

Научная статья

УДК 621.791.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-146-157

О ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИНАХ РАЗРУШЕНИЯ ПРИПОЕВ ТИПА ПЗЛМ ВАКУУМНОЙ ПЛАВКИ

В.И. Галкин¹, П.А. Головкин¹, Р.М. Дворецков², Е.В. Галкин¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; mai@mai.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Устанавливаются возможные причины разрушения припойной проволоки из золото-медных сплавов типа ПЗЛМ, применяемой для пайки-сборки деталей электровакуумных приборов. Показано, что одной из возможных причин брака проволоки являются примеси родия и рутения, попадающие в нее вследствие ненадлежащего контроля химического состава исходных материалов, что вызвано несовершенством действующей нормативной документации на припой и входящие в них компоненты. Предложено проводить выходной контроль изготавливаемых припоев типа ПЗЛМ по истечении ≥ 10 дней, необходимых для рекристаллизации и упорядочения материала после предварительного отжига.

Ключевые слова: электровакуумные приборы, припойная проволока, технические условия, химический состав, золото, медь, примеси, диаграммы состояния, растворимость, упорядочение структуры сплавов, разрушение

Для цитирования: Галкин В.И., Головкин П.А., Дворецков Р.М., Галкин Е.В. О возможных причинах разрушения припоев типа ПЗЛМ вакуумной плавки // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 146–157. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-146-157.

Scientific article

ABOUT POSSIBLE DESTRUCTION CAUSES OF VACUUM MELTED PZIM-TYPE SOLDERS

V.I. Galkin¹, P.A. Golovkin¹, R.M. Dvoretsov², E.V. Galkin¹

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; mai@mai.ru

²Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The study considers possible destruction causes of the PZIM-type solder wire made of gold-copper alloys used for soldering and assembling of components in electrovacuum devices. The possible causes of wire defects are impurities of rhodium and ruthenium, entering into the solder wire due to improper control of the chemical composition of the source materials, caused by the imperfection of the current regulatory documentation for solders and their components. It is proposed to carry out the output control of manufactured PZIM-type solders after at least 10 days, required for recrystallization and alignment of the material after preliminary annealing.

Keywords: electrovacuum devices, solder wire, technical specifications, chemical composition, gold, copper, impurities, state diagrams, solubility, alloy structure ordering, degradation

For citation: Galkin V.I., Golovkin P.A., Dvoretsov R.M., Galkin E.V. About possible destruction causes of vacuum melted PZIM-type solders. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 146–157. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-146-157.

Введение

Современная авиационная промышленность требует использования совершенно новых материалов с уникальными свойствами [1, 2]. Электровакуумные приборы (ЭВП) широко применяются в радиотехнических устройствах, в том числе авиационного назначения (устройства радиолокации, радиосвязи, в частности сверхвысоких частот (СВЧ), радиовещания, телевидения, телеуправления и др.). Для обеспечения требуемой надежности ЭВП, срок службы которых должен достигать 10000 ч при гарантийном сроке хранения не менее 15 лет и при сохранении глубины вакуума не менее $6,5 \cdot 10^{-5}$ Па [3], большое значение имеет качество припоев, применяемых для пайки отдельных деталей [4].

Наряду с припоями на серебряной и медной основе, золотосодержащие припои являются основными при проведении сборки-пайки ЭВП для СВЧ-радиосвязи. Однако в последние годы на производстве отмечены случаи поставки припоев, которые разрушаются не только при навивке в заготовки или иной деформации, но даже непосредственно при хранении в упаковке и извлечении из нее.

Примеры таких разрушений проволоки марки ПЗлМ 60В диаметром 0,6 мм в мотке показаны на рис. 1. Фотографии мест изломов проволоки марки ПЗлМ 94В диаметром 0,6 мм, полученные с использованием оптического и электронного микроскопов, показаны на рис. 2 и 3.



Рис. 1. Бухта припойной проволоки марки ПЗлМ 60В диаметром 0,6 мм с изломами

Свойства любого сплава в значительной степени зависят от наличия различных элементов, поэтому повышение уровня показателей достигается в том числе за счет контроля содержания примесных элементов в материале [5]. В соответствии с ТУ 1868-330-05785324-2011 «Проволока из вакуумплавленных припоев. Технические условия» (взамен ТУ 48-1-330-89), содержание золота в золотомедных припоях типа ПЗлМ составляет, % (по массе):

ПЗлМ 94В	ПЗлМ 60В	ПЗлМ 50В	ПЗлМ 37,5В	ПЗлМ 35В
93,6–94,9	59,6–60,4	49,6–50,4	37,1–37,9	34,6–35,4

Остальное количество приходится на долю меди. Содержание серебра, палладия, никеля и индия не допускается. Допустимое содержание примесей в этих припоях представлено в табл. 1.

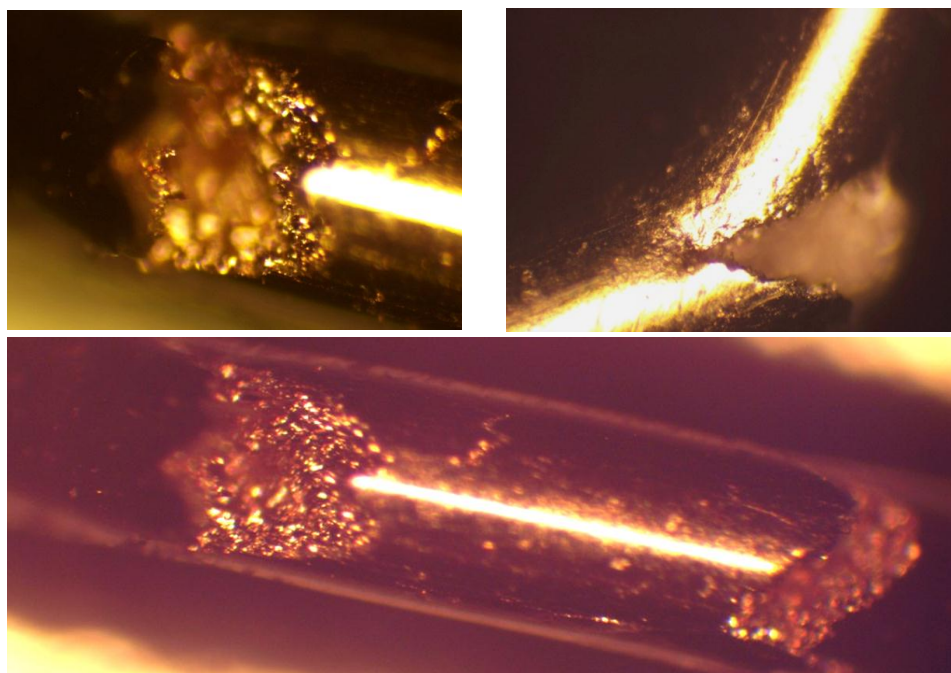


Рис. 2. Разрушение припойной проволоки марки ПЗлМ 94В диаметром 0,6 мм в бухте (увеличение $\times 50$)

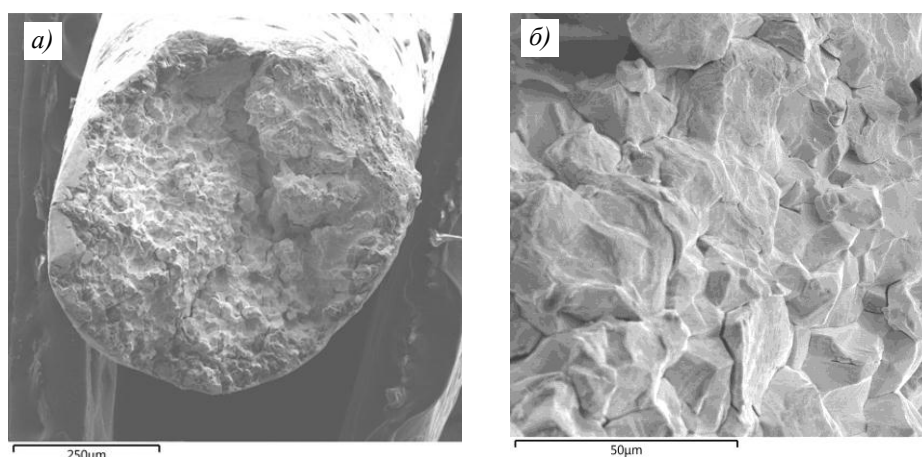


Рис. 3. Разрушение припойной проволоки марки ПЗлМ 94В диаметром 0,6 мм при увеличении $\times 100$ (a) и $\times 500$ (б)

Таблица 1

Допустимое максимальное содержание примесей в припоях типа ПЗлМ

Элемент	Допустимое максимальное содержание, % (по массе)	Элемент	Допустимое максимальное содержание, % (по массе)
Цинк	0,001	Сурьма	0,001
Кремний	0,003	Магний	0,008
Висмут	0,001	Свинец	0,001
Фосфор	0,002	Марганец	0,003
Кадмий	0,001	Мышьяк	0,001
Сера	0,0015	Кислород	0,002

На рис. 2 и 3 видно, что изломы проволоки имеют хрупкий характер и возникают даже при небольшом ее изгибе непосредственно в бухте, а поверхность проволоки покрыта множеством трещин. Таким образом, изломы имеют не единичный, а множественный характер, только лишь подавляющая их часть не завершена. Проволока из медных и золотых припоев обладает хорошей пластичностью, поэтому такой характер ее разрушения может свидетельствовать о наличии малорастворимых примесей, которые выделяются по границам зерен.

Использование портативных рентгенофлуоресцентных анализаторов хорошо зарекомендовало себя при анализе различных металлургических объектов, в том числе содержащих благородные металлы. Результаты рентгенофлуоресцентного сканирования поверхностей припойной проволоки и излома показаны на рис. 4. Общее сканирование показало наличие до 1,5 % (по массе) Pd, а также до 11,7 и 4,4 % Ru и Rh соответственно. Присутствие Pd, Ru и Rh в припоях типа ПЗЛМ, согласно ТУ 1868-330-05785324–2011, не предусмотрено [6].

Методом рентгенофлуоресцентного анализа выявлено высокое содержание Ru, Rh и Pd на поверхности проволоки (рис. 4, а), при этом на поверхности излома концентрации исследуемых элементов достигают максимальных значений (рис. 4, б, в). Такое высокое содержание последних объясняется тем, что эти малорастворимые примеси вытесняются из металлического материала на поверхность его зерен, где образуют подобие пленки.

а)										
Name	Class			Date	Time			Duration		
315.21	Precious_FP			01/08/2024	11:55:11			30 s		
Element	Fe %	Au %	Cu %	Ru %	Rh %	Pd %	Sb %	Sn %	Ta %	W %
	0.00	54.54	37.91	4.59	1.98	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00
±	0.000	0.323	0.201	0.111	0.115	0.117	0.000	0.000	0.000	0.000
Element	Pb %	In %	Hg %	Ir %	Os %	Pt %	Ag %	Co %	Cd %	Mn %
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
±	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000
Element	Ti %	Cr %	Ni %	Bi %	Zn %	Mo %	Ge %	Nb %		
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
±	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000		
Grades: No Match										
б)										
Name	Class			Date	Time			Duration		
315.21	Precious_FP			01/08/2024	12:23:52			30 s		
Element	Fe %	Au %	Cu %	Ru %	Rh %	Pd %	Sb %	Sn %	Ta %	W %
	0.00	50.08	33.73	9.65	4.34	1.51	0.00	0.00	0.00	0.00
±	0.000	0.451	0.285	0.230	0.240	0.245	0.000	0.000	0.000	0.000
Element	Pb %	In %	Hg %	Ir %	Os %	Pt %	Ag %	Co %	Cd %	Mn %
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
±	0.000	0.000	0.000	0.000	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Element	Ti %	Cr %	Ni %	Bi %	Zn %	Mo %	Ge %	Nb %		
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
±	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Grades: No Match										
в)										
Name	Class			Date	Time			Duration		
315.21	Precious_FP			01/08/2024	11:57:33			30 s		
Element	Fe %	Au %	Cu %	Ru %	Rh %	Sn %	Pd %	Sb %	Ta %	W %
	0.00	45.53	34.65	11.65	4.40	1.46	1.44	0.00	0.00	0.00
±	0.000	0.457	0.311	0.260	0.265	0.478	0.273	0.000	0.081	0.000
Element	Pb %	In %	Hg %	Ir %	Os %	Pt %	Ag %	Co %	Cd %	Mn %
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
±	0.000	0.000	0.000	0.000	0.057	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Element	Ti %	Cr %	Ni %	Bi %	Zn %	Mo %	Ge %	Nb %		
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
±	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Grades: No Match										

Рис. 4. Результаты рентгенофлуоресцентного сканирования поверхностей припойной проволоки (а) и излома (б, в)

Нормативная документация на золотосодержащие припои и их компоненты

Важно, что рутений и родий не входят в перечень примесей, проверяемых согласно ТУ 1868-330-05785324-2011 и ГОСТ 859-2014 «Медь. Марки» (взамен ГОСТ 859-2001) на бескислородную медь для ЭВП, поэтому их содержание не контролируется. Содержание Pd, Ru и Rh в меди марки М06, согласно ГОСТ 859-2014, не регламентируется. ГОСТ 28058-2015 «Золото в слитках. Технические условия» (взамен ГОСТ 28058-89) также не устанавливает предельное содержание примеси Ru в золоте марок ЗЛа-1 и ЗЛа-1П. Этот документ, хотя и ограничивает содержание примесей Pd и Rh в золоте марок ЗЛа-1 и ЗЛа-1П, но допускает использование аффинажного золота собственного производства с общим количеством неуказанных примесей 0,007 %. Между тем содержание этих примесей часто бывает достаточно велико для того, чтобы сделать припой не пригодным для изготовления ЭВП, поскольку вызывает в паяных швах трещинообразование и пористость.

Склонность к совместному присутствию палладия, рения, рутения, родия и других элементов общеизвестна и описана в ряде классических работ, например [7]. Относительно простые способы разделения золота и химических элементов платиновой группы давно отработаны [8], поэтому их присутствие в аффинажном золоте могло стать или стало следствием допущенных технологических упрощений. По-видимому, введенные в ТУ послабления в части требований к сырью получаемых припоев имели целью узаконивание таких упрощений для удешевления производства и увеличения получаемой прибыли. Так, например, при переработке автомобильных катализаторов для извлечения металлов платиновой группы их недостаточное разделение может стать следствием отсутствия в ТУ 1868-330-05785324-2011 требований к разбиению в припоях суммы примесей по элементам.

Следует также отметить, что в ранее действующих ТУ 48-1-330-89 «Проволока из вакуумплавленных припоев. Технические условия» использование в припоях аффинажного золота собственного производства не допускалось, а предельное содержание примесей определялось ссылкой на ГОСТ 28058-2015, в котором указано предельно допустимое содержание примесей Pd и Rh в золоте марки ЗЛа-1П не более 0,0005 % (по массе), а в золоте марки ЗЛа-1 – не более 0,003 и 0,001 % (по массе) соответственно. Это значит, что ТУ 48-1-330-89 являлись более строгим документом, чем пришедшие им на смену ТУ 1868-330-05785324-2011.

Особенности взаимной растворимости компонентов и примесей припоев

Современные металлические материалы могут содержать одновременно большое количество легирующих элементов и примесей. При этом один и тот же элемент может быть распределен в разных фазах сплава. При выплавке, в процессе эксплуатации в условиях повышенных температур и динамических нагрузок компоненты сплава участвуют в диффузионных процессах, химических реакциях или фазовых превращениях, в результате которых могут образоваться твердые растворы, химические соединения, интерметаллиды, нежелательные включения и др. [9–11].

Неограниченная растворимость Pd в золоте означает, что его выявленная при анализе припоя концентрация в пределах 0,7–1,5 % (по массе) близка к действительной, что делает его не соответствующим припою марки ПЗЛМ 94В по химическому составу.

В то же время очень малая растворимость Ru и Rh в золоте (не более 10^{-4} %, а при комнатной температуре практически равная нулю) и в меди (для Ru исчезающе мала) объясняет высокие показатели выявленного содержания примесей, поскольку эти элементы вытесняются на границы растущих зерен.

Данные о растворимости некоторых примесей в основных компонентах припоев типа ПЗЛМ, а также в обнаруженном в припое Pd приведены в табл. 2 [12–17]. Дополняющие табл. 2 диаграммы состояния систем Au–Cu, Cu–Rh и Cu–Pd приведены на рис. 5.

Таблица 2

Некоторые примеси в основных компонентах припоев типа ПЗЛМ и в палладии

Компонент	Примесь	Растворимость при 20 °С	Источник литературы
Au	Cu	Неограниченная взаимная	[12, 13]
	Pd		[14]
	Bi	0,04 % (атомн.)	[12]
	Te	Очень мала при <447 °С, <0,1 % (атомн.)	[13]
		>0,001 % (атомн.)	[12]
	Ru	Практически равна нулю	[13]
		Стремится к нулю при <800 °С	[12]
	Re	Нерастворим в твердом состоянии	[13]
		0,1 % (атомн.) при 1000 °С	[12]
Se	Очень мала	[13]	
	Стремится к нулю при <376 °С	[12]	
Rh	1,5 % (атомн.) при 1100 °С, стремится к нулю при <800 °С	[12]	
Cu	Pd	Хорошо растворим	[15, 16]
	Rh		[15]
	Bi	0,015 % (по массе) при 500 °С	[14]
		0,0003 % (атомн.) при 600 °С	[12]
	Se	≤3–10 % (по массе) при 600 °С	[14]
	Te	≤3–10 % (по массе)	[16]
	Ru	Исчезающе мала	[17]
Re	4–10 % (атомн.)	[14]	
Pd	Bi	Хорошо растворим в твердом Pd, 18–20 % (атомн.)	[12]
	Se	Стремится к нулю при <390 °С, ~1,5 % (атомн.) при 590 °С	[17]
	Te	Практически нерастворим, ~11 % (атомн.) при 459 °С	
	Rh	~10 % (атомн.) при 500 °С	
	Ru	~3,3 % (атомн.) при 600 °С	
	Re	Практически нерастворим, ~11 % (атомн.) при 1000 °С	

Обнаруженный в припое Ru практически нерастворим в Au и Cu, а Rh нерастворим в Au. Неограниченная растворимость Pd в Au и Cu, а также требующее ряда специальных операций отделение от Pd нерастворимых в золоте и меди Rh и Ru могли стать одной из причин разрушения материала припоя. В данном случае Pd выступил в качестве транспорта для примесей Rh и Ru из-за того, что производитель припоя не применил известные способы очистки аффинажа золота. Попадание Pd в припой при его изготовлении, безусловно, является грубейшим технологическим нарушением.

На рис. 6 показана фактура изломов припойной проволоки, полученная с использованием электронного микроскопа. Хотя, согласно ТУ 1868-330-05785324–2011, проволока поставляется в неотожженном состоянии, хорошо видно, что форма зерен близка к равноосным многогранникам, утратившим следы деформации материала при волочении, а разрушение прошло по их границам.

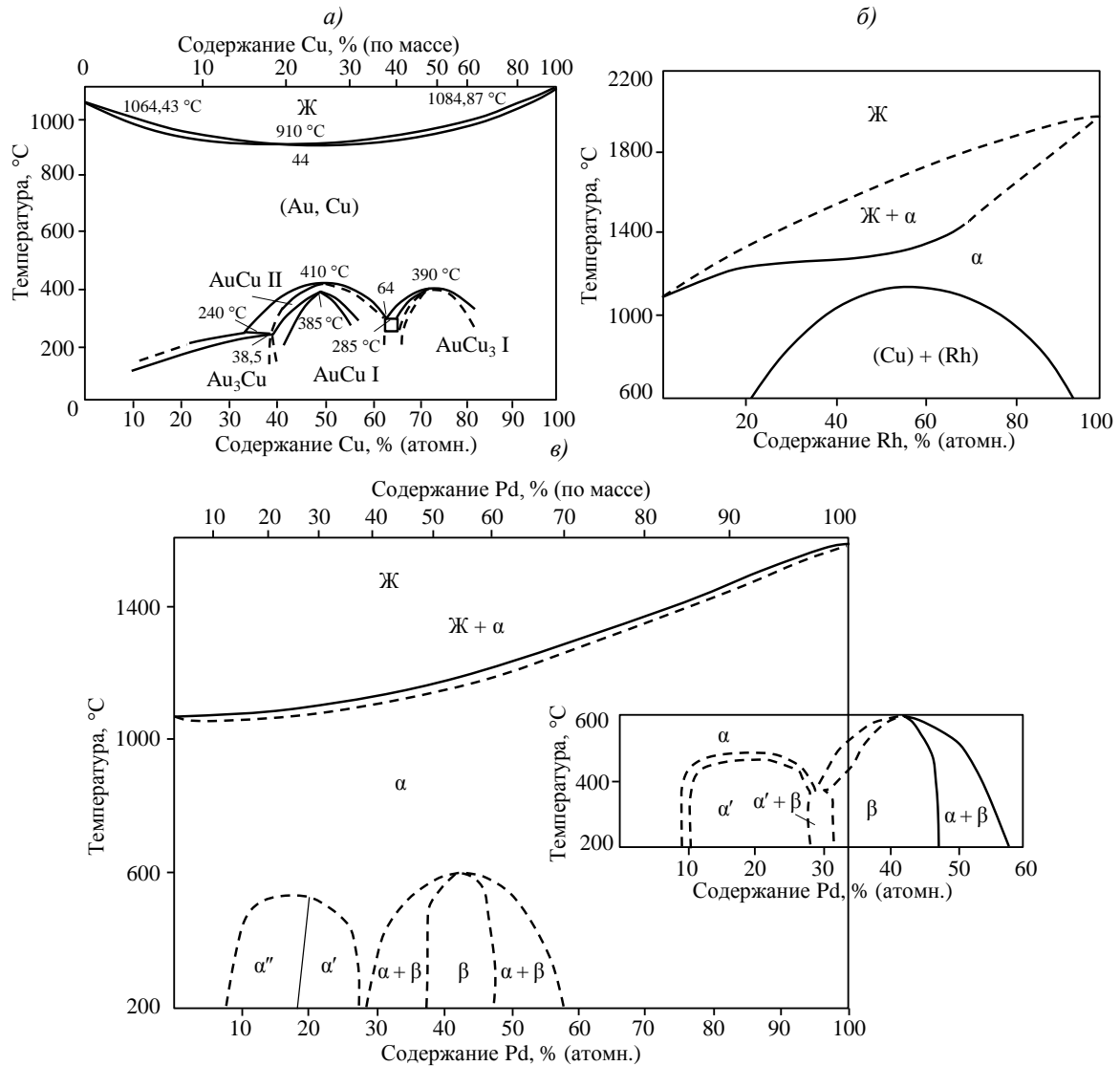


Рис. 5. Диаграммы состояния систем Au–Cu (а), Cu–Rh (б) и Cu–Pd (в)

Причина разрушения проволоки при хранении, а не при изготовлении заключается в том, что перед волочением заготовки слитков подвергают прессованию, при котором материал претерпевает деформацию и проработку исходной литой структуры. На поверхности вновь образованных деформированных зерен возникают металлические связи, придающие материалу достаточную для обработки прочность. В процессе хранения происходит свойственная для золота и меди высокой чистоты собирательная рекристаллизация зерен, растущие зерна вытесняют на свои границы примеси Rh и Ru, металлические связи в материале ослабевают, и проволока разрушается.

По данным работы [18], самопроизвольная рекристаллизация меди марки М0 при 20 °С протекает уже после вылеживания в течение 10 дней после пластической деформации. Как показывает практика, этому особенно способствует нагрев поверхности проволоки, например, при попадании на нее прямых солнечных лучей. Для ускоренной рекристаллизации меди марки М0 достаточен нагрев до температуры 130 °С и выдержка в течение 1 ч. Поскольку температура и время начала рекристаллизации уменьшаются с повышением чистоты металлического материала, для применяемой в припоях меди марки М0б эти показатели будут меньше.

Роль упорядочения материала в вытеснении примесей на границы зерен

Помимо рекристаллизации, вытеснению малорастворимых примесей на границы зерен способствуют процессы упорядочения в системах Au–Cu и Cu–Pd с образованием соединений Курнакова [19, 20]. Золото и медь образуют проходящий через минимум на диаграмме непрерывный ряд твердых растворов, а также интерметаллиды Au_3Cu , $AuCu$ и $AuCu_3$, как показано на рис. 5, а. Эти фазы дополняют обнаруженная примесь Rh, которая также образует с медью упорядоченную структуру (рис. 5, б), и примесь Pd в виде двойных соединений $PdCu_3$ с переходом через максимум диаграммы (рис. 5, в).

Именно поэтому прописанные в ТУ 1868-330-05785324–2011 методы контроля механических свойств вновь изготовленной проволоки могут не показать ее возможное несоответствие.

В пределах относительно малых концентраций Rh хорошо растворим не только в Pd, но и в Cu, поэтому его разрушительное воздействие на припой проявляется в момент рекристаллизации и упорядочения основного твердого раствора в соответствии с диаграммами состояния, т. е. является отложенным во времени.

Для исключения такой опасности в ТУ 1868-330-05785324–2011 следует прописать минимальное время пролеживания, достаточное для рекристаллизации и упорядочения металлического материала, после которого должен проводиться выходной контроль припоев на предприятии-изготовителе. Приведенные на рис. 5 и в табл. 2 данные о критически малой растворимости некоторых примесей в различных компонентах припоя должны быть учтены в ТУ 1868-330-05785324–2011, а также в ГОСТ 859–2014 и ГОСТ 28058–2015. В противном случае применение дефектной проволоки неминуемо будет вызывать нарушение вакуумной плотности получаемых ЭВП.

На рис. 6 видны сетки трещин и выпадение зерен на шлифе проволоки марки ПЗлМ 35В диаметром 0,5 мм.

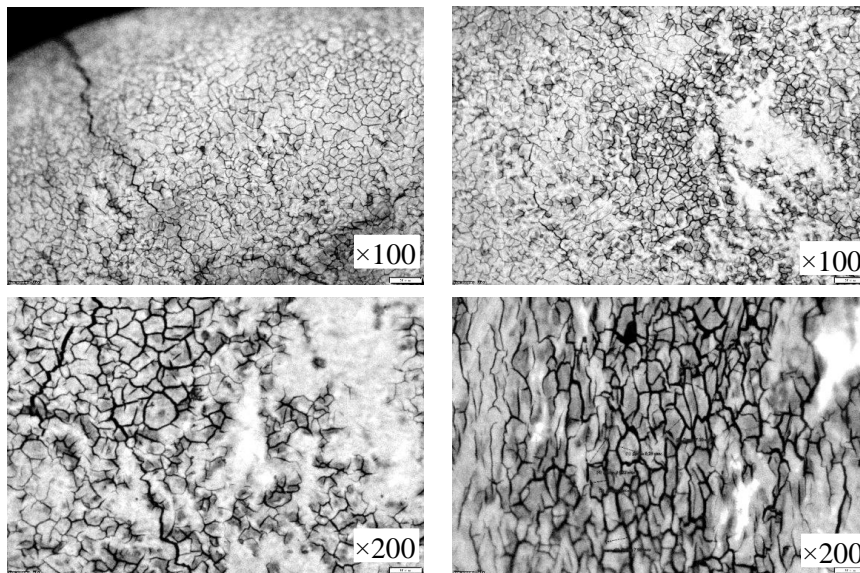


Рис. 6. Сетка трещин и выкрашивание отдельных зерен на фоне структурной неоднородности материала шлифа припойной проволоки марки ПЗлМ 35В диаметром 0,5 мм

Следует отметить, что на рис. 6 ярко выражена структурная неоднородность материала проволоки, которая требует объяснения. То же касается рис. 7, где показаны паяные швы с припоя марки ПЗлМ 35В, в зазоре которых по границам выросших зерен образовались протяженные трещины, и где видна неоднородность материала паяного шва, которую можно описать как классическую ($\alpha + \beta$)-структуру, свойственную, например, латуни [21].

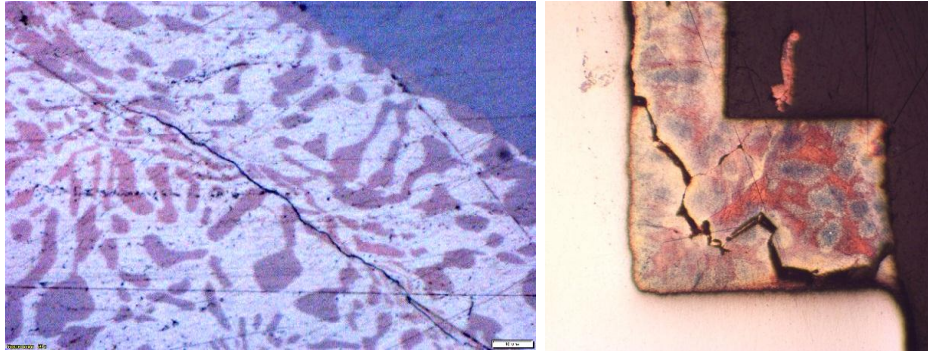


Рис. 7. Трещины в паяном шве, полученном с использованием загрязненной примесями Rh и Ru припойной проволоки, заявленной как припой марки ПЗлМ 35В (увеличение $\times 200$)

В то же время, в соответствии с представленной на рис. 5, а диаграммой, медь и золото при содержании в припое марки ПЗлМ 35В 35 % (атомн.) золота не создают переходных фаз, поскольку для этого необходимо наличие ≥ 38 % (атомн.) меди в золоте. Это значит, что материал должен быть представлен однородным неупорядоченным α -твердым раствором. Как и в случае с припоем марки ПЗлМ 94В, данный припой не соответствует заявленной марке ПЗлМ 35В.

Такая повторяемость в отклонениях от химического состава припоев может быть вызвана в том числе описанными послаблениями ТУ 1868-330-05785324–2011 к порядку проверки химической чистоты сырья и компонентов припоя (не только золота, но и меди).

На примере материалов из медных сплавов и бескислородной меди подобные случаи разрушения рассмотрены в ряде работ, где в качестве примесей выступали висмут, селен и теллур [22, 23].

Исследователи также указывают, что при нагреве в водороде может происходить водородное охрупчивание, не связанное непосредственно с «водородной болезнью» в меди [24], а имеющее в своей природе превышение предельной растворимости водорода, которое тем сильнее, чем хуже химическая чистота меди [25]. Выделяясь по границам зерен, избыточный водород может дополнительно способствовать ослаблению металлических связей в материале и его разрушению. Это явление также ложится в канву требований к повышению качества сырья и компонентов, применяемых для припоев.

Исходя из изложенного, входной контроль припоев должен включать проверку их химического состава на соответствие заявленной марке и содержание примесей, как указанных, так и не указанных в ТУ 1868-330-05785324–2011 и другой документации на припой и их компоненты. В противном случае в припой могут попасть вещества, хорошо растворимые в одних его компонентах и примесях и плохо растворимые в других, но при этом выступающие в роли их переносчика.

Практика показала, что простым способом предварительной проверки проволоки при входном контроле может стать ее навивка на оправку малого диаметра после провоцирующего собирательную рекристаллизацию отжига, для которого достаточно нагрева образца до $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч. При этом выходной контроль изготавливаемых припоев должен проводиться по истечении ≥ 10 дней, необходимых для рекристаллизации и упорядочения материала.

Заключения

В ТУ 1868-330-05785324–2011 выявлены упущения и допущения, несущие опасность нарушения вакуумной плотности ЭВП при формальном соответствии припоя прописанным требованиям. В частности, отсутствие требования о необходимости разделения общего количества примесей в аффинаже золота собственного производства делает возможным попадание в него малорастворимых примесей.

Следует проводить расширенный входной контроль припоев на примеси, выходя за рамки требований, предъявляемых по ТУ 1868-330-05785324-2011, ГОСТ 859-2014 и ГОСТ 28058-2015. При этом должна учитываться взаимная растворимость примесей в компонентах припоя и друг в друге как в возможных носителях.

Отложенный характер разрушения загрязненного малорастворимыми примесями припоя делает его особенно опасным, поскольку затрудняет его выявление при межоперационном контроле паяных узлов на герметичность и вакуумную плотность.

Отложенный характер возможного разрушения материала припоя делает необходимым проведение его выходного контроля на предприятии-изготовителе после ≥ 10 дней, достаточных для самопроизвольной рекристаллизации и наиболее полного упорядочения материала.

Для предварительного контроля соответствия припойной проволоки требованиям химической чистоты можно применять ее навивку на оправку малого диаметра после провоцирующего собирательную рекристаллизацию материала отжига до 130 °С в течение 1 ч.

Список источников

1. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // *Инновации*. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Черепнин Н.В. Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. М.: Советское радио, 1966. 352 с.
4. Свиридов А.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А. Коррозионная стойкость паяных соединений топливных коллекторов ГТД, выполненных различными припоями // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1 (95). С. 23–33. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-23-33.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Чередниченко И.В., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Пискорский В.П. Влияние содержания меди на фазовый состав и магнитные свойства термостабильных спеченных магнитов систем Nd-Dy-Fe-Co-B и Pr-Dy-Fe-Co-B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № S2. С. 11–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-11-19.
6. Федоров И.А. Родий. 2-е изд. М.: Металлургия, 1970. 364 с.
7. Звягинцев О.Е. Аффинаж золота, серебра и металлов платиновой группы. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1945. 241 с.
8. Способ селективного извлечения палладия, платины и родия из концентратов: пат. 2398898 С1 Рос. Федерация; заявл. 09.04.09; опубл. 10.09.10.
9. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). С. 3–13. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
10. Наприенко С.А., Ерак А.Д., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Давыденко А.Н. Изменение структуры и свойств паяных припоем ВПр16 соединений при различных температурных воздействиях // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 115–125. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-115-125.
11. Дворецков Р.М., Тихонов М.М., Карачевцев Ф.Н., Куко И.С. Определение химического состава жаропрочных сплавов на различных этапах аддитивного производства // *Труды ВИАМ*. 2021. № 6 (100). С. 112–122. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-112-122.

12. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Наука, 1996. Т. 1. 992 с.
13. Малышев В.М., Румянцев Д.В. Золото. М.: Metallurgia, 1979. 288 с.
14. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник. М.: Наука, 1979. 248 с.
15. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Наука, 1996. Т. 3. кн. 1. 872 с.
16. Сучков Д.И. Медь и ее сплавы. М.: Metallurgia, 1966. 248 с.
17. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Наука, 1996. Т. 2. 1028 с.
18. Лайнер Д.И., Малышева Л.А., Лунева В.И. и др. Об особенностях рекристаллизации меди различной степени чистоты, прокатанной с высокой степенью деформации // Научные труды Института / Гос. науч.-исслед. и проектный ин-т сплавов и обработки металлов «Гипроцветметобработка». М.: Metallurgia, 1974. Вып. 42: Metallovedenie medi i spлавов na mednoy osnove. С. 39–44.
19. Бодяко М.Н., Астапчик С.А., Ярошевич Г.Б. Термокинетика рекристаллизации. Минск: Наука и техника, 1968. 252 с.
20. Угай Я.А. Общая химия: учеб. для студентов хим. спец. ун-тов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1984. 440 с.
21. Мальцев М.В. Metallografiya promyshlennnykh tsvetnykh metalliv i spлавov. 2-е изд. М.: Metallurgia, 1970. 364 с.
22. Головкин П.А. Повышение качества деталей из бескислородной меди для электровакуумных приборов СВЧ-диапазона // Технология машиностроения. 2020. № 5. С. 34–41.
23. Головкин П.А. Влияние световых оттенков в материале прутков из бескислородной меди на его вакуумную плотность // Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективные машиностроительные технологии» (13–17 мая 2024 г., г. Санкт-Петербург). СПб., 2024. С. 298–304.
24. ГОСТ 10988–2016. Прутки из бескислородной меди для электровакуумной промышленности. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2017. 15 с.
25. Новиков И.И., Фонарев Г.С. О зависимости пластичности поликристаллической меди от температуры // Metallovedenie tsvetnykh metalliv i spлавov. М.: Наука, 1972. С. 135–140.

References

1. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Cherepnin N.V. *Vacuum properties of materials for electronic devices*. Moscow: Sovetskoe radio, 1966, 352 p.
4. Sviridov A.V., Afanasyev-Khodykin A.N., Galushka I.A. Corrosion resistance of the brazed joints of the GTE fuel manifolds, made with various brazing alloys. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), pp. 23–33. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 25, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-23-33.
5. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Cherednichenko I.V., Rezchikova I.I., Valeev R.A., Piskorskij V.P. Influence of Cu content to phase structure and magnetic properties of thermostable sintered magnets of Nd–Dy–Fe–Co–B and Pr–Dy–Fe–Co–B systems. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. S2 (39), pp. 11–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-11-19.
6. Fedorov I.A. *Rhodium*. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1970, 364 p.
7. Zvyagintsev O.E. *Refining of Gold, Silver, and Platinum Group Metals*. 3rd ed., rev. and ad. Moscow: State Sc. and Tech. Pub. House of Literature on Ferrous and Non-Ferrous Metallurgy, 1945, 241 p.
8. *Method for the Selective Extraction of Palladium, Platinum, and Rhodium from Concentrates*: pat. 2398898 C1 Rus. Federation; appl. 09.04.09; publ. 10.09.10.

9. Kablov E.N., Kutyrav A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 3–13. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 25, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
10. Naprienko S.A., Erak A.D., Afanasev-Khodykin A.N., Davidenko A.N. Structure variation and properties of soldered joints ВПp16 under various temperature exposures. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 115–125. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 25, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-115-125.
11. Dvoretsov R.M., Tikhonov M.M., Karachevtsev F.N., Kuko I.S. Determination of the chemical composition of heat-resistant alloys at various stages of additive manufacturing. *Trudy VIAM*, 2021, no. 6 (100), pp. 112–122. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 25, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-112-122.
12. *Phase Diagrams of Binary Metallic Systems: A Handbook in 3 vols.* Ed. N.P. Lyakishev. Moscow: Nauka, 1996, vol. 1, 992 p.
13. Malyshev V.M., Rummyantsev D.V. *Gold*. Moscow: Metallurgiya, 1979, 288 p.
14. *Binary and Multicomponent Systems Based on Copper: A Handbook*. Moscow: Nauka, 1979, 248 p.
15. *Phase Diagrams of Binary Metallic Systems: A Handbook in 3 vols.* Ed. N.P. Lyakishev. Moscow: Nauka, 1996, vol. 3, book 1, 872 p.
16. Suchkov D.I. *Copper and Its Alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1966, 248 p.
17. *Phase Diagrams of Binary Metallic Systems: A Handbook in 3 vols.* Ed. N.P. Lyakishev. Moscow: Nauka, 1996, vol. 2, 1028 p.
18. Lainer D.I., Malysheva L.A., Luneva V.I. et al. On the Recrystallization Features of Copper of Varying Purity, Rolled with a High Degree of Deformation. *Nauchnye Trudy institute «Giprotsvetmetobrabotka»*. Moscow: Metallurgiya, 1974, is 42: Metallurgy of Copper and Copper-Based Alloys, pp. 39–44.
19. Bodyako M.N., Astapchik S.A., Yaroshevich G.B. *Thermokinetics of Recrystallization*. Minsk: Nauka i tekhnologiya, 1968, 252 p.
20. Ugai Ya.A. *General Chemistry: Textbook for Students of Chemical Specialized Universities*. 2nd ed., rev. and ad. Moscow: Vysshaya Shkola, 1984, 440 p.
21. Maltsev M.V. *Metallography of Industrial Non-Ferrous Metals and Alloys*. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1970, 364 p.
22. Golovkin P.A. Improving the Quality of Oxygen-Free Copper Parts for Microwave Electrovacuum Devices. *Technologiya mashinostroeniya*, 2020, no. 5, pp. 34–41.
23. Golovkin P.A. Influence of light shades in the material of oxygen-free copper rods on its vacuum density. *Int. sc.-pract. conf. «Advanced mechanical engineering technologies»*. St. Petersburg, 2024, pp. 298–304.
24. State Standard 10988–2016. *Oxygen-free copper rods for the vacuum tube industry. Specifications*. Moscow: Standartinform, 2017, 15 p.
25. Novikov I.I., Fonarev G.S. On the dependence of the plasticity of polycrystalline copper on temperature. *Metallurgy of non-ferrous metals and alloys*. Moscow: Nauka, 1972, pp. 135–140.

Информация об авторах

Галкин Виктор Иванович, профессор, д.т.н., МАИ, mai@mai.ru
Головкин Павел Александрович, методист, к.т.н., МАИ, mai@mai.ru
Дворецков Роман Михайлович, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Галкин Евгений Владимирович, доцент, к.т.н., МАИ, mai@mai.ru

Information about the authors

Victor I. Galkin, Professor, Doctor of Sciences (Tech.), MAI, mai@mai.ru
Pavel A. Golovkin, Methodologist, Candidate of Sciences (Tech.), MAI, mai@mai.ru
Roman M. Dvoretsov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Evgeny V. Galkin, Associate Professor, Candidate of Sciences (Tech.), MAI, mai@mai.ru

Статья поступила в редакцию 10.10.2025; получена после доработки 25.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.11.2025.
 The article was submitted 10.10.2025; received in revised form 25.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 27.11.2025.