

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИПОЕВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ЦИНКА В ВИДЕ ЛИТЫХ ПРУТКОВ МАЛЫХ СЕЧЕНИЙ

© 2018 г. **К.В. Никитин, И.Ю. Тимошкин, В.И. Никитин**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

*Статья поступила в редакцию 06.09.17 г., доработана 11.11.17 г., подписана в печать 14.11.17 г.*

Выполнены исследования припоев систем Al–Cu–Si (марка А34) и Zn–Al–Cu (марка типа Welco52). Установлено, что припой А34 (Al–28%Cu–6%Si) плавится и кристаллизуется в узком интервале температур (~18 °С). Температуры солидуса и ликвидуса припоя А34 составляют ~508 и ~526 °С соответственно. Припой системы Zn–Al–Cu (Zn–4%Al–2,5%Cu) имеет эвтектический состав, обуславливающий плавление и кристаллизацию при постоянной температуре ~389 °С. Изучены плотности исследованных припоев в жидком и твердом состояниях. У припоя А34 их значения составляют 3,02 и 3,32 г/см<sup>3</sup> соответственно, а у цинкового припоя – 6,28 и 6,69 г/см<sup>3</sup>. Исследовано влияние условий литья на структуру литых припоев в виде прутков с площадями поперечных сечений 13, 10 и 5 мм<sup>2</sup>. С уменьшением площади поперечного сечения происходит измельчение основных структурных составляющих припойных сплавов. В микроструктуре припоя А34 измельчаются дендриты твердого раствора на основе алюминия и фаза CuAl<sub>2</sub>. В цинковом припое наиболее сильно уменьшаются размеры дендритов твердого раствора на основе цинка. Лучшей жидкотекучестью характеризуются расплавы, полученные из прутковых припоев с сечением 5 мм<sup>2</sup> при исследованных зазорах в пробе 2,0, 1,5 и 1,0 мм. Цинковый припой эвтектического состава обладает лучшими показателями жидкотекучести по сравнению с припоем А34: у расплава, полученного из припойного прутка на основе цинка сечением 5 мм<sup>2</sup> при ширине зазора в пробе 2,0 мм этот показатель составил 100 % (расплав припоя А34, полученного из прутка такого же сечения, имел 98 %). Результаты экспериментов по пайке пластин из сплава АК12 и листов из сплава АМц показали наличие плотной границы в системе «припой – материал основы», а также отсутствие несплошностей в виде пор и неспаев. Наблюдалось незначительное взаимопроникновение припойных сплавов в материал основы – особенно при пайке литых пластин из сплава АК12.

**Ключевые слова:** безсвинцовые припои, системы Al–Cu–Si и Zn–Al–Cu, литые припои, структура литых припоев, плотность, показатель жидкотекучести, пайка.

**Никитин К.В.** – докт. техн. наук, доцент, декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта Самарского государственного технического университета (СамГТУ) (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244).  
E-mail: kvn-6411@mail.ru.

**Тимошкин И.Ю.** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ.  
E-mail: ivan-mns@mail.ru.

**Никитин В.И.** – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ.  
E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Для цитирования:** Никитин К.В., Тимошкин И.Ю., Никитин В.И. Исследование структуры и свойств припоев на основе алюминия и цинка в виде литых прутков малых сечений // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2018. No. 5. С. 39–47. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-5-39-47.

*Nikitin K.V., Timoshkin I.Yu., Nikitin V.I.*

### **Study into structure and properties of solders based on aluminum and zinc in the form of small-section cast bars**

The study covers Al–Cu–Si (A34 grade) and Zn–Al–Cu (Welco52 grade) solders. It is found that A34 solder (Al–28%Cu–6%Si) melts and crystallizes in a narrow range of temperatures (~18 °C). Solidus and liquidus temperatures of A34 solder are ~508 °C and ~526 °C, respectively. Zn–Al–Cu (Zn–4%Al–2,5% Cu) solder has a eutectic composition, so it melts and crystallizes at a constant temperature of ~389 °C. Densities of investigated solders in their liquid and solid states are studied. A34 solder has a density of 3,02 and 3,32 g/cm<sup>3</sup>, respectively. Zinc solder density is 6,28 g/cm<sup>3</sup> in the liquid state, and 6,69 g/cm<sup>3</sup> in the solid state. The influence of casting conditions on the structure of cast alloys in the form of bars with cross sections of 13, 10, and 5 mm<sup>2</sup> was investigated. Main structural components of solder alloys reduce in size as cross sections decrease. The aluminium-based solid solution dendrites and CuAl<sub>2</sub> phase are reduced in the A34 solder microstructure. In zinc solders, the most severely reduced ones are zinc-based solid solution dendrites. The best castability is observed in melts obtained from 5 mm<sup>2</sup> section bar solders with studied sample gaps of 2,0, 1,5 and 1,0 mm. Eutectic zinc solder features better castability in comparison with A34: castability of the melt obtained from the 5 mm<sup>2</sup> section zinc solder rod with a sample gap width of 2,0 mm is 100 % (for A34 melt solder obtained from a rod of the same cross section it was 98 %). Experiments on

soldering AK12 alloy plates and 3003 alloy sheets demonstrated that there is a tight border in the solder/base material system and no any defects such as pores or unsoldered areas. There was a slight interpenetration of solder alloys into base materials, especially when soldering AK12 cast plates.

**Keywords:** lead-free solders, Al–Cu–Si and Zn–Al–Cu systems, cast solders, cast solder structure, density, castability, soldering.

**Nikitin K.V.** – Dr. Sci. (Tech.), associate prof., dean of the faculty of mechanical engineering, metallurgy and transport of Samara State Technical University (SSTU) (443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244).  
E-mail: kvn-6411@mail.ru.

**Timoshkin I.Yu.** – Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU.  
E-mail: ivan-mns@mail.ru.

**Nikitin V.I.** – Dr. Sci. (Tech.), prof., head of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU.  
E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Citation:** Nikitin K.V., Timoshkin I.Yu., Nikitin V.I. Issledovanie struktury i svoystv pripoev na osnove alyuminiya i tsinka v vide litykh prutkov malykh sechenii. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2018. No. 5. P. 39–47.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-5-39-47.

## Введение

Пайка широко используется при изготовлении таких изделий, как сотовые панели, радиаторы различных систем охлаждения, оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), вакуумные приборы, а также для ремонта деталей автомобильного назначения, где требуется обеспечение герметичности.

В последнее время ведутся широкие исследования по производству и применению так называемых бессвинцовых припоев в медицине, электронике, машиностроении [1–4]. Это связано с тем, что свинец при получении и утилизации припоев оказывает вредное воздействие на окружающую среду и здоровье людей, занятых в производстве. Кроме того, по своим эксплуатационным свойствам свинцовые припои не могут быть использованы при изготовлении изделий для электронной промышленности и в тех случаях, когда паяное изделие будет работать при высоких температурах.

Так как соединение элементов конструкции происходит за счет плавления материала припоя, то процессы пайки осуществляются при температурах ниже температуры ликвидуса соединяемых элементов. Согласно ГОСТ 19248-90 «Припои. Классификация, обозначения», по температуре плавления различают припои для низкотемпературной пайки (особолегкоплавкие — менее 145 °С, легкоплавкие — от 145 до 450 °С) и высокотемпературной пайки (среднеплавкие — от 450 до 1100 °С, высокоплавкие — от 1100 до 1850 °С, тугоплавкие — свыше 1850 °С).

Большинство припоев на основе олова, которые не содержат свинца, относятся к легкоплавким (199–232 °С) и не могут быть использованы

в процессах пайки, обеспечивающих работу конструкций при более высоких температурах эксплуатации.

Для пайки изделий на основе алюминия нашли широкое применение припои из сплавов на основе Al и Zn [5].

Наиболее дешевым и технологичным для изготовления алюминиевого припоя является сплав на основе алюминия, содержащий 27–29 % Cu и 5,5–6,5 % Si (припой марки А34, ТУ 1-92-46-76 «Прутки припоя марки А34. Технические условия»). Согласно тройной диаграмме состояния системы Al–Cu–Si, элементный состав данного сплава близок к эвтектическому. Сплав имеет эвтектическую температуру плавления, равную 524 °С, при следующем содержании элементов (мас.%): Al–26,82Cu–5,27Si [6, 7]. В указанной системе тройные соединения не образуются, в равновесии с алюминиевым твердым раствором находятся фазы CuAl<sub>2</sub> и Si [7, 8].

В качестве альтернативы припоям с высокой рабочей температурой пайки исследовались сплавы систем Sn–Bi, Sn–Ag и Sn–Zn [9], Zn–Al–In [10], Zn–Ag–Mg [11], Zn–Al–Si [12], не содержащие свинец. Следует заметить, что использование таких элементов, как олово, висмут, серебро и индий, приводит к существенному удорожанию стоимости припоев. Введение кремния в качестве дополнительного легирующего элемента с целью снижения температуры ликвидуса может вызвать формирование нежелательных кристаллов первичного кремния в структуре литого припоя, что отрицательно сказывается на качестве паяного шва.

Наиболее перспективными представляются припой системы Zn—Al—Cu. В тройных сплавах указанной системы, в зависимости от содержания алюминия и меди, изменяются температуры солидуса, ликвидуса а также интервалы кристаллизации. Установлено, что минимальным интервалом кристаллизации (10,4 °С) обладает сплав (мас.%) Zn—6Al—3Cu [13]. При этом авторы отмечают, что наиболее сильно изменяется температура ликвидуса сплавов (380—397 °С). Температура солидуса изменяется незначительно и составляет ~370 °С. Исследование тройного сплава эвтектического состава (мас.%) Zn—7Al—4Cu методом Бриджмена показало, что в сплаве присутствуют фазы твердых растворов на основе цинка, на основе алюминия и соединение CuZn<sub>4</sub> [14]. При малых добавках меди (0,5—1,5 мас.%) в двойной сплав эвтектического состава Zn—5,3Al температура ликвидуса меняется от 384 до 390 °С, с увеличением концентрации меди улучшается смачивание алюминиевых подложек по сравнению с подложками на основе меди, при этом делается вывод о том, что добавки меди улучшают технологические свойства припоя как в случае алюминиевых, так и медных подложек [15]. В работе [16] отмечается, что при использовании в процессе пайки газообразного азота в качестве защитной атмосферы технологические свойства припоев системы Zn—Al—Cu ухудшаются, при этом наиболее оптимальные результаты достигаются за счет применения специального защитного флюса и ведения процесса пайки при температуре 500 °С.

В процессах пайки можно выделить отдельные технологические этапы, аналогичные литейным процессам. Припой можно рассматривать как шихтовую заготовку или предварительный сплав, которые передают свою структурную информацию паяному шву в системе «твердое—жидкое—твердое». Следовательно, в технологиях получения металлических припоев для формирования благоприятной структуры и обеспечения требуемого уровня технологических свойств можно использовать основные закономерности явления структурной наследственности [17].

Анализ зарубежных литературных источников показывает, что в исследованиях в основном изучается влияние легирующих элементов на структуру и свойства припоев. При этом крайне мало уделяется внимания таким важным технологическим приемам для улучшения структурных характеристик и технологических свойств припойных

сплавов, как модифицирование, обработка расплавов внешними физическими воздействиями, условия литья и т.д.

В работах [18, 19] исследовали модифицирование сплавов системы Zn—Al—Cu с высоким содержанием алюминия (>8 мас.%) добавками Ti, Ti—V и Sr. Установлено, что модифицирование вызывает уменьшение размеров дендритов на основе твердых растворов Al и Zn, изменяет морфологию дендритов на основе  $\alpha$ -Al, повышает твердость сплавов. Наиболее существенный прирост твердости давало модифицирование стронцием [18]. Однако применение традиционных лигатур систем Al—Ti и Al—Ti—V требует перегрева рабочих расплавов до 700—750 °С, что может приводить к их интенсивному окислению. В связи с этим делается вывод о перспективности исследований влияния модификаторов системы Zn—Ti, для введения которых достаточно перегреть рабочий расплав до 500 °С [19].

В работах [20, 21] показано, что перегрев припойного расплава (мас.%) Al—27Cu—6Si и его модифицирование добавками микрокристаллического переплава того же состава способствуют измельчению тройной эвтектики (Al + CuAl<sub>2</sub> + Si), дендритов  $\alpha$ -Al и кристаллов первичного кремния.

Следует отметить, что перегрев алюминиевых расплавов, содержащих кремний, является эффективным способом модифицирования литой структуры [22].

Однако модифицирование припойных сплавов добавками Ti, Ti—V и Sr, а также перегрев расплавов могут приводить к существенному изменению температур ликвидуса и солидуса, фазового и химического составов, что может негативно сказаться на технологических и эксплуатационных свойствах припоев.

В связи с вышесказанным целью настоящей работы являлось исследование влияния условий приготовления и литья на структуру и свойства безсвинцовых литых припоев систем Al—Cu—Si и Zn—Al—Cu.

## Материалы и методика экспериментов

Эксперименты проводили в Центре литейных технологий СамГТУ. Исследовали припой на основе систем Al—Cu—Si и Zn—Al—Cu (табл. 1). Химический состав цинкового припоя соответствовал припою марки Welco52 (производство компании J.W. Harris Co. Inc., США).

Таблица 1

**Химический состав припоев, мас. %**

Марка припоя	Al	Cu	Si	Zn
A34 (ТУ 1-92-46-76)	Основа	27–29	5,5–6,5	–
Цинковый припой типа Welco52	3,75–4,0	2,15–2,50	–	Основа

**Приготовление припойного сплава А34.** Для получения припоя использовали электротехнические отходы алюминия марки А7 в виде проволоки диаметром 3 мм, лигатуры AlCu50 и AlSi20 собственного производства. Расплав готовили в печи сопротивления с емкостью тигля по алюминию 10 кг. Температуру в процессе приготовления расплава контролировали с помощью термопар (ХА), подсоединенных к многоканальному видеографическому регистрирующему преобразователю Ш9329А «Сенсорика» (НПФ «Сенсорика», г. Екатеринбург). Весь плавильный инструмент перед плавкой подогревали до 150 °С и окрашивали противопопригарной краской. В предварительно нагретый до 500 °С тигель загружали алюминий и осуществляли перегрев до 750 °С до полного расплавления. Далее, при постоянном перемешивании, вводили расчетные количества лигатур под зеркало расплава. Рафинирование проводили при  $t = 730 \pm 750$  °С гранулированным флюсом «Cristall 2000» (Италия) из расчета 0,5 мас.%, осуществляли технологическую выдержку в течение 20 мин, снимали шлак и перемешивали расплав для обеспечения однородности химического состава по объему тигля.

**Приготовление припойного сплава на основе цинка.** В качестве шихтовых материалов использовали электротехнические отходы алюминия марки А7 в виде проволоки диаметром 3 мм, цинковый сплав ЦАМ4-1 (ГОСТ 19424-97) и лигатуру AlCu50 собственного производства. В предварительно нагретый до 300 °С тигель загружали цинковый сплав и осуществляли перегрев до 550 °С до полного расплавления. Затем при постоянном перемешивании выполняли ввод расчетного количества лигатуры под зеркало расплава. При рафинировании использовали гранулированный флюс «Cristall 2000» из расчета 0,5 мас.%. Остальные параметры литья и применяемое оборудование — по вышеописанной методике.

Готовые расплавы заливали в чугунные изложницы, получая припойные сплавы в виде пластин толщиной 30 мм. Далее припойные сплавы раздельно расплавляли и заливали в кокили специ-

альной конструкции, получая прутки с площадями поперечного сечения ~13, 10 и 5 мм<sup>2</sup>.

Оценку кинетики затвердевания и плавления исходных припойных сплавов проводили по следующей методике:

1) нагрев расплава массой 0,2 кг в печи сопротивления: сплав А34 — до 600 °С, цинковый сплав — до 450 °С;

2) изотермическая выдержка в течение 15 мин для выравнивания температуры расплава по всему объему;

3) отключение печи, естественное охлаждение расплава вместе с печью: для припоя А34 — до 300 °С, для цинкового припоя — до 230 °С. В процессе охлаждения оценивали кинетику затвердевания;

4) повторный нагрев печи до температур по п. 1. В процессе нагрева оценивали кинетику плавления;

5) контроль температуры в ходе экспериментов осуществляли гибкими термопарами типа ХА (диаметр горячего спая — 1,2 мм, класс допуска — 1). Горячий спай был погружен в термический центр образца, находящегося в тигле; холодный спай подключали к многоканальному видеографическому регистрирующему преобразователю Ш9329А «Сенсорика». Показания температур в процессах нагрева и охлаждения снимали с шагом 7 с.

Плотность исходных расплавов определяли по разработанному и запатентованному экспресс-методу [23, 24], а в твердом состоянии — гидростатическим взвешиванием.

Для оценки жидкотекучести припоев была разработана проба специальной конструкции с регулируемым зазором полости формы от 1,0 до 2,0 мм. В качестве критерия жидкотекучести использовали показатель  $P_{ж}^l$  (%), вычисляемый по формуле

$$P_{ж}^l = \frac{S_0}{S_{\Phi}} \times 100, \quad (1)$$

где  $l$  — ширина зазора, мм;  $S_0$  — площадь залившегося в зазор расплава, мм<sup>2</sup>;  $S_{\Phi}$  — площадь полости формы (22,5 мм<sup>2</sup>).

Методика определения показателя жидкотекучести заключалась в следующем. Навеску припойных прутков определенного сечения расплавляли

и при перегреве на  $20 \pm 2$  °С над температурой ликвидуса заливали в предварительно нагретую до  $t = 150 \pm 5$  °С пробу с заданным зазором. После затвердевания образец извлекали из полости пробы и производили его сканирование на планшетном сканере. Площадь оцифрованного изображения образца определяли с помощью программно-аппаратного комплекса SIAMS-700.

В экспериментах по пайке в качестве соединяемых элементов использовали литые пластины толщиной 5 мм из сплава АК12 (система Al—Si) и деформированные листы толщиной 3 мм из сплава АМц (система Al—Mn—Cu, аналог — сплав марки 3003 по стандарту АА). Образцы располагали друг относительно друга встык с разделкой спаиваемых кромок под 45°. Нагрев образцов осуществляли до 150 °С портативным газовым баллоном (состав газа: пропан — 25 %, бутан — 75 %) с насадкой МТ-105 марки FoxWeid. Далее места нанесения припоя защищали железной щеткой и нагревали образцы до температуры пайки 530—550 °С (припой А34) и 380—400 °С (цинковый припой). Паяный шов формировали подачей прутков в зону нагрева.

Микроструктуру прутковых припоев и паяных соединений анализировали на оптическом микроскопе ММР-2Р (ГК «Гранат», г. Санкт-Петербург) с применением программно-аппаратного комплекса SIAMS-700 (компания «СИАМС», г. Екатеринбург).

## Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1, 2 представлены результаты по исследованию кинетики плавления и затвердевания припоя марки А34 и цинкового припоя соответственно.

Анализ полученных данных показывает, что припой А34 плавится и кристаллизуется в узком интервале температур ( $\sim 18$  °С), а цинковый припой можно отнести к сплавам эвтектического состава (табл. 2).

Таблица 2

Температуры ликвидуса и солидуса припойных сплавов

Припой	Температура, °С		Интервал плавления (кристаллизации), °С
	Солидус	Ликвидус	
А34	509 (508)	527 (526)	18 (18)
Цинковый припой типа Welco52	389	389	0

Примечание. В скобках указаны температуры в режиме затвердевания.

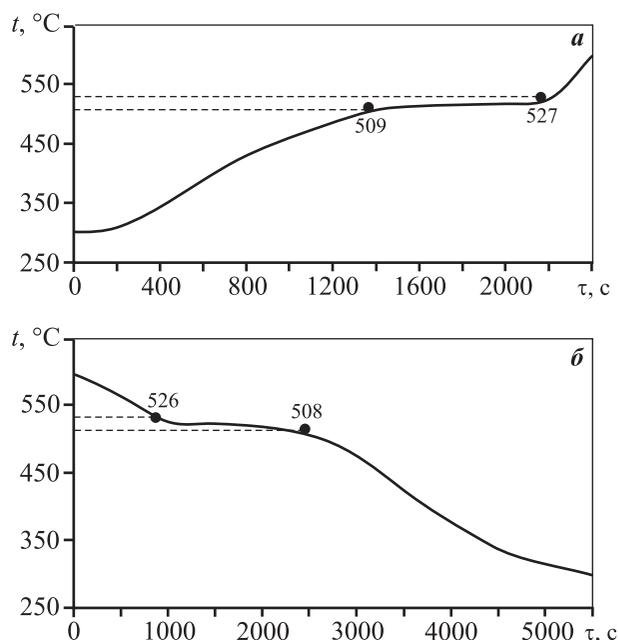


Рис. 1. Кинетика плавления (а) и затвердевания (б) припоя А34

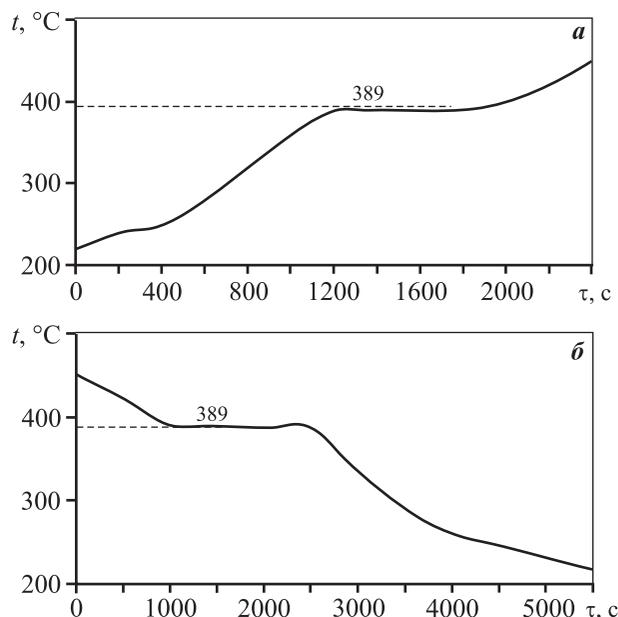
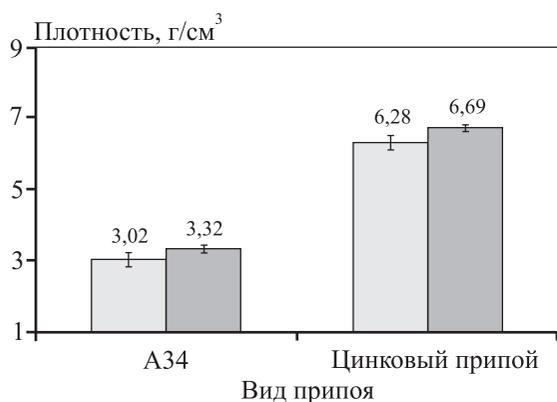


Рис. 2. Кинетика плавления (а) и затвердевания (б) цинкового припоя



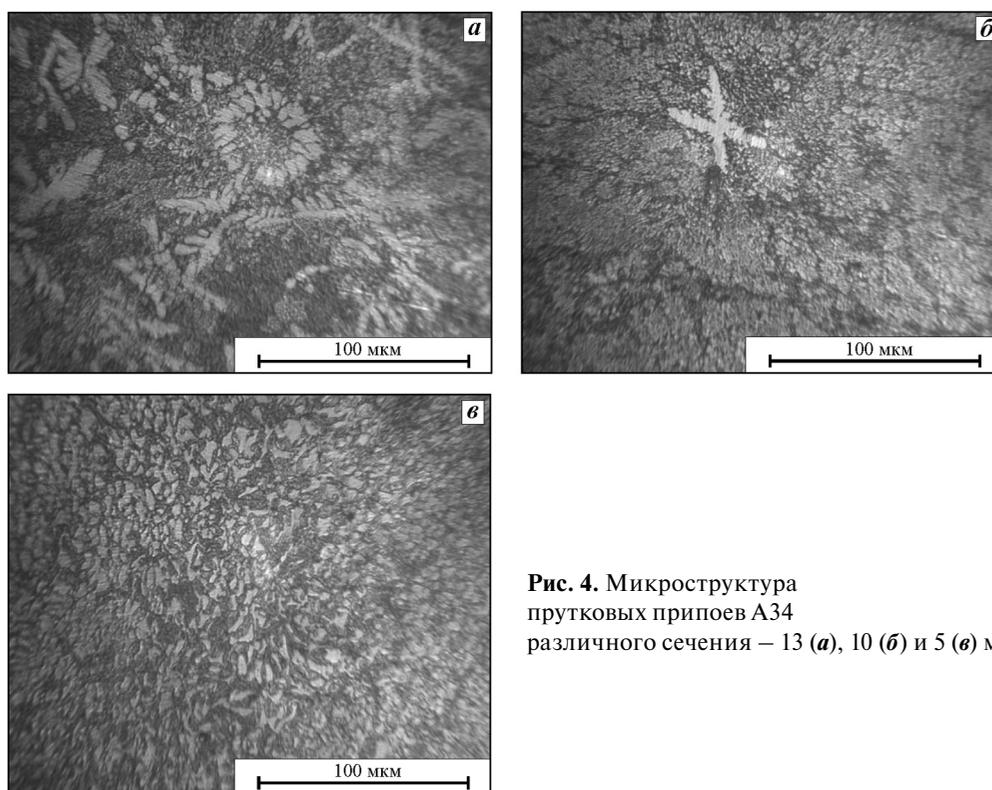
**Рис. 3.** Плотность припойных сплавов в жидком и твердом состояниях  
Слева – в жидком состоянии, справа – в твердом

На рис. 3 представлены результаты измерения плотности припойных сплавов в жидком и твердом состояниях. При затвердевании плотность припоя А34 увеличивается на  $\sim 9\div 10\%$ , а цинкового припоя — на  $\sim 6\%$ . Разница в абсолютных величинах изменения плотностей обусловлена, в первую очередь, особенностями кристаллического строения элементов основы припойных сплавов: алюминий имеет кристаллическую решетку ГЦК (координационное число — 12), а цинк — ГПУ (координационное число —  $6\times 6$ ).

На рис. 4, 5 приведены фотографии типичных участков микроструктур литых прутков в зависимости от их площади сечения. В структуре припоя А34 в виде прутка сечением  $13\text{ мм}^2$  присутствуют многочисленные крупные включения фазы  $\text{CuAl}_2$ , многофазная эвтектика ( $\text{Al} + \text{Si} + \text{CuAl}_2$ ) имеет мелкокристаллическое строение и равномерно распределена между дендритами алюминия (рис. 4, а). В структуре прутка сечением  $10\text{ мм}^2$  отмечаются единичные включения фазы  $\text{CuAl}_2$ , эвтектика имеет ячеистое строение. Наибольшее измельчение структуры получено на прутках сечением  $5\text{ мм}^2$ , фаза  $\text{CuAl}_2$  отсутствует, дендриты алюминия равномерно распределены по всему сечению шлифа.

Аналогичное измельчение структурных составляющих с уменьшением площади сечения прутков установлено и для цинкового припоя (см. рис. 5). Минимальными размерами дендритов твердого раствора на основе цинка характеризуются прутки сечением  $5\text{ мм}^2$  (рис. 5, в).

Влияние площади сечения прутков на показатель жидкотекучести показано на рис. 6. Видно, что его максимальные значения имеют расплавы, полученные из прутков сечением  $5\text{ мм}^2$  для припоев обоих составов при ширине зазора пробы 2,0, 1,5 и 1,0 мм. Цинковый припой обладает лучшей



**Рис. 4.** Микроструктура прутковых припоев А34 различного сечения — 13 (а), 10 (б) и 5 (в)  $\text{мм}^2$

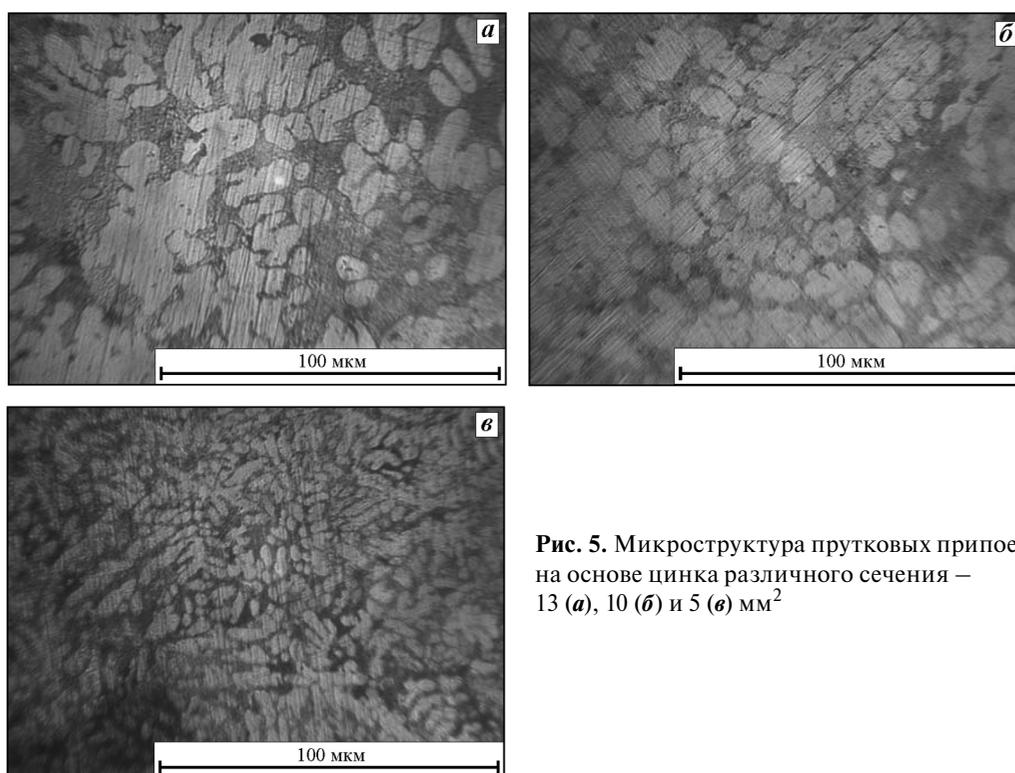


Рис. 5. Микроструктура прутковых припоев на основе цинка различного сечения — 13 (а), 10 (б) и 5 (в) мм<sup>2</sup>

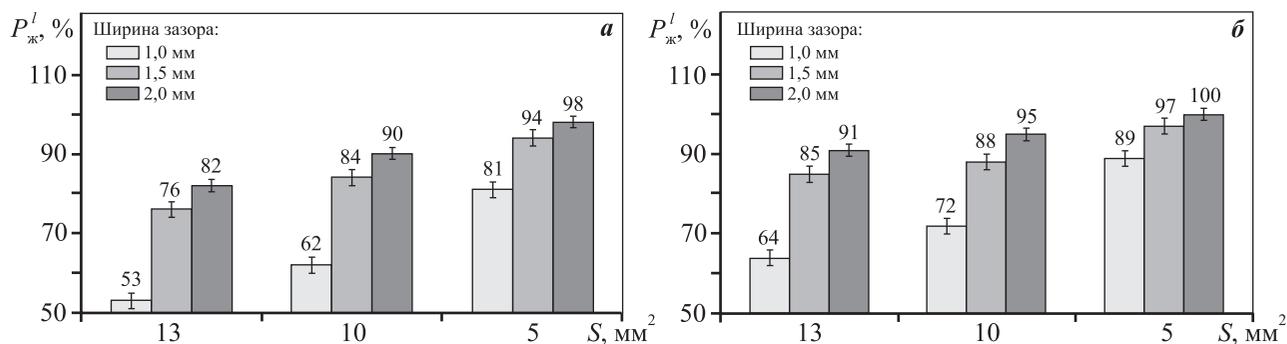


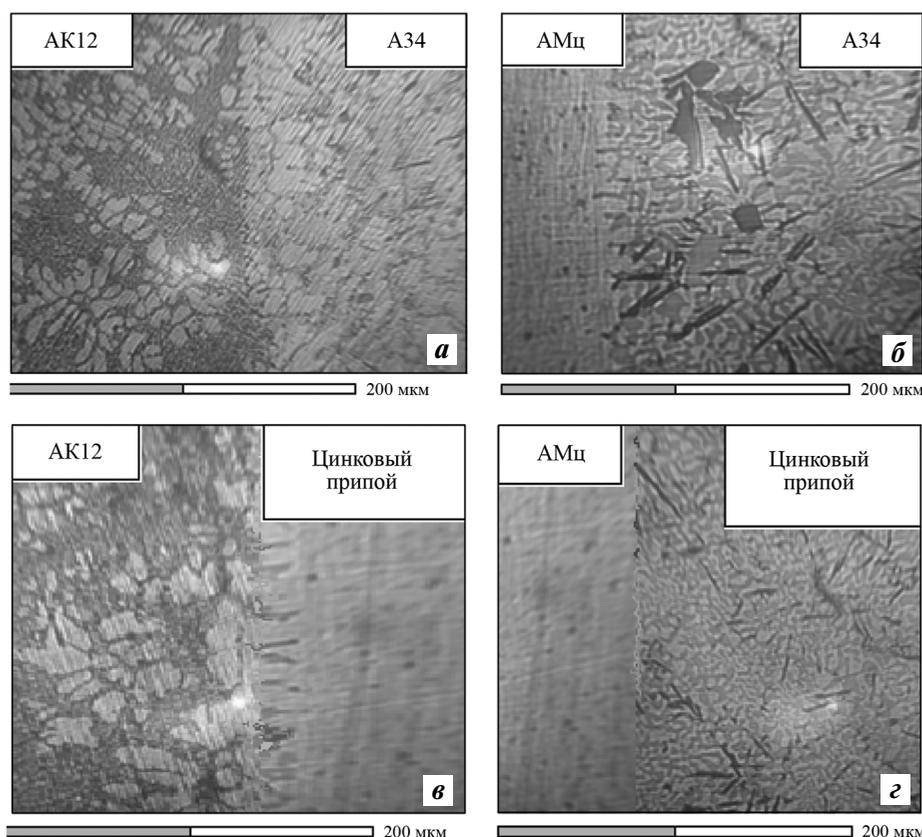
Рис. 6. Влияние площади сечения прутка ( $S$ ) на показатель жидкотекучести ( $P_{ж}^I$ )  
а — припой А34; б — припой на основе цинка

жидкотекучестью по сравнению с припоем А34 в связи с тем, что он имеет эвтектический состав и плавится (кристаллизуется) при постоянной температуре  $\sim 389$  °С.

Припойные прутки сечением 5 мм<sup>2</sup> затвердевают с повышенными скоростями охлаждения, так как теплоотвод происходит от меньших объемов кристаллизующегося сплава. Указанная особенность затвердевания обуславливает формирование в структуре таких прутков мелкокристаллической однородной структуры, которая, в свою очередь, оказывает положительное влияние на показатели жидкотекучести при их повторном расплавлении.

Эксперименты по пайке проводили с использованием прутков с площадью сечения 5 мм<sup>2</sup>. На рис. 7 приведены микроструктуры паяных швов при пайке припоями пластин и листов из сплавов АК12 и АМц.

Анализ микроструктур показал, что на границах контакта «припой — материал основы» отсутствуют несплошности в виде пор и неспаев. Это свидетельствует о том, что припой обладают хорошей смачиваемостью соединяемых материалов. Отмечено незначительное взаимопроникновение припойных сплавов в материалы основы. Наиболее сильно это наблюдается при пайке литых пластин из сплава АК12. Указанные особен-



**Рис. 7.** Микроструктура паяных соединений

*а, б* – припой А34; *в, г* – цинковый припой; *а, в* – соединение пластин из сплава АК12; *б, г* – соединение листов из сплава АМц

ности могут быть объяснены диффузионными процессами при контакте жидкой фазы (припойный сплав) с твердым материалом (основа). Взаимопроникновение сплавов по границам контакта может свидетельствовать о прочности паяного соединения.

## Заключение

Изучены припои систем Al—Cu—Si (марка А34) и Zn—Al—Cu (марка типа Welco52). Установлено, что припой А34 плавится и кристаллизуется в узком интервале температур (~18 °С). Его температуры солидуса и ликвидуса составляют ~508 и ~526 °С соответственно. Припой системы Zn—Al—Cu имеет эвтектический состав, а следовательно, его плавление и кристаллизация происходят при постоянной температуре ~389 °С.

Определены плотности исследованных припоев в жидком и твердом состояниях. Так, для припоя А34 они составили 3,02 и 3,32 г/см<sup>3</sup> соответственно. Для цинкового припоя плотность в жидком состоянии — 6,28 г/см<sup>3</sup>, в твердом — 6,69 г/см<sup>3</sup>.

Исследовано влияние условий литья на структуру литых припоев в виде прутков с площадями поперечных сечений 13, 10 и 5 мм<sup>2</sup>. Установлено, что с уменьшением площади поперечного сечения происходит измельчение основных структурных составляющих припойных сплавов. В микроструктуре припоя А34 измельчаются дендриты твердого раствора на основе алюминия и фаза CuAl<sub>2</sub>. В цинковом припое наиболее сильно уменьшаются размеры дендритов твердого раствора на основе цинка.

Лучшие показатели жидкотекучести получены у расплавов из прутковых припоев с сечением 5 мм<sup>2</sup> при зазорах в пробе 2,0, 1,5 и 1,0 мм. При этом у цинкового припоя эвтектического состава жидкотекучесть лучше, чем у припоя А34. Так, показатель жидкотекучести расплава, полученного из припойного прутка на основе цинка сечением 5 мм<sup>2</sup> при ширине зазора в пробе 2,0 мм составил 100 % (для расплава припоя А34, полученного из прутка такого же сечения — 98 %).

Эксперименты по пайке литых пластин из сплава АК12 и деформированных листов из сплава АМц

показали, что имеется плотная граница в системе «припой—материал основы», отсутствуют несплошности в виде пор и неспаев. Отмечено незначительное взаимопроникновение припойных сплавов в материалы основы. Наиболее сильно это наблюдается при пайке литых пластин из сплава АК12.

На основании полученных результатов сделан вывод о необходимости продолжения исследований по влиянию структуры безсвинцовых припоев на прочность паяных соединений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке из средств Министерства образования и науки РФ, выделяемых на программу развития СамГТУ в качестве опорного вуза.*

## Литература/References

1. Živković D.T., Kostov A.I., Janković I.P., Stojanović M.L. Application of high temperature lead-free solder materials in medicine. *Metall. Mater. Eng.* 2008. Vol. 14. No. 4. P. 271—277.
2. Zeng G., McDonald S., Nogita K. Development of high-temperature solders: Review. *Microelectron. Reliability.* 2012. No. 52. P. 1306—1322.
3. Hlavaty I. Solderability of high-purity aluminium with the lead-free solders. *Annals of DAAAM for 2011 & Proc. 22nd Intern. DAAAM Symp.* 2011. Vol. 22. No. 1. P. 817—818.
4. Kroupa A., Dinsdale A., Watson A., Vřešťal J.J., Zemanova A., Broz P. The thermodynamic database cost MP0602 for materials for high-temperature lead-free soldering. *J. Min. Metall., Sect. B.* 2012. Vol. 48. No. 3. P. 339—346.
5. Петрунин И.Е. Справочник по пайке. М.: Машиностроение, 2003; *Petrunin I.E. Spravochnik po pайке [Reference book on soldering].* Moscow: Mashinostroenie, 2003.
6. Ponweiser N., Richter K.W. New investigation of phase equilibria in the system Al—Cu—Si. *J. Alloys Compd.* 2012. Vol. 512. Iss. 1. P. 252—263.
7. Altıntaş Y., Aksöz S., Keşlioğlu K., Maras N. Determination of thermodynamic properties of aluminum based binary and ternary alloys. *J. Alloys Compd.* 2015. Vol. 649. P. 453—460.
8. He C.-Y., Dua Y., Chena H.-L., Xu H. Experimental investigation and thermodynamic modeling of the Al—Cu—Si system. *CALPHAD: Comput. Coupling Phase Diagrams Thermochem.* 2009. Vol. 33. P. 200—210.
9. Osório W.R., Peixoto L.C., Garcia L.R., Mangelinck-Noël N., Garcia A. Microstructure and mechanical properties of Sn—Bi, Sn—Ag and Sn—Zn lead-free solder alloys. *J. Alloys Compd.* 2013. Vol. 572. P. 97—106.
10. Gancarz T., Pstruś J., Fima P., Mosińska S. Thermal properties and wetting behavior of high temperature Zn—Al—In solders. *J. Mater. Eng. Perform.* 2012. Vol. 21. No. 5. P. 599—605.
11. Islam Md.A., Sharif A. Effect of magnesium addition on microstructure and mechanical properties of lead-free zinc-silver solder alloys. *Mater. Sci.: Ind. J.* 2016. No. 14. P. 1—8.
12. Berent K., Pstruś J., Gancarz T. Thermal and microstructure characterization of Zn—Al—Si alloys and chemical reaction with Cu substrate during spreading. *J. Mater. Eng. Perform.* 2016. Vol. 25. No. 8. P. 3375—3383.
13. Kim S.-J., Kim K.-S., Kim S.-S., Kang Ch.-Y., Saganuma K. Characteristics of Zn—Al—Cu alloys for high temperature solder application. *Mater. Trans.* 2008. Vol. 49. No. 7. P. 1531—1536.
14. Böyük U., Engin S., Maraşlı N. Directional solidification of Zn—Al—Cu eutectic alloy by the vertical Bridgman method. *J. Min. Metall., Sect. B.* 2015. Vol. 51. No. 1. P. 67—72.
15. Gancarz T., Pstruś J., Mosińska S., Pawlak S. Effect of Cu addition to Zn—12Al alloy on thermal properties and wettability on Cu and Al substrates. *Metall. Mater. Trans. A.* 2016. Vol. 47A. P. 368—377.
16. Pstruś J., Fima P., Gancarz T. Wetting of Cu and Al by Sn—Zn and Zn—Al eutectic alloys. *J. Mater. Eng. Perform.* 2012. Vol. 21. No. 5. P. 606—613.
17. Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах. М.: Машиностроение-1, 2005; *Nikitin V.I., Nikitin K.V. Nasledstvennost' v litykh splavakh [Hereditity in cast alloys].* Moscow: Mashinostroenie-1, 2005.
18. Krupińska B., Krupiński M., Rdzawski Z., Labisz K., Król M. Characteristic of cast Zn—Al—Cu Alloy microstructure after modification. *Arch. Foundry Eng.* 2014. Vol. 14. Iss. 4. P. 77—82.
19. Krajewski W.K. Structure and properties of high-aluminium zinc alloys inoculated with Ti addition. *Arch. Foundry Eng.* 2005. Vol. 15. No. 5. P. 231—240.
20. Konstantinov A.N., Chikova O.A., Nikitin K.V. Method for obtaining ingots of the A34 solder based on an investigation into the relation between the structure and properties of liquid and solid metals. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2013. Vol. 54. No. 6. P. 484—488.
21. Nikitin K.V., Chikova O.A., Timoshkin I.Yu., Konstantinov A.N. Effect of heating temperature and modification of Al—27%Cu—6%Si melt on the structure and phase composition of crystallized specimens. *Met. Sci. Heat Treat.* 2013. Vol. 55. No. 3—4. P. 30—35.
22. Selyanin I.F., Deev V.B., Belov N.A., Prikhodko O.G., Ponomareva K.V. Physical modifying effects and their influence on the crystallization of casting alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. Iss. 4. P. 434—436.
23. Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu., Krivopalov D.S., Chernikov D.G. Hereditary influence of the structure of charge materials on the density of aluminum alloys of the Al—Si system. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 1. P. 20—25.
24. Никитин К.В., Тимошкин И.Ю., Никитин В.И. Устройство для отбора алюминиевого расплава: Пат. 131379 (РФ). 2013; *Nikitin K. V., Timoshkin I.Yu., Nikitin V.I. Ustroistvo dlya otbora alyuminievogo rasplava [A device for sampling of molten aluminum]:* Pat. 131379 (RF). 2013.