

**В. П. Красовский, Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Б. Д. Костюк,  
Т. В. Стецюк, Н. А. Красовская\***

## **СМАЧИВАНИЕ СПЛАВА АМц МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ РАСПЛАВАМИ**

Методом лежащей капли изучено смачивание алюминиевого сплава АМц низкотемпературными расплавами на основе In, Sn, Pb в вакууме  $2 \cdot 10^{-3}$  Па в температурном интервале до 650 °С. Для улучшения смачивания алюминиевого сплава в сплавы вводили медь и серебро, которые, диффундируя в алюминий, образовывали эвтектические сплавы с алюминием. Для разработки технологического процесса соединения сплава АМц с кварцем использовали металлические покрытия, которые упрощали технологический процесс.

*Ключевые слова:* смачивание, расплавы свинца, алюминиевый сплав АМц, металлические покрытия, пайка.

### **Введение**

Получение низкотемпературных припоев и разработка технологических процессов соединения, адгезионно-активной пайки исследованы в ряде работ [1—7]. Для соединения металлических деталей и керамики в узлах различных приборов широко применяются покрытия, которые наносятся на керамику различными способами в виде пасты [1, 6, 7] либо пленки активных металлов электронно-лучевым способом испарения металлов в вакууме [8, 9]. Такие покрытия обеспечивают растекание припойного расплава при более низких температурах, облегчают технологический процесс, а также служат мостом между кварцевым стеклом и металлической деталью, выступают промежуточным слоем для соединения [6].

Для соединения (пайки) кварцевого стекла с металлическими деталями последние чаще всего изготавливают из железоникелевых сплавов. Это обусловлено тем, что металл и кварц имеют близкие коэффициенты термического расширения, а также обладают достаточно хорошим смачиванием металлических деталей различными расплавами, в том числе легкоплавкими. В настоящей работе для удешевления изготавливаемых паяных изделий в качестве металлического корпуса предложено использовать алюминий либо его сплавы.

Легкоплавкие припои (сплавы на основе олова, кадмия, свинца и цинка) не смачивают алюминий из-за наличия прочной и плотной оксидной пленки на его поверхности. При термической активации

---

\* В. П. Красовский — доктор химических наук, заведующий отделом Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев; Ю. В. Найдич — академик НАН Украины, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, там же; И. И. Габ — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, там же; Б. Д. Костюк — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, там же; Т. В. Стецюк — научный сотрудник, там же; Н. А. Красовская — научный сотрудник, там же.

процессов химического взаимодействия и массопереноса в системе припой—алюминий в интервале температур 200—450 °С для разрушения оксида  $Al_2O_3$  часто используют реактивные низкотемпературные флюсы. Восстановленные алюминием из флюсов металлы активируют поверхность паяемого материала и легируют припой, а химические соединения, диссоциирующие при температуре пайки, могут создавать газовую среду, способную восстанавливать оксид и защищать паяный шов от окисления [10—12]. Необходимыми компонентами неорганических реактивных флюсов являются солевые смеси хлоридов аммония, олова, цинка [13], бромида висмута [14] с активными добавками фторидов калия и алюминия [15]. Слой осажденного металла служит покрытием и способствует повышению прочностных и коррозионных свойств паяных соединений. Однако пайка алюминия с применением галогенидных флюсов приводит к загрязнению атмосферы токсичными  $AlCl_3$  и  $AlBr_3$  и их коррозионно-активными остатками, которые необходимо тщательно удалять [16].

Для проведения низкотемпературной пайки и разрушения оксидной алюминиевой пленки можно наносить на поверхность паяемых деталей из сплавов алюминия или добавлять в припой компоненты, которые образуют с алюминием низкотемпературные эвтектики, например медь или серебро. Благодаря диффузии этих металлов через оксидную пленку при нагреве происходит растворение припоев и смачивание поверхности алюминиевого сплава.

Цель настоящих исследований — изучить смачивание сплавов алюминия АМц низкотемпературными металлическими расплавами с добавками активных к алюминию металлов для разработки припоев, режимов и технологических процессов пайки.

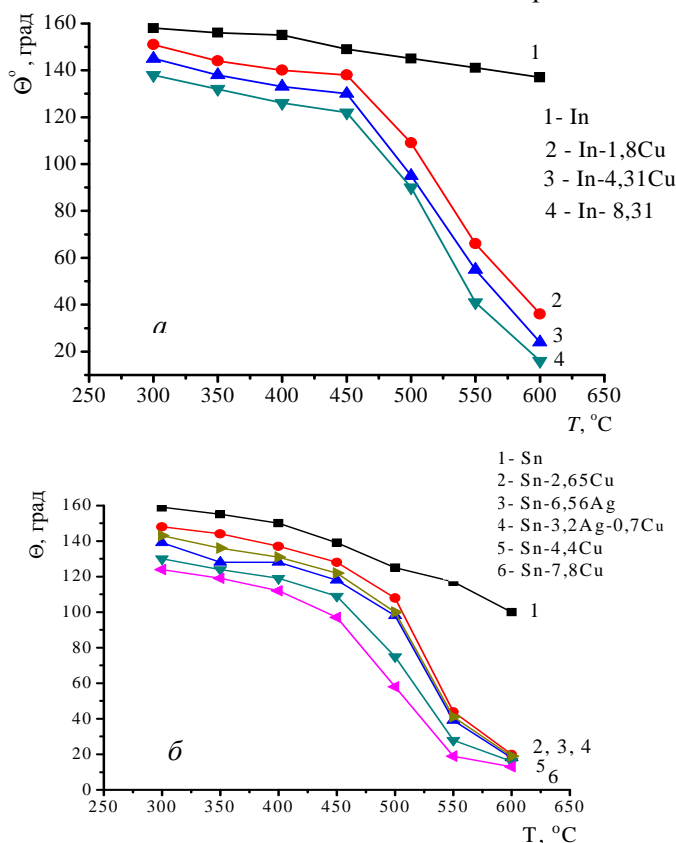
#### *Методы исследования смачивания и материалы*

Исследование смачивания проводили методом лежащей капли в вакууме  $2 \cdot 10^{-3}$  Па в температурном интервале 400—600 °С. В качестве твердой фазы выбраны подложки алюминиевого сплава АМц (состава (% (мас.)): 97,8Al — 1,3Mn — 0,6Fe — 0,3Si, которые предварительно полировали до шероховатости поверхности 0,01 мкм. Перед исследованиями подложки очищали с помощью ацетона и спирта. В качестве жидкой фазы использовали In марки 000, Sn марки ОВЧ-000, Pb марки ОВЧ, медь марки ВЗ (чистотой 99,995%), серебро (чистота 99,999%), электролитический никель, иодидный титан. Серебро, олово и индий предварительно плавил при температуре 1000 °С, свинец — при 650 °С, а медь — при 1100 °С в графитовых тиглях в вакууме  $2 \cdot 10^{-3}$  Па. Контроль массы сплавов при изучении смачивания проводили взвешиванием до и после эксперимента.

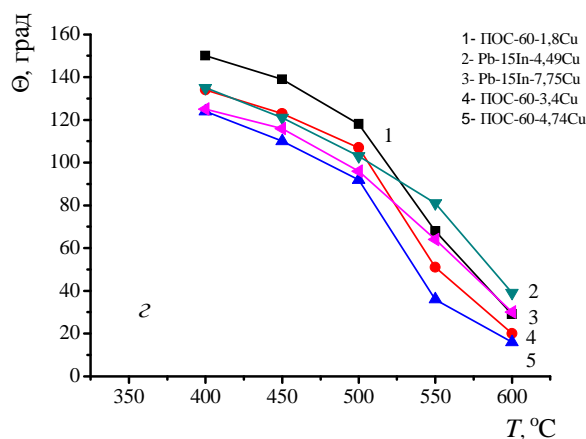
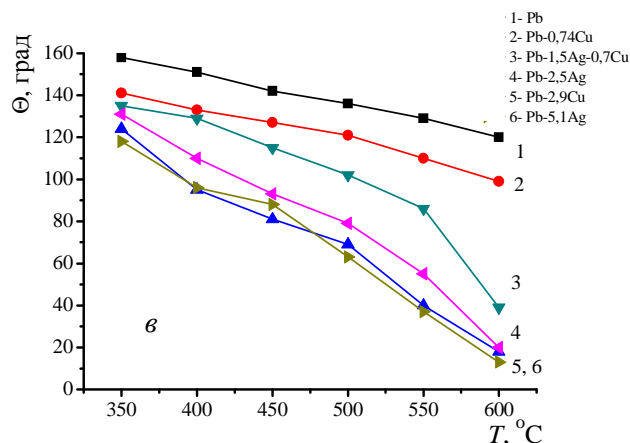
Покрытия из меди, никеля и титана наносили на подложки сплава АМц методом электронно-лучевого испарения разогретого металла в вакууме по методике [17].

### *Смачивание металлическими расплавами алюминиевого сплава АМц и обсуждение результатов исследования*

Определены температурные и кинетические зависимости краевого угла смачивания алюминиевого сплава АМц низкотемпературными металлическими расплавами индия, олова, свинца и их сплавами с медью и серебром. Результаты приведены на рисунке. Температурные зависимости показывают, что чистые металлы не смачивают подложки в интервале температур 300—600 °С. Углы смачивания в изучаемом интервале температур превышают 90°. Это, по-видимому, вызвано наличием пленки оксида алюминия на поверхности алюминиевого сплава. Растекание происходит в течение 5—10 мин и дальнейшая выдержка не приводит к изменению величины угла смачивания. Для улучшения смачивания в расплавы добавляли Cu и Ag, которые образуют с алюминием эвтектические сплавы [18]. Смачивание резко улучшается при температурах 450—600 °С, что можно объяснить происходящей диффузией Cu, Ag в алюминиевый сплав и образованием эвтектики. Изучено смачивание сплава АМц расплавами низкотемпературных металлов с добавками никеля (Sn—2% (мас.) Ni; In—3% (мас.) Ni). При 600 °С происходит смачивание, краевые углы составляют 8—10°. Однако на контактной границе возможно образование интерметаллидов  $Ni_xAl_y$  [18], наличие которых подтверждено в работах [19, 20]. Интерметаллиды затрудняют использование этих сплавов в качестве припоев.



Рисунок, а, б



Температурные зависимости смачивания сплава АМц расплавами In (а), Sn (б), Pb (в), ПОС (Pb—40% (мас.) Sn) и Pb—15% (мас.) In (з)

Temperature wetting dependences of AMc alloy by In (a), Sn (b), Pb (v) ПОС (Pb—40% (mass) Sn) and Pb—15% (mass) In (z) melts

Для разработки технологического процесса соединения сплава АМц с кварцевым стеклом может быть эффективна технология с металлизацией поверхности обоих материалов. Было изучено влияние металлизационных покрытий меди и никеля, нанесенных на сплав АМц, на смачивание низкотемпературными расплавами на основе свинца (таблица).

Из таблицы следует, что металлические пленки меди и никеля улучшают смачивание свинцовыми сплавами алюминиевого сплава АМц, при этом снижается температура начала процесса смачивания по сравнению со сплавами, в которые медь и никель вводили в качестве добавок. Таким образом, низкотемпературные припои на основе свинца с добавками меди либо медное покрытие, нанесенное на паяемые детали, могут быть использованы для пайки алюминиевого сплава АМц с кварцевым стеклом.

**Результаты смачивания металлических покрытий, нанесенных на сплав АМц, припоями на основе свинца**

**Wetting results of metal coverings on АМц alloy by lead base soldering**

| Сплав,<br>% (мас.) | Пленка,<br>$\delta$ , мкм | $T$ , °С | Время,<br>мин | Краевой угол смачивания $\theta$ , град |
|--------------------|---------------------------|----------|---------------|---|
| Pb                 | Cu<br>$\delta = 2,870$    | 350      | 20            | 40                                      |
|                    |                           | 400      | 20            | 35                                      |
|                    |                           | 450      | 20            | 32                                      |
|                    |                           | 500      | 10            | 26                                      |
| Pb—15In            | Cu<br>$\delta = 2,870$    | 400      | 20            | 33                                      |
|                    |                           | 450      | 20            | 28                                      |
|                    |                           | 500      | 10            | 23                                      |
| Pb—2,5Ag           | Cu<br>$\delta = 2,870$    | 400      | 20            | 32                                      |
|                    |                           | 450      | 20            | 22                                      |
|                    |                           | 500      | 20            | 7                                       |
| Pb                 | Ni<br>$\delta = 1,10$     | 400      | 20            | 120                                     |
|                    |                           | 450      | 40            | 94                                      |
|                    |                           | 500      | 40            | 68                                      |
| Pb—15In            | Ni<br>$\delta = 1,10$     | 400      | 40            | 75                                      |
|                    |                           | 450      | 40            | 32                                      |
|                    |                           | 500      | 10            | 9                                       |
| Pb—2,5Ag           | Ni<br>$\delta = 1,10$     | 400      | 40            | 119                                     |
|                    |                           | 450      | 40            | 96                                      |
|                    |                           | 500      | 20            | 75                                      |

**Выводы**

Проведенные исследования по смачиванию промышленного алюминиевого сплава АМц низкотемпературными расплавами на основе индия, олова, свинца и их сплавами с медью и серебром показали, что эти сплавы могут быть использованы в качестве припоев для пайки сплава АМц с кварцем. Особенно следует обратить внимание на возможность применения этих металлов (Cu, Ag), а также никеля в качестве металлизационного покрытия, наносимого на паяемые материалы, что снижает температуру процесса соединения-пайки.

**РЕЗЮМЕ.** Методом лежачої краплі вивчено змочування алюмінієвого сплаву АМц низкотемпературними розплавами на основі In, Sn, Pb в вакуумі  $2 \cdot 10^{-3}$  Па в температурному інтервалі до 650 °С. Для покращення змочування алюмінієвого сплаву в сплави додавали мідь та срібло, котрі, дифундуючи в алюміній, утворювали евтектичні сплави з алюмінієм. Для розробки технологічного процесу з'єднання сплаву АМц з кварцовим склом використовували металеві покриття, котрі покращують технологічний процес.

**Ключові слова:** змочування, розплави свинцю, алюмінієвий сплав АМц, металеві покриття, паяння.

1. *Найдич Ю. В.* Разработка методов получения и исследование свойств паяных металлокварцевых иллюминаторов для криогенной техники / [Ю. В. Найдич, В. А. Кондрацкий, В. С. Журавлев и др.] // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 1976. — Вып. 1. — С. 74—78.
2. *Сычев В. С.* Стойкость к коррозии в морской воде металлокварцевых узлов, паянных низкотемпературными припоями / [В. С. Сычев, В. С. Журавлев, Р. М. Касьян и др.] // Там же. — 1983. — Вып. 11. — С. 66—69.
3. *Журавлев В. С.* Смачиваемость оксидных материалов низкотемпературными расплавами, содержащими присадки межфазно-активных элементов / [В. С. Журавлев, И. Н. Шклярская, В. А. Кондрацкий, Ю. В. Найдич] // Сварочное производство. — 1972. — № 2. — С. 6—8.
4. *Найдич Ю. В.* Пайка неметаллических тугоплавких материалов. Достижения и перспективы // Современное материаловедение. XXI век. — К. : Наук. думка, 1998. — С. 529—562.
5. *Журавлев В. С.* Влияние серебра в титановом покрытии на смачиваемость окисных материалов свинцом / [В. С. Журавлев, Н. Ф. Ищук, В. В. Бекетов] // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 1981. — Вып. 7. — С. 98—100.
6. *Рубашов А. М.* Термостойкие диэлектрики и их спаи с металлами в новой технике / [А. М. Рубашов, Г. И. Бердов, Н. В. Гаврилов и др.]. — М. : Атомиздат, 1980. — 246 с.
7. *Керамика и ее спаи с металлами в технике.* — М. : Атомиздат, 1969. — 230 с.
8. *Найдич Ю. В.* Кінетика диспергування при відпаді у вакуумі цирконієвих наноплівочок, нанесених на неметалеві матеріали / [Ю. В. Найдич, І. І. Габ, Т. В. Стецюк и др.]. // Металлофізика и новейшие технологии. — 2017. — **39**, № 7. — С. 881—892.
9. *Naidich Yu. V.* Kinetics of fragmentation during annealing in vacuum of titanium nanofilms deposited onto non-metallic materials / [Yu. V. Naidich, I. I. Gab, T. V. Stetsyuk et al.] // Phys. Chem. Solid State. — 2017. — **18**, No. 2. — P. 158—165.
10. *Никитинский А. М.* Пайка алюминия и его сплавов. — М. : Машиностроение, 1983. — 192 с.
11. *Лашко Н. Ф.* Пайка металлов / Н. Ф. Лашко, С. В. Лашко. — М. : Машиностроение, 1967. — 367 с.
12. *Максимихин Б. А.* Пайка металлов в приборостроении / Под ред. П. И. Петрова. — Л. : ЦБТИ, 1959. — 116 с.
13. *Пат. 4802932 США, МКП<sup>4</sup> В 23 К 35/34.* Fluoride-free flux compositions for hot galvanization in aluminum-modified zinc bath / Jeannine Billiet (Бельгия); Dionne & Cantor (США). — Опубл. 07.02.89.
14. *Пат. 3074158 США, МКП<sup>2</sup> В 23 К 35/34.* Flux composition and method of using same to solder aluminum / Walter D. Finnagan (США); Kaiser Aluminum & Chemical Co. (США). — Опубл. 22.01.63.
15. *Хрятин В. Е.* Справочник паяльщика. — М. : Машиностроение, 1981. — 348 с.

16. *Сабадаш О. М.* Пайка алюминия припоями на основе олова с использованием реактивных флюсов // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2007. — Вып. 40. — С. 82—90.
17. *Найдич Ю. В.* Смачиваемость в системе металлический расплав — тонкая металлическая пленка — неметаллическая подложка / [Ю. В. Найдич, Б. Д. Костюк, Г. А. Колесниченко, С. С. Шайкевич] // Физическая химия конденсированных фаз, сверхтвердых материалов и их границ раздела. — К. : Наук. думка, 1976. — С. 15—27.
18. *Хансен М.* Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. В 2<sup>х</sup> т. — М. : Metallurgia, 1962. — 1488 с.
19. *Naidich Yu. V.* Use of interfacial exothermic effect in the wetting process, production of composites, and soldering of ceramic materials / Yu. V. Naidich, V. P. Krasovskii // Powder metallurgy and metal ceramics, Publisher : Springer New York. — 2015. — **54**, No. 5—6. — P. 331—339.
20. *Красовский В. П.* Смачивание базальтового материала расплавом алюминия / В. П. Красовский, Б. Д. Костюк, Ю. Н. Чувашов // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 1997. — Вып. 33. — С. 31—34.

Поступила 05.08.18

**Krasovskyy V. P., Naidich Yu.V., Gab I. I., Kostyuk B. D.,  
Stetsyuk T. V., Krasovskaya N. A.,**

#### **Wetting of AM<sub>u</sub> alloy by metal melts**

The wetting of aluminium alloy (AM<sub>u</sub>) by fusible alloys on base In, Sn, Pb by sessile drop method in vacuum  $2 \cdot 10^{-3}$  Pa at temperature up to 600 °C were investigated. Copper and silver for improvement of wetting of AM<sub>u</sub> substances in alloys were added. These metals, which diffuse in aluminium, eutectic alloys with Al forms. The metal coverings for elaboration of technology soldering process of AM<sub>u</sub> to quarts were used.

**Keywords:** *wetting, lead melts, aluminium alloy (AM<sub>u</sub>), metal covering, soldering.*