



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-13-18>
УДК 621.074

Поступила 17.07.2025
Received 17.07.2025

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИПОЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ AL–CU–SI НА ОСНОВЕ РЕЦИКЛИРУЕМЫХ ОТХОДОВ

К. В. НИКИТИН, И. Ю. ТИМОШКИН, Р. М. БИКТИМИРОВ, Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия, Молодогвардейская, 244. E-mail: kvn-6411@mail.ru

Представлены основные этапы исследований по разработке технологии получения литого припоя марки А34 в виде прутков. Показано, что с учетом основных закономерностей структурной наследственности для приготовления рабочего сплава можно эффективно использовать до 100% предварительно подготовленных различных ломов и отходов. Результаты кинетики плавления и затвердевания, анализ химического состава и микроструктуры, механических испытаний и плотности показали, что припой марки А34, полученный по разработанной технологической схеме, полностью соответствует требованиям нормативной документации. Установлена возможность применения припоя марки А34 в качестве присадочного материала при сварке пластин (толщиной 2 мм) из алюминиевых сплавов АК7ч (литейный) и АМг5 (деформируемый). В качестве газовой защитной среды использовали аргон. Разработана технологическая инструкция по приготовлению припойного сплава марки А34. Организовано производство литого припоя марки А34 в виде прутков.

Ключевые слова. Пайка, сварка, припой, сплав, явление структурной наследственности.

Для цитирования. Никитин, К. В. Разработка технологии изготовления припойного сплава системы Al–Cu–Si на основе рециклируемых отходов / К. В. Никитин, И. Ю. Тимошкин, Р. М. Биктимиров // Литье и металлургия. 2025. № 3. С. 13–18. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-13-18>.

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR PRODUCING AN AL–CU–SI SOLDER ALLOY BASED ON RECYCLED WASTE

K. V. NIKITIN, I. Yu. TIMOSHKIN, R. M. BIKTIMIROV, Samara Polytechnic, Samara, Russia, 244, Molodogvardeyskaya str. E-mail: kvn-6411@mail.ru

The main stages of research on the development of technology for obtaining cast A34-grade solder in the form of rods are presented. It is shown that, taking into account the basic patterns of structural heredity, up to 100% of pre-prepared various scraps and waste can be effectively used to prepare the working alloy. The results of melting and solidification kinetics, chemical composition and microstructure analysis, mechanical testing, and density analysis showed that the A34-grade solder obtained using the developed technological scheme fully meets the requirements of regulatory documentation. The possibility of using A34 solder as a filler material for welding plates (2 mm thick) made of aluminum alloys AK7ch (casting) and AMg5 (deformable) has been established. Argon was used as the gas shielding medium. A technological instruction for preparing A34 solder alloy has been developed. The production of A34 cast solder in the form of rods has been organized.

Keywords. Soldering, welding, solder, alloy, structural heredity phenomenon.

For citation. Nikitin K. V., Timoshkin I. Yu., Biktimirov R. M. Development of a technology for producing an Al–Cu–Si solder alloy based on recycled waste. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 3, pp. 13–18. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-13-18>.

Пайкой называют образование соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, смачивания припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации [1]. При пайке соединение элементов основного материала происходит за счет расплавления и кристаллизации припоя, температура плавления которого ниже, чем температура плавления основного материала. Несмотря на то что пайка, как и сварка, является неразъемным соединением, во многих случаях (например, когда необходимо заменить вышедший из строя элемент, деталь или узел паяного соединения) можно произвести распайку соединения, устранение дефектов и осуществить повторную пайку.

По температуре плавления различают припои для низкотемпературной пайки (особо легкоплавкие – 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) [2].

Пайка широко применяется при изготовлении различных изделий из алюминиевых сплавов (сотовых панелей, радиаторов различных систем охлаждения, оболочек ТВЭЛ реакторов, вакуумных приборов), а также для ремонта деталей автомобильного назначения, где требуется обеспечение герметичности.

Согласно [3], соединение заготовок из алюминиевых сплавов пайкой можно осуществлять низко- и высокотемпературными припоями. К наиболее перспективным припоям для высокотемпературной пайки относят припой системы Al–Cu–Si марки А34 (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика припоя марки А34 [3]

Химический состав, % (Al – ост.)			Механические свойства		Температура, °С	
Cu	Si	Σ примесей, не более	σ_B , МПа	δ , %	T_L/T_S	Пайки
27,0–29,0	5,5–6,5	0,8	180–240	1,0	525/525	530–550

В [4, 5] исследовали влияние условий приготовления на структуру и свойства припоя А34. Показано, что высокотемпературная обработка расплава обеспечивает получение модифицированной структуры литого припоя, уменьшение размеров кристаллов Si_п [4]. Получение литого припоя с повышенными скоростями охлаждения также способствует обеспечению мелкокристаллического строения и улучшению технологических свойств припоя [5].

В настоящее время в России отсутствуют централизованные производства литого припоя А34 в виде прутков. По требованиям заказчика (ЗАО ПФ «Плавка и пайка», г. Москва) необходимо было организовать производство литых прутковых припоев А34, обладающих следующими характеристиками (табл. 2).

Таблица 2. Требования к сплаву и припою А34

Требования к сплаву				Требования к припою	
T_L/T_S , °С	Размер Si _п , мкм (не более)	Механические свойства, не менее		Габариты ($d \times l$), мм	Дополнительные
		σ_B , МПа	δ , %		
525/525 (+1 °С)	10	240	1,5	4,5×200	Возможность сварки
				3,0×400	

По аналогии с литьем припой можно считать шихтовой заготовкой или предварительным сплавом функционального назначения. Следовательно, для получения припойного сплава можно использовать основные закономерности структурной наследственности.

В табл. 3 приведены шихтовые материалы, применяемые для приготовления припойного сплава А34.

Таблица 3. Шихтовые материалы для получения припойного сплава марки А34

Шихтовые материалы	Вид, характеристика
1. Лом алюминия электротехнический марки А5 ГОСТ 54564-2011	Электротехнические отходы в виде проволоки $\varnothing$ 3–5 мм
2. Лом меди электротехнический марки М1 ГОСТ 54564-2011	Электротехнические отходы в виде шины толщиной 3–5 мм
3. Стружка Д16 ГОСТ 54564-2011	Витая стружка, образующаяся при механической обработке деформированных полуфабрикатов
4. Синтезированный сплав АК12	Получен кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе
5. Микроструктурированный переплав (МКП) А34	Часть рабочего сплава, закристаллизованного в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе

На рис. 1 представлена технологическая схема получения литого припоя в виде прутка. После расплавления навески электротехнического лома алюминия при температуре расплава 780 °С порционно вводили электротехнический лом меди. После расплавления медного лома при температуре 710–720 °С вводили синтезированный сплав АК12, который использовался в качестве лигатуры, для обеспечения требуемого содержания кремния. Далее производили добавление предварительно подготовленной стружки Д16. Рафинирование осуществляли при 730–750 °С гранулированным флюсом Cristall 2000 (Италия) из расчета 0,5 мас. %, производили технологическую выдержку в течение 20 мин, снимали шлак и перемешивали расплав для обеспечения однородности химического состава по объему тигля. Часть расплава

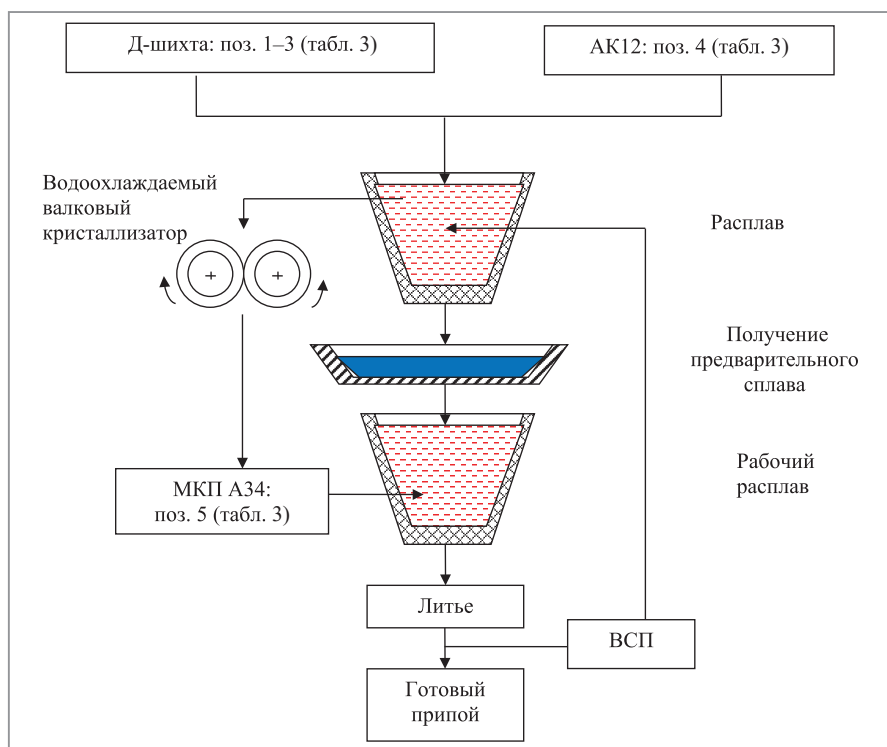


Рис. 1. Технологическая схема получения микрокристаллического припоя А34:
МКП – микрокристаллический переплав; ВСП – возврат собственного производства

заливали в водоохлаждаемый валковый кристаллизатор, получая МКП А34 в виде ленты толщиной 1,5–2,0 мм. Основную часть расплава разливали в чугунные окрашенные изложницы, получая предварительный сплав А34 в виде чушек толщиной 20–25 мм. Предварительный чушковый сплав использовали для получения рабочего сплава А34. За 10 мин до начала литья осуществляли модифицирование добавкой МКП А34 в количестве 0,5–1,0% по массе.

Оценку кинетики затвердевания и плавления исходных припойных сплавов проводили в следующем порядке:

- 1) нагрев расплава массой 0,2 кг в печи сопротивления до 600 °С;
- 2) изотермическая выдержка в течение 15 мин для выравнивания температуры расплава по всему объему;
- 3) отключение печи, естественное охлаждение расплава вместе с печью до 300 °С. В процессе охлаждения оценивали кинетику затвердевания;
- 4) повторный нагрев печи до 600 °С. В процессе нагрева оценивали кинетику плавления;
- 5) контроль температуры в ходе экспериментов осуществляли гибкими термодарами 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.

На рис. 2 представлены результаты определения кинетики плавления и затвердевания рабочего сплава А34. Видно, что температуры ликвидуса и солидуса соответствуют требованиям заказчика.

В структуре припоя А34 в виде прутка присутствуют многочисленные мелкодисперсные включения фазы CuAl_2 , многофазная эвтектика ($\text{Al} + \text{Si} + \text{CuAl}_2$) имеет мелкокристаллическое строение и равномерно распределена между дендритами алюминия, выделения кристаллов первичного кремния Si_Π отсутствуют (рис. 3).

Результаты микрорентгеноспектрального анализа (рис. 3, б; табл. 4) подтверждают, что в структуре припоя имеются фазы CuAl_2 (точки 023 и 026) неравновесного состава; тройная эвтектика ($\text{Al} + \text{Si} + \text{CuAl}_2$) (точка 025); дендриты твердого раствора на основе алюминия (точка 024).

Результаты кинетики плавления и затвердевания, анализ химического состава и микроструктуры, механических испытаний и плотности показали, что припой марки А34, полученный по разработанной технологической схеме, полностью соответствует требованиям ОСТ 4Г 0.033.200 [3] и заказчика (табл. 5).

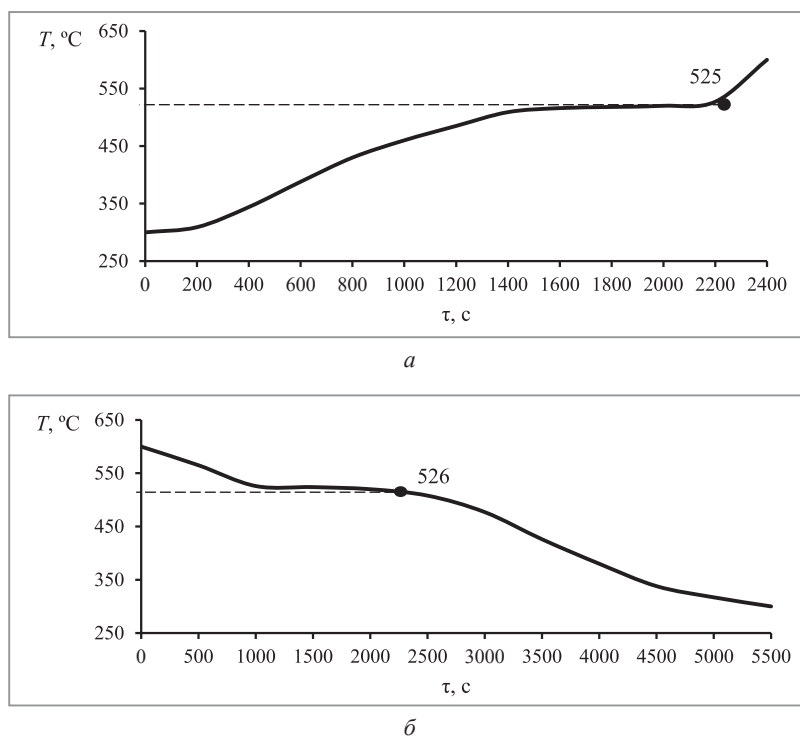


Рис. 2. Кинетика плавления (а) и затвердевания (б) сплава А34

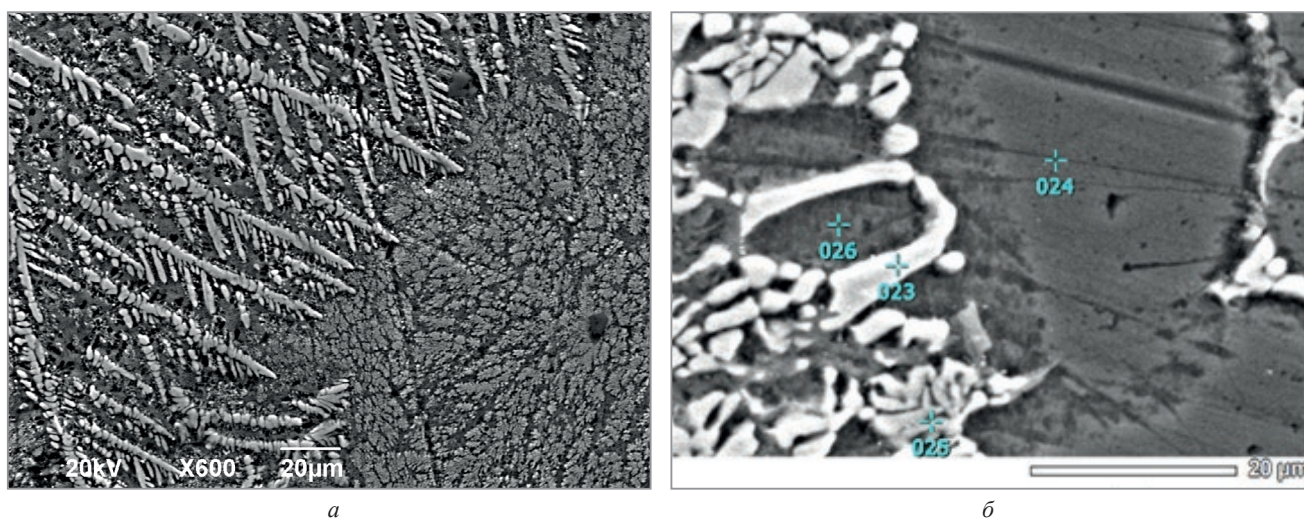
Рис. 3. Микроструктура пруткового припоя А34: а – увеличение $\times 600$; б – точки микрорентгеноспектрального анализа

Таблица 4. Распределение элементов в прутковом припое А34

Номер точки замера	Содержание элементов в сварном шве, %		
	Al	Si	Cu
023	47,44	1,18	51,38
024	98,74	0,80	0,46
025	76,82	13,74	9,44
026	83,63	0,96	15,41

Таблица 5. Физико-механические свойства припойного сплава А34

T_L/T_S , $^{\circ}\text{C}$	Размер Si_{III} , мкм (не более)	Механические свойства, не менее		Плотность, г/см^3	
		σ_B , МПа	δ , %	ρ_L	ρ_S
525/526	Отсутствуют	252	1,5	3,04	3,32*

Примечание: * – плотность в твердом состоянии 3,3 г/см^3 [3]

Далее оценили возможность применения припоя марки А34 в качестве присадочного материала при сварке. Сварку производили на установке Транс-ТИГ-350, предназначенной для аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в среде инертных газов (режим ТИГ).

Оценивали возможность сварки пластин (толщиной 2 мм) из алюминиевых сплавов АК7ч (литейный) и АМг5 (деформируемый). В качестве газовой защитной среды использовали аргон. Подача аргона начиналась за 5–7 с до возбуждения дуги, а выключалась через 5–7 с после ее обрыва.

Перед сваркой поверхность заготовок была тщательно очищена стальными проволочными щетками. Сварку заготовок производили в стык, без разделки кромок, с двухсторонним проваром (рис. 4).

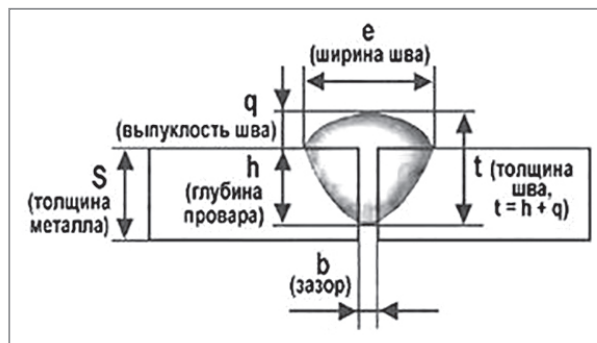


Рис. 4. Схема сварки заготовок из алюминиевых сплавов

На первом этапе оценили влияние силы тока (50, 70, 90 А) на качество сварных швов при сварке однородных материалов. Установлено, что при силе тока 90 А присадочный материал растекается по заготовкам, а в структуре сварного шва образуется большое количество пор. Кроме того, при сварке пластин из сплава АМг5 при силе тока 90 А отмечался прожог соединяемых заготовок. При силе тока 50 А в сварных соединениях присутствовал дефект «непровар». Исходя из этого, сварку АК7ч–АМг5 проводили при силе тока 70 А, поскольку тогда формировался ровный сварной шов (рис. 5, а), в структуре которого отсутствовали дефекты в виде пор и «непровар» (рис. 5, б, в).

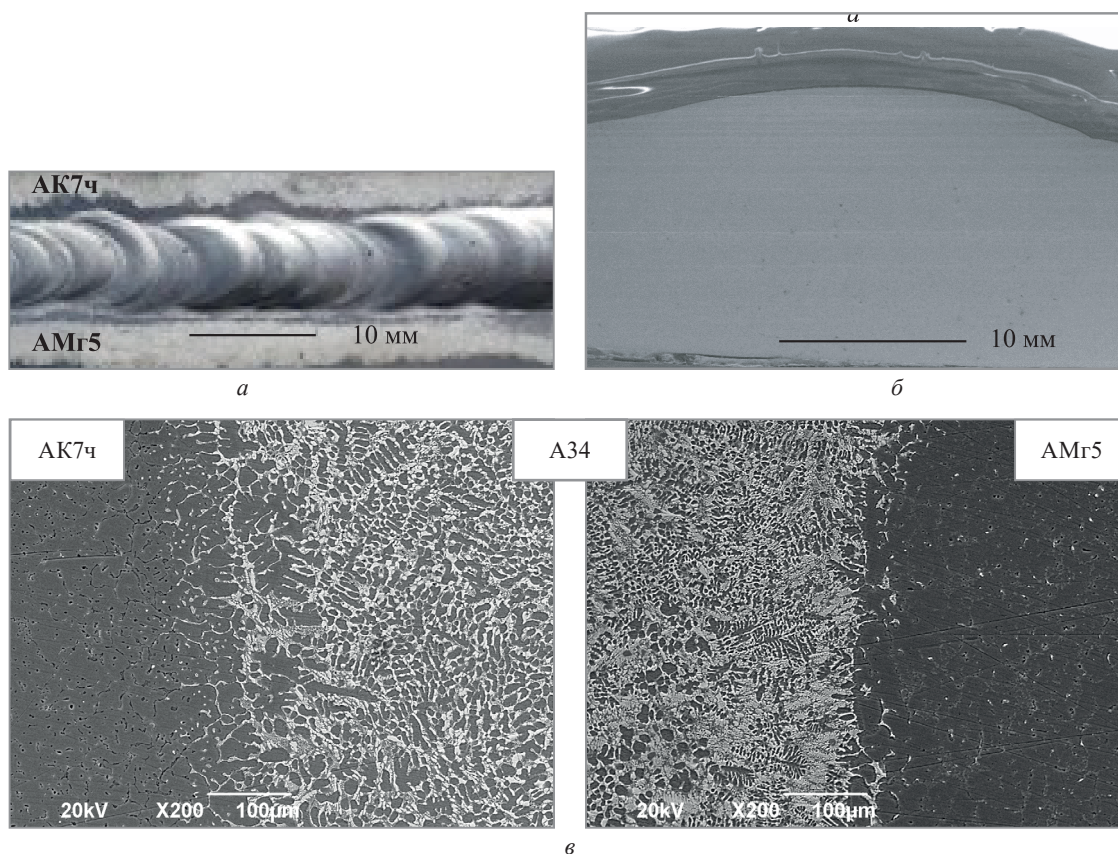


Рис. 5. Сварной шов АК7ч–АМг5, сформированный припоем А34 в качестве присадочного материала: а – сварной шов; б – макроструктура сварного шва; в – микроструктура сварного шва

Выводы

1. В результате выполненных исследований установлено, что качество литого припоя марки А34, получаемого по разработанной технологической схеме, в полной мере соответствует требованиям ОСТ 4Г 0.033.200 [3] и заказчика. Кроме того, данный припой можно использовать как присадочный материал при сварке разнородных алюминиевых сплавов.

2. Разработана технологическая инструкция ТИ-ЛВТ-11 «Изготовление мелкокристаллического пруткового припоя А34» и организовано производство пруткового припоя марки А34 до 1000 кг/год.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 17325-79. Пайка и лужение. Основные термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 22 с.
2. ГОСТ 19248-90. Припой. Классификация и обозначения. – М.: ГК СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 7 с.
3. ОСТ 4Г 0.033.200. Припой и флюсы для пайки, припойные пасты. Марки, состав, свойства и область применения. – М., 2011. – 130 с.
4. **Konstantinov, A. N.** 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 / A. N. Konstantinov, O. A. Chikova, K. V. Nikitin // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* – 2013. – Vol. 54, no. 6. – P. 484–488.
5. Effect of heating temperature and modification of Al-27%Cu-6%Si melt on the structure and phase composition of crystallized specimens / K. V. Nikitin [et al.] // *Met. Sci. Heat Treat.* – 2013. – Vol. 55, no. 3–4. – P. 30–35.

REFERENCES

1. **GOST 17325–79.** *Pajka i luzhenie. Osnovnye terminy i opredeleniya* [Soldering and tinning. Basic terms and definitions]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1989, 22 p.
2. **GOST 19248–90.** *Pripoi. Klassifikaciya i oboznacheniya* [Solders. Classification and designations]. Moscow, GK SSSR po upravleniyu kachestvom produkcii i standartam, 1990, 7 p.
3. **OST 4G 0.033.200.** *Pripoi i flyusy dlya pajki, pripojnye pasty. Marki, sostav, svojstva i oblast' primeneniya* [Solders and fluxes for soldering, solder pastes. Brands, composition, properties and scope of application]. Moscow, 2011, 130 p.
4. **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, pp. 484–488.
5. **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, pp. 30–35.