

Тогда как на пластинах №2 и №3 (см. рис. 3, б, в) припой растекался равномерно во всех четырех направлениях. Исходя из этого, можно сделать вывод о влиянии направления предварительной механической обработки на кинетику движения расплава припоя по поверхности пластины под слоем оксида. Более эффективно растекание происходит в направлении проката, так как оставленные данной обработкой углубления играют роль каналов. Данная закономерность нарушается, если провести предварительную механическую обработку в поперечном направлении или хаотично. При такой обработке распределение припоя становится равномерным во всех четырех направлениях (см. рис. 3, б, в).

На рис. 4 приведены графики зависимости диаметра области, занятой припоем и скорости его растекания от времени. Представленные кривые получены интерполяцией данных эксперимента

методом наименьших квадратов полиномом второй степени. Для образца №1 средняя скорость движения припоя в направлении $X \sim$ в 2 раза ниже, чем в направлении Y (см. рис. 4, б). К моменту выхода графиков для диаметра (рис. 4, а) на плато проходит около 40 мин. При этом значения диаметров зоны 1 составляют для оси $Y = 60$ мкм, для оси $X = 30$ мкм. Графики для образца №2 (см. рис. 4, в, г) показывают более однородное распределение по скоростям, которые отличаются по осям X и Y в среднем менее чем в 1,5 раза. Соответственно асимметрия области растекания припоя низкая. Примечательно, что скорость движения в направлении предварительной механической обработки выше, чем в направлении проката. Это говорит о том, что влияние структурной анизотропии, полученной в ходе прокатной обработки, ниже, чем влияние механической обработки поверхности абразивом.

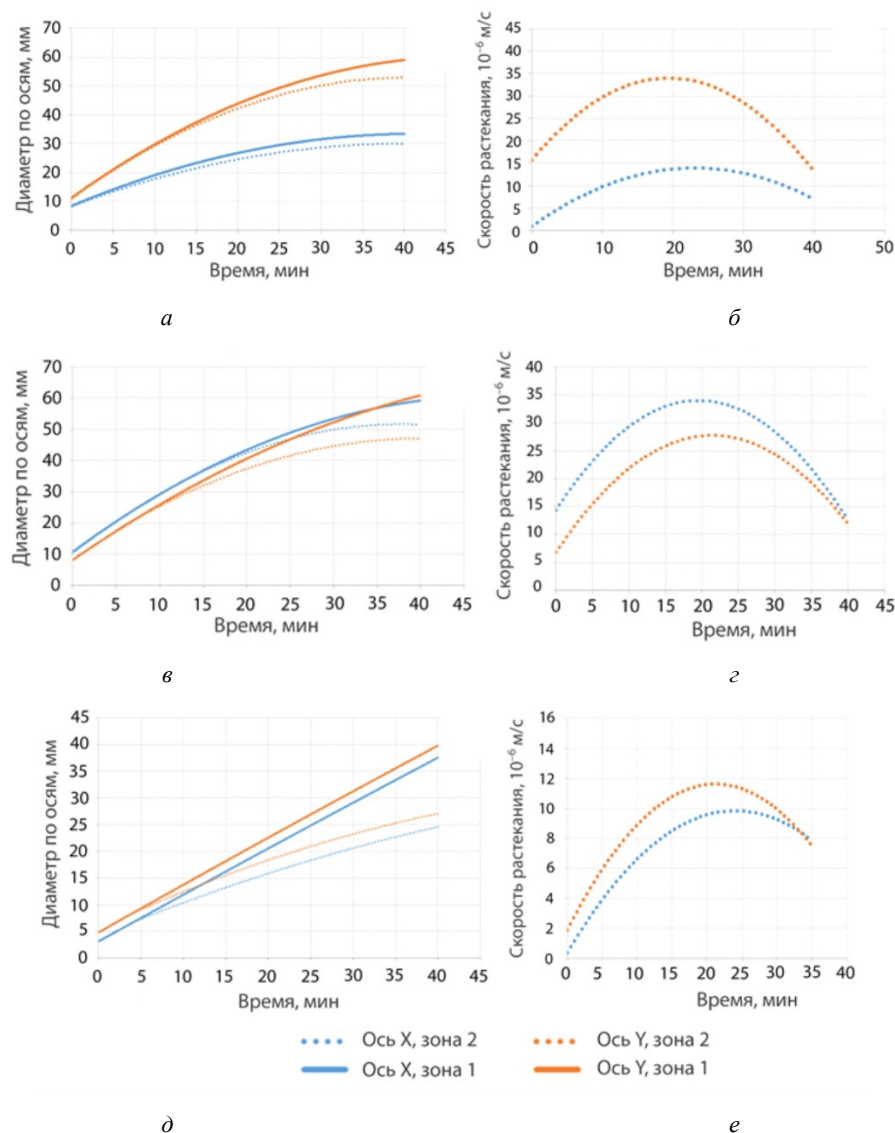


Рис. 4. Графики зависимости диаметров и скоростей растекания от времени для исследованных образцов: а, б – образец №1; в, г – образец №2; д, е – образец №3

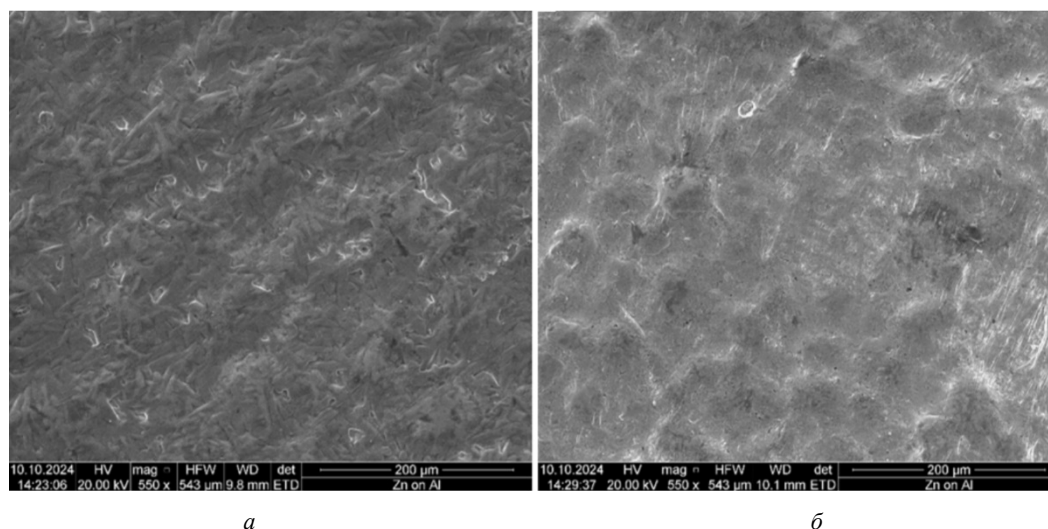


Рис. 5. Снимки СЭМ поверхности образца АМг6 после проведения термических испытаний с припоем Zn-Cu-Al: а – зона 1; б – зона 2

Для образца №3, имеющего хаотичное направление предварительной механической обработки, фактором, вызывающим асимметрию распределения припоя, были размерные риски. Обнаруженная закономерность заключается в том, что риски, нанесенные перпендикулярно движению расплава, замедляют его распространение, а риски, совпадающие с направлением растекания, его движению способствуют. Как видно из графиков (см. рис. 4, д, е) припой активнее распространяется в направлении оси Y, так как продольные риски играют роль каналов. Общей характеристикой графиков зависимости скорости растекания от времени для всех трех образцов (см. рис. 4, б, г, е) является то, что максимальное значение скорости достигается с 20-й по 25-ю мин. Несмотря на различия в предварительной обработке поверхности образцов, массе припоя и геометрических размерах, время выхода на максимальную скорость растекания для исследуемой системы при данном режиме остается постоянным.

По результатам проведения экспериментов в области, занятой припоем, визуально выделяются две различных зоны и четкая переходная граница между ними (см. рис. 3). На рис. 5 представлены снимки поверхности описанных зон, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Видно, что в зоне 1 (см. рис. 5, а) структурные элементы имеют резкие границы, хаотичную форму и расположение, зона 2 (см. рис. 5, б) при этом более однородна. Образование такой структуры поверхности можно объяснить особенностями распространения припоя. Предположительно первоначально происходит капиллярное течение по дефектам структуры, в частности межзеренному пространству в зоне 1.

Зона 2 образуется впоследствии, в ходе растворения жидким припоем матричного материала, когда концентрация цинка в подложке становится больше 75 вес % (см. рис. 2). В конечном счете зона 2 представляет собой общий бассейн расплава с условно однородным химическим составом. В ходе распространения припоя обе зоны движутся последовательно до момента, когда лимитирующий фактор не остановит процесс. Таким фактором может служить объем припоя, концентрация химических элементов в расплаве или температура. Последние два неразрывно связаны из-за различий в температурах ликвидус цинка и алюминия (см. рис. 2). Финальной границей бассейна расплава, является конец зоны 2.

Результаты измерения шероховатости (табл. 3) показывают, что область, занятая припоем, независимо от зоны, имеет показатели Ra и Rz, от 2,5 до 5 раз превышающие значения для исходной пластины. Такое поведение поверхности можно объяснить деформационными изменениями плёнки оксида алюминия, под которой происходит растекание припоя, а также неоднородностью химического состава в зоне взаимодействия.

Таблица 3

Данные по шероховатости образцов

Область поверхности	Характеристика	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Исходная пластина	Ra, мкм	0,31	0,28	0,27
	Rz, мкм	3,77	2,11	2,97
Зона 1 (внешняя)	Ra, мкм	1,50	1,29	1,18
	Rz, мкм	13,00	8,18	9,30
Зона 2 (внутренняя)	Ra, мкм	1,87	0,97	2,12
	Rz, мкм	15,00	5,12	13,90

Заключение

Проведено исследование процесса растекания припоя системы Zn-Cu-Al по поверхности пластин из алюминиевого сплава АМг6 при температурном режиме, соответствующем условиям пайки с увеличенным временем выдержки. Длительная выдержка при максимальной температуре позволила более детально рассмотреть процессы растекания и взаимодействия припоя с подложкой.

Основные полученные выводы:

1. Течение жидкого припоя Zn-Cu-Al по поверхности алюминиевого сплава АМг6 происходит под оксидной плёнкой. Это позволяет припою более активно взаимодействовать с паяемым материалом.

2. В области, занятой припоем, образуются две зоны, отличные друг от друга по структуре поверхности и имеющие чёткие границы с основным материалом и между собой. Шероховатость в обеих зонах от 2,5 до 5 раз превышает значения для поверхности исходной пластины.

3. Площадь и форма области, которую занимает припой при растекании, зависит от состояния поверхности паяемого материала. На это, в свою очередь, влияет метод получения конкретного изделия (прокатка, ковка и т.д.), а также вид и направление абразивной обработки. Оставленные на поверхности углубления играют роль каналов и в зависимости от своей пространственной ориентации ускоряют либо замедляют течение расплава в определенном направлении.

4. Также отмечен повторяющийся для всех рассмотренных образцов интервал времени до выхода на максимальную скорость растекания припоя. Его значение составляет 20–25 мин и не зависит от массы припоя, геометрических размеров пластин и направления предварительной абразивной обработки. Данная зависимость предположительно является константой для исследованной системы «сплав – припой» при данном температурном режиме.

Библиографический список

1. Пат. 2131386 Российская Федерация, МПК В64G 1/52, В23P 6/00. Способ герметизации дефектов оболочек космических объектов и устройство для его реализации (варианты) / Борисов В.А., Денисов С.В. и др.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество открытого типа «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П.Королева». – № 97122048/02; заявл. 30.12.97; опубл. 10.06.99. – 7 с.
2. Шарова, И.А. Отечественный и зарубежный опыт в области разработки эпоксидных клеев холодного отверждения / И.А. Шарова // Труды ВИАМ. – 2014. – № 7. – С. 5 (1–15).
3. Sekulic, D.P. *Advances in Brazing: Science, Technology and Applications* / D.P. Sekulic. – Oxford: Woodhead Publishing, 2013. – 587 p.

4. Jacobson, D.M. *Principles of brazing* / D.M. Jacobson, G. Humpston. – USA: ASM International, 2005. – 268 p.
5. Easton, J.W. *Soldering in a Reduced Gravity Environment (SoRGE)* / J.W. Easton, P.M. Struk. – 2012. – NASA/TM-2012-217119. – 61 p.
6. Paton, B.E. *Space: Technologies, Materials, and Structures* / B.E. Paton. – London: Taylor & Francis, 2003. – 558 p.
7. *Non-isothermal Wetting of an Al Alloy Pin by Al-Si Melt under Terrestrial and Microgravity Conditions* / S.A. Gruzd, M.D. Krivilyov, D.S. Samsonov, Y. Wu, D.P. Sekulic, S.D. Mesarovic // *Microgravity Science and Technology*. – 2022. – № 34. – P. 65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12217-022-09973-0>
8. Петрунин, И.Е. Пайка металлов / И.Е. Петрунин, С.Н. Лоцманов, Г.А. Николаев. – М.: Металлургия, 1973. – 280 с.
9. *Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry* / Shuang-Shuang Li, Xin Yue, Qing-Yuan Li, Hee-Li Peng [et. al.] // *Journal of materials research and technology*. – 2023. – № 27. – P. 944–983. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.09.274
10. *Справочник по пайке* / под ред. И.Е. Петрунина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 480 с.
11. Pstrus, J. *Wetting of Cu and Al by Sn-Zn and Zn-Al Eutectic Alloys* / J. Pstrus, P. Fima, T. Gancarz // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2012. – No. 21. – P. 606–613. DOI: 10.1007/s11665-012-0174-7
12. Mebs, R.W. *Solders and Soldering* / R.W. Mebs, W.F. Roeser. – USA: National Bureau of Standards Circular 492, 1950. – 12 p.
13. *A Review on Parallel Development of Flux Design and Thermodynamics Subject to Submerged Arc Welding* / Jin Zhang, Guoyou Shao, Jun Fan, Li Wang, Dan Zhang // *Processes*. – 2022. – No. 10. – P. 2305. DOI: 10.3390/pr10112305
14. Шутов, И.В. Формирование микроструктуры и прочностных свойств Al сплавов АМг6 и АД1 при высокотемпературной пайке припоями Zn-Cu-Al и Al-Si: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.17 / И.В. Шутов. – Ижевск, 2024. – 142 с.
15. 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
16. *Анализ смачивания и диффузионных процессов при контактом сплавлении припоев Zn-Cu-Al и Mg-Al со сплавом АМг3* / И.В. Шутов, Л.В. Камаева, Е.А. Баталова [и др.] // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2022. – № 8. – С. 80–86. – DOI 10.31857/S1028096022080167
17. Фридляндер, И.Н. *Высокопрочные сплавы системы Al – Zn – Mg – Cu* / И.Н. Фридляндер, О.Г. Сенаторова, Е.А. Ткаченко // *Энциклопедия. Машиностроение. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы*. – М.: Металлургия, – 2001. – С. 94–128.
18. ГОСТ 4784-97. *Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки (с Изменениями N 1, 2, 3, с поправками)*. – М., 1997.

19. ГОСТ 21631-76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. (с Изменениями N 1, 2, 3, с Поправками). – М., 1976.

20. Анализ структуры на границе контактного плавления АМг6 и сплавов на основе Zn / Е.А. Баталова, Л.В. Камаева, И.В. Шутов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2024. – № 5. – С. 82–90. DOI: 10.31857/S1028096024050125

21. Сумм, Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с.

22. Шаргаев, Е.О. Исследование взаимодействия цинковых припоев со сплавами алюминия при нанесении трением / Е.О. Шаргаев, И.Н. Пашков // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2020. – № 4(54). – С. 58–66. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-4-58-66

23. Бокштейн, С.З. Диффузия и структура металлов / С.З. Бокштейн. – М.: Металлургия, 1973. – 208 с.

24. Ohring, M. Material science of thin films, Deposition and Structure / M. Ohring. – Academic Press, 2002. – 794 p.

25. Murray, J.L. The Al-Zn (Aluminum-Zinc) System / J.L. Murray // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1983. – No. 4. – P. 55–73. DOI: 10.1007/BF02880321

References

1. Borisov V.A., Denisov S.V. Sposob germetizatsii defektov obolochek kosmicheskikh ob'ektov i ustroystvo dlia ego realizatsii (varianty) [Method of sealing defects of space object shells and device for its realization (variants)]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2131386 (1999).

2. Sharova I.A. Otechestvennyi i zarubezhnyi opyt v oblasti razrabotki epoksidnykh kleev kholodnogo otverzhdeniia [Domestic and foreign experience in the development of cold-curing epoxy adhesives]. I.A. Sharova. *Trudy VIAM*, 2014, no. 7, pp. 5 (1-15).

3. Sekulic D.P. Advances in Brazing: Science, Technology and Applications. Oxford: Woodhead Publishing, 2013, 587 p.

4. Jacobson D.M. Principles of brazing. D.M. Jacobson, Giles Humpston. USA: ASM International, 2005, 268 p.

5. Easton J.W. Soldering in a Reduced Gravity Environment (SoRGE). J.W. Easton, P.M. Struk. 2012, no. NASA/TM-2012-217119, 61 p.

6. Paton B.E. Space: Technologies, Materials, and Structures. B.E. Paton. London: Taylor and Francis, 2003, 558 p.

7. Gruzd S.A. Non-isothermal Wetting of an Al Alloy Pin by Al-Si Melt under Terrestrial and Microgravity Conditions. S.A. Gruzd, M.D. Krivilyov, D.S. Samsonov, Y. Wu, D.P. Sekulic, S.D. Mesarovic. *Microgravity Science and Technology*, 2022, no. 34, pp. 65 (1-13). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12217-022-09973-0>

8. Petrunin I.E. Paika metallov. I.E. Petrunin, S.N. Lotsmanov, G.A. Nikolaev. Moscow: Metallurgiya, 1973, 280 p.

9. Shuang-Shuang L. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. Shuang-Shuang Li, Xin Yue, Qing-Yuan Li, Hee-Li Peng et. al. *Journal of materials research and technology*, 2023, no. 27, pp. 944-983. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.09.274

10. Spravochnik po paika [Soldering Handbook]. Ed. I.E. Petrunina. 3nd. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 480 p.

11. Pstrus J. Wetting of Cu and Al by Sn-Zn and Zn-Al Eutectic Alloys. J. Pstrus, P. Fima, T. Gancarz. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, no. 21, pp. 606-613. DOI: 10.1007/s11665-012-0174-7

12. Mebs R.W. Solders and Soldering. R.W. Mebs, W.F. Roeser. USA: National Bureau of Standards Circular 492, 1950, 12 p.

13. Zhang J. A Review on Parallel Development of Flux Design and Thermodynamics Subject to Submerged Arc Welding. J. Zhang, G. Shao, J. Fan, L. Wang, D. Zhang. *Processes*, 2022, no. 10, p. 2305. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10112305>

14. Shutov I.V. Formirovanie mikrostruktury i prochnostnykh svoystv Al spлавov AMg6 i AD1 pri vysokotemperaturnoi paika priпойami Zn-Cu-Al i Al-S [Formation of microstructure and strength properties of Al alloys AMg6 and AD1 at high-temperature brazing with Zn-Cu-Al and Al-Si solders]. PhD. Thesis. Izhevsk, 2024, 142 p.

15. Shutov I.V. Izucheniye razrusheniia paianykh soedinenii splava AMg6 [Study of fracture of brazed joints of AMg6 alloy]. I.V. Shutov, M.D. Krivilev, M.N. Korolev. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie. Materialovedenie*, 2024, vol. 26, no. 1, pp. 42–49. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.1.05

16. Shutov I.V. Analiz smachivaniia i diffuzionnykh protsessov pri kontaktnom splavlenii priпой Zn-Cu-Al i Mg-Al so splavom AMg3 [Analysis of wetting and diffusion processes at contact alloying of Zn-Cu-Al and Mg-Al solders with AMg3 alloy]. I.V. Shutov, L.V. Kamaeva, E.A. Batalova et al. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniia*, 2022, no. 8, pp. 80-86. DOI: 10.31857/S1028096022080167

17. Fridliander I.N. Vysokoprochnye splavy sistemy Al – Zn – Mg – Cu [High-strength alloys of the Al – Zn – Mg – Cu system]. I.N. Fridliander, O.G. Senatorova, E. A. Tkachenko. *Entsiklopediia. Mashinostroenie. T. II-3. Tsvetnye metally i splavy*. Moscow: Metallurgiya, 2001, pp. 94-128.

18. GOST 4784-97. Aliumini i splavy aliuminievye deformiruemye. Marki (s Izmeneniiami N 1, 2, 3, s popravkami) [Aluminum and aluminum deformable alloys. Grades]. Moscow, 1997.

19. GOST 21631-76. Listy iz aliuminiia i aliuminievykh spлавov. (s Izmeneniiami N 1, 2, 3, s Popravkami) [Aluminum and aluminum alloy sheets]. Moscow, 1976.

20. Batalova E.A. Analiz struktury na granitse kontaktnogo plavleniia AMg6 i spлавov na osnove Zn [Structure analysis at the contact melting boundary of AMg6 and Zn-based alloys]. E.A. Batalova, L.V. Kamaeva, I.V. Shutov et al. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniia*, 2024, no. 5, pp. 82-90. DOI: 10.31857/S1028096024050125

21. Summ B.D. Fiziko-khimicheskie osnovy smachivaniia i rastekaniia [Physico-chemical basis of wetting and spreading]. B.D. Summ, Iu.V. Goriunov. Moscow: Khimiia, 1976, 232 p.

22. Shargaev E.O. Issledovanie vzaimodeistviia tsinkovykh priпой so splavami aliuminiia pri nanesenii treniem [Investigation of zinc solder interaction with aluminum alloys

during friction application]. E. O. Shargaev, I. N. Pashkov. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 4(54), pp. 58–66. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-4-58-66

23. Bokshtein S.Z. *Diffuziia i struktura metallov* [Diffusion and structure of metals]. S.Z. Bokshtein. Moscow: Metallurgiya, 1973, 208 p.

24. Ohring M. *Material science of thin films, Deposition and Structure*. M. Ohring. Academic Press, 2002, 794 p.

25. Murray J.L. The Al-Zn (Aluminum-Zinc) System. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1983, no. 4, pp. 55–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02880321>

Поступила: 19.12.2024

Одобрена: 10.01.2025

Принята к публикации: 27.01.2025

Об авторах

Салтыков Илья Романович (Ижевск, Российская Федерация) – аспирант, лаборант-исследователь лаборатории физики конденсированных сред УдГУ (Российская Федерация, 426034, г. Ижевск, ул. Университетская 1, корп. 4, e-mail: ir.saltykov@gmail.com).

Груздь Светлана Анатольевна (Ижевск, Российская Федерация) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физики конденсированных сред УдГУ (Российская Федерация, 426034, г. Ижевск, ул. Университетская 1, корп. 4, e-mail: lilyna@mail.ru).

Шутов Илья Владиславович (Ижевск, Российская Федерация) – кандидат технических наук, младший

научный сотрудник лаборатории физики конденсированных сред УдГУ, доцент, доцент кафедры общей физики УдГУ (Российская Федерация, 426034, г. Ижевск, ул. Университетская 1, корп. 4, e-mail: shutiny@gmail.com).

About the authors

Ilya R. Saltykov (Izhevsk, Russian Federation) – graduate student, laboratory assistant at the Laboratory of Condensed Matter Physics of Udmurt State University (building 4, 1, Universitetskaya Str., Izhevsk, 426034, Russian Federation, e-mail: ir.saltykov@gmail.com).

Svetlana A. Gruzd (Izhevsk, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, researcher at the Laboratory of Condensed Matter Physics of Udmurt State University (building 4, 1, Universitetskaya Str., Izhevsk, 426034, Russian Federation, e-mail: lilyna@mail.ru).

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

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №24-21-00413).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.