

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-14-30

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Cu–Mg

А.А. Селиванов¹, Е.А. Ткаченко¹, В.В. Бабанов¹, А.И. Асташкин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Приведены результаты исследования качества поверхности обшивочных листов из сплавов типа Д16ч. Методами металлографического и фрактографического анализов показано, что к появлению пузырей в исследованных листах приводит наличие внутренних поверхностей раздела (в виде пор в основе листов и плакировке), а также дефектных участков некачественной сварки плакировки и основы листа, в которые в процессе нагревов, проводимых при их изготовлении и термической обработке, диффундирует водород, растворенный в металле или образующийся на поверхности листов при реакции алюминия с парами воды. Выявлена тенденция к снижению относительного удлинения в листах с поверхностными пузырями по сравнению с листами без дефектов.

Ключевые слова: поверхностные дефекты листов, пузыри, содержание водорода, газовая пористость, механические свойства

Для цитирования: Селиванов А.А., Ткаченко Е.А., Бабанов В.В., Асташкин А.И. Исследование качества поверхности листов из сплавов системы Al–Cu–Mg // Труды «ВИАМ». 2022. № 8 (114). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-14-30.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE SURFACE QUALITY OF SHEETS MADE OF ALLOYS OF THE Al–Cu–Mg SYSTEM

A.A. Selivanov¹, E.A. Tkachenko¹, V.V. Babanov¹, A.I. Astashkin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article presents the results of a study of the surface quality of cladding sheets made of alloys of the D16ch type. Methods of metallographic and fractographic analyzes have shown that the appearance of bubbles in the investigated sheets is caused by the presence of internal interfaces (in the form of pores in the base of sheets and cladding), as well as defective areas of poor-quality welding of the cladding and production and heat treatment of sheets, diffuses hydrogen dissolved in the metal or formed on the surface of the sheets during the reaction of aluminum with water vapor. A tendency towards a decrease in the relative elongation in sheets with surface bubbles compared to sheets without defects was revealed.

Keywords: surface defects of sheets, bubbles, hydrogen content, gas porosity, mechanical properties

For citation: Selivanov A.A., Tkachenko E.A., Babanov V.V., Astashkin A.I. Investigation of the surface quality of sheets made of alloys of the Al–Cu–Mg system. *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-14-30.

Введение

Высокий уровень технического совершенства современных авиационных конструкций (весовой эффективности, надежности и ресурса) при эксплуатации достигается не только благодаря использованию материалов с повышенными характеристиками прочности, усталостной долговечности и коррозионной стойкости, но также и обеспечению высокого уровня стабильности свойств авиационных материалов [1–7], в том числе путем существенного ограничения количества металлургических дефектов в используемых полуфабрикатах из алюминиевых сплавов.

Для таких полуфабрикатов, как обшивочные листы из сплавов типа Д16, особенно существенное влияние на их эксплуатационные характеристики оказывает качество поверхности, в том числе, поверхностные дефекты [8].

Типичными дефектами на поверхности листов из алюминиевых сплавов являются «пузыри» [9, 10]. Известны основные причины, приводящие к образованию пузырей на поверхности листов, – это, прежде всего, повышенное газосодержание и пористость слитков [11, 12], включения воздуха или смазочных материалов, попадающих внутрь металла при деформации, а также влажность насыщенного воздуха в атмосфере цехов [10, 11].

Существенное совершенствование металлургического оборудования и технологических процессов изготовления полуфабрикатов, осуществленное в последние годы, позволяет сократить количество металлургических дефектов благодаря устранению причин их появления [4, 13].

С целью уточнения причин появления указанного дефекта, обнаруженного на поверхности обшивочных листов, изготовленных на металлургических заводах, в последние годы проведено исследование, результаты которого изложены в данной статье.

Материал и методы

Материалом для исследований служили листовые образцы, отобранные от нескольких партий обшивочных холоднокатаных листов толщиной от 1 до 4 мм из сплавов 1163-РДТВ, 1163-РДМВ, 1163-АТВ, Д16ч.-АТВ, Д19ч.-АМВ со множественными поверхностными дефектами в виде пузырей. Листы изготовлены в производственных условиях металлургических заводов по серийной технологии, включающей литье, гомогенизацию, резку слитков, фрезерование слябов, изготовление планшет из сплавов АД1 или АД35, плакирование слябов, горячую прокатку, смотку полосы в рулон, отжиг горячекатаных рулонов, холодную прокатку, отжиг подката, окончательный отжиг рулонов, резку рулона на листы, окончательный отжиг листов (в состоянии М) или закалку листов и правку их растяжением (в состоянии Т) [10].

Химический состав сплавов определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 5100 ICP-OES по методикам МИ 1.2.051–2013, МИ 1.2.068–2015 и МИ 1.2.064–2014.

Определение содержания водорода в слитках по твердой пробе осуществляли по ГОСТ 21132.1–81.

Содержание водорода в образцах, отобранных из зон, содержащих пузыри, и зон, свободных от этих дефектов, определяли на газоанализаторе RHEN602 фирмы Лесо, работа которого основывается на методе нагрева в токе инертного газа-носителя. Измерение содержания водорода в данном приборе основано на изменении теплопроводности в кондуктометрической ячейке под воздействием водородсодержащей газовой смеси. Для анализа использовали нестандартные образцы размером 8×20 мм с незащищенной поверхностью для сохранения дефектов. Перед проведением испытаний

образцы обезжировали в соответствии с методикой измерений. Согласно этой методике, в результате анализа учитывали только растворенный водород.

Исследование микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе Olympus GX-51 по методике МР 21-31–85.

Фрактографический анализ поверхности листов, плакировки и изломов проведен с применением электронного сканирующего микроскопа, рентгеноспектральный микроанализ – на микроскопе EVO MA 10 фирмы Carl Zeiss по методике РД 50-672–88.

Механические свойства при растяжении (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ) при температуре 20 °С определяли на машине Zwick/Roel по ГОСТ 11701–84.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты исследования

Анализ вида дефектов и определение газосодержания в листах

На поверхности листовых образцов толщиной от 1 до 4 мм на лицевой стороне имелись дефекты в виде вспучивания поверхности – так называемые «пузыри» (рис. 1). Расположение, форма и размеры наблюдаемых пузырей разнообразны: как правило, они имеют овальную форму (линейные размеры от 0,5 до 4 мм), несколько вытянуты в направлении прокатки и расположены группами (рис. 1, а, б) или строчечно (рис. 1, в). Мелкие пузыри беспорядочно расположены по поверхности листа и имеют размеры 0,5–2 мм (рис. 1, г, д). Наблюдаются также единичные дефекты на плакировке в виде пузырей (рис. 1, е) и следы от сплюснутых при прокатке листов крупных пузырей размером >5 мм, а также трещины и разрывы в плакировке (рис. 1, ж, з).

Следует отметить, что все исследованные листы по общей площади пузырей на 1 м² поверхности не соответствуют требованиям нормативной документации – ОСТ1 90070–92.

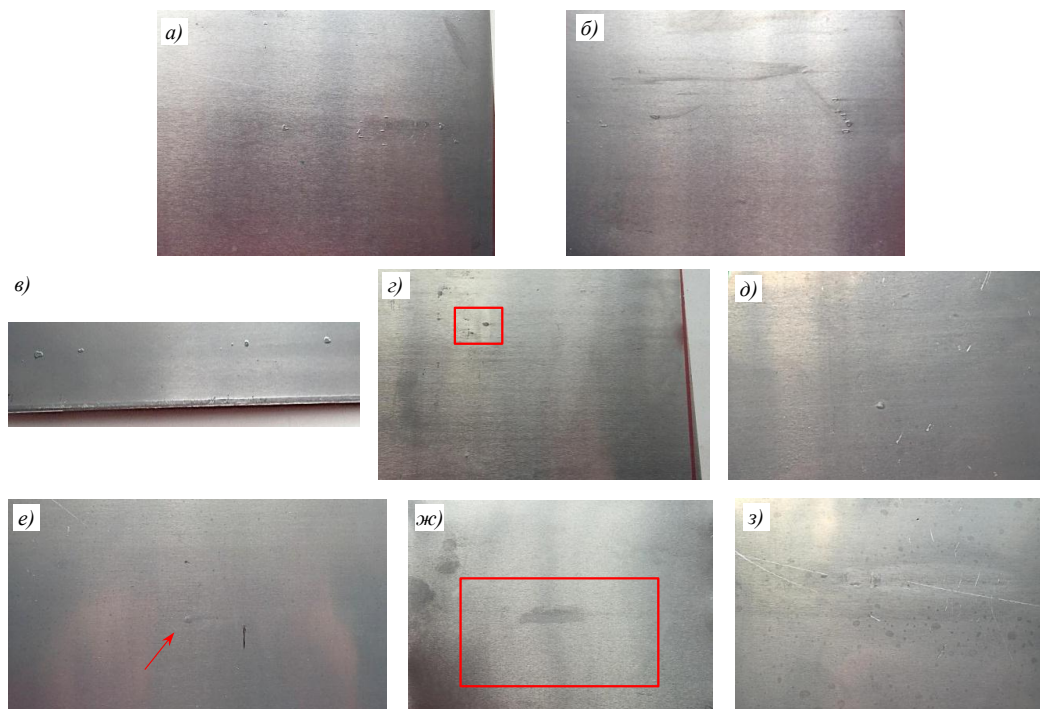


Рис. 1. Внешний вид типичных дефектов типа «пузырей» на поверхности исследованных плакированных листов толщиной 2,5–4,0 мм из сплавов 1163 (а–в, е–з), Д16ч. (д) и Д19ч. (г) в отожженном и термоупрочненном состояниях: а, б – групповое расположение; в – строчечное; г – беспорядочное; д, е – единичные пузыри; ж – трещина и разрыв; з – сплюснутые пузыри

Как видно из представленных в табл. 1 и 2 данных, слитки для основы и плакировки, из которых изготовлены исследуемые листы, по химическому составу и содержанию водорода соответствуют требованиям нормативной документации. Однако следует отметить, что по содержанию водорода в слитках исследуемые полуфабрикаты можно разделить на две группы. В первой группе содержание водорода находится на верхнем пределе: 0,23–0,35 см³ на 100 г металла, а в слитках второй группы содержание водорода существенно меньше: 0,083–0,181 см³ на 100 г металла. При исследовании листовых образцов с дефектами проведено определение содержания водорода в образцах, отобранных из зон, содержащих пузыри, и зон, свободных от этих дефектов.

Таблица 1

Химический состав слитков для плакировки

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)								Содержание водорода, см ³ /100 г Me
	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Zn	Cr	
АД1	0,009–0,01	0,013–0,02	0,007–0,012	0,26–0,270	0,110–0,14	0,09–0,100	0,023–0,1	–	0,146–0,25
АД35	0,04–0,049	0,850–0,90	0,60–0,7	0,2–0,3	0,920–1,0	0,04–0,05	0,044–0,09	0,010–0,024	0,187–0,25
АД1 (ГОСТ 4784–2019)	0,02	0,005	0,025	≤0,3	≤0,3	≤0,1	≤0,1	–	–
АД35 (ГОСТ 4784–2019)	≤0,1	0,8–1,4	0,5–0,9	≤0,5	0,8–1,2	≤0,15	≤0,2	–	–

Установлено (табл. 3), что содержание растворенного водорода в материале листов составляет от 0,31 до 0,78 см³ на 100 г металла. Это существенно больше содержания водорода в исходных слитках (табл. 1 и 2) и в 1,5–3 раза превышает допустимое по ОСТ1 90070–92 и ТУ1-801-006–2011, а также значительно больше содержания водорода в металле, причем, как правило, в зонах скопления пузырей на поверхности листов отмечается более высокое содержание растворенного водорода по сравнению с зонами, свободными от пузырей на поверхности.

Таблица 3

Содержание водорода в исследованных листах в закаленном (Т) и отожженном (М) состояниях

Сплав, состояние	Толщина листа, мм	Зона отбора образцов из листа	Содержание водорода, см ³ /100 г Me (% (по массе))
1163-АТВ, Д16ч.-АТВ, 1163-РДТВ	2,5–4,0	С пузырями	0,40–0,62 (0,000036–0,000055)
		Без пузырей	0,31–0,55 (0,000028–0,000049)
1163-АМВ, 1163-РДМВ, Д19ч.-АМВ	3,0–4,0	С пузырями	0,72–0,78 (0,000641–0,000069)
		Без пузырей	0,57–0,66 (0,000051–0,000059)

Таблица 2

Химический состав слитков из сплавов 1163, Д16ч. и Д19ч., используемых для изготовления горячекатаных рудонов

Условный номер группы	Сплав	Количество плавок	Содержание элементов, % (по массе)										Содержание водорода, см ³ /100 г Me
			Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Ni	Ti	Zn			
1	1163	11	4,2-4,4	1,2-1,4	0,52-0,56	0,07-0,1	0,04-0,1	0,01	0,04-0,05	<0,1	0,23-0,25		
	Д16ч.	1	4,67	1,63	0,54	0,25	0,15	0,02	0,07	<0,1	0,35		
2	1163	6	4,16-4,22	1,38-1,54	0,57-0,61	0,12-0,15	0,05-0,11	0,009-0,016	0,043-0,046	0,01-0,014	0,083-0,124		
	Д19ч.	2	4,04-4,09	1,95-1,96	0,55	0,24	0,06-0,09	0,015	0,058-0,063	0,026-0,048	0,091-0,181		
Требования по ОСТ1 90048-90	1163		3,8-4,5	1,2-1,6	0,4-0,8	≤0,15	≤0,1	≤0,05	0,01-0,07	≤0,1	≤0,25		
	Д16ч.		3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	≤0,3	≤0,2	≤0,05	≤0,1	≤0,1	≤0,35		
	Д19ч.		3,8-4,3	1,7-2,3	0,4-0,9	≤0,3	≤0,2	0,0002-0,005 Be	≤0,1	≤0,1	≤0,35		

Сопоставление данных по количеству водорода в исходных слитках (табл. 1 и 2) и листах после окончательного отжига или закалки (табл. 4) позволяет сделать вывод о влиянии длительных технологических нагревов при деформации, отжиге и упрочняющей термической обработке листов на содержание в них водорода. Об этом свидетельствует более высокое содержание водорода в отожженных листах ($0,57\text{--}0,78\text{ см}^3$ на 100 г Me), которые находились более длительное время ($10\text{--}14\text{ ч}$) в процессе нагрева при температуре $350\text{--}420\text{ °C}$, выдержки и охлаждения по сравнению с закаленными листами ($0,40\text{--}0,62\text{ см}^3$ на 100 г Me), у которых время воздействия температуры $400\text{--}500\text{ °C}$ не превышает 1 ч , а также со слитками – содержание водорода $0,080\text{--}0,34\text{ см}^3$ на 100 г Me . Следует отметить, что материал листов подвергается длительным технологическим нагревам, предшествующим термической обработке, а также горячей прокатке и отжигу горячекатаных рулонов, однако продолжительность этих нагревов для закаленных и отожженных листов одинакова.

Таблица 4

Режимы термической обработки исследованных листов [14]

Сплав, состояние	Вид термообработки	Фактическое время нагрева, ч	Режим выдержки		Фактическое время охлаждения	Общее время нагревов при термообработке, ч
			Температура, °C	Продолжительность, ч		
1163-АТВ, Д16ч.-АТВ, 1163-РДТВ	Закалка	0,5	492–500	0,25	1,5 с	0,75
1163-АМВ, 1163-РДМВ, Д19ч.-АМВ	Отжиг	6–8	380–420	0,5	5,5–7,5 ч	6,5–8,5

Увеличение содержания водорода в листах в процессе нагревов, проводимых при их изготовлении и термической обработке, может быть связано с процессами диффузии и растворения в металле водорода, образующегося на поверхности листов при реакции алюминия с парами воды [11].

Металлографический анализ

Микрошлифы для исследований вырезали при помощи комплекса пробоподготовки для металлофизических исследований фирмы Struers с шириной реза $0,2\text{ мм}$, что позволило обеспечить необходимую локальность отбора образцов для исследования структуры в зоне пузырей.

Исследование проводили на микрошлифах как без травления, так и после воздействия реактива Келлера.

Типичный вид микроструктуры и дефектов в исследуемых листах из сплавов 1163-РДТВ (АМВ), Д19ч.-АМВ, Д16ч.-АТВ в зоне пузырей представлен на рис. 2 и 3. В структуре всех исследованных образцов отмечается наличие пористости как в плакирующем слое, так и в основе листов (рис. 2, *а–е*). Круглая форма пор свидетельствует об их формировании в процессе термической обработки листов (рис. 2, *г*). Поры, наследуемые из слитков при прокатке, сплющиваются и приобретают вытянутую форму (рис. 2, *д*). В отдельных образцах обнаружены дефектные участки некачественной сварки плакировки и основного металла (рис. 2, *ж, з*). Дефект плакировки в виде разрыва и трещины в плакировке в зоне деформированных при прокатке пузырей (изображенных на рис. 1, *ж*) приведен на рис. 2, *к*.

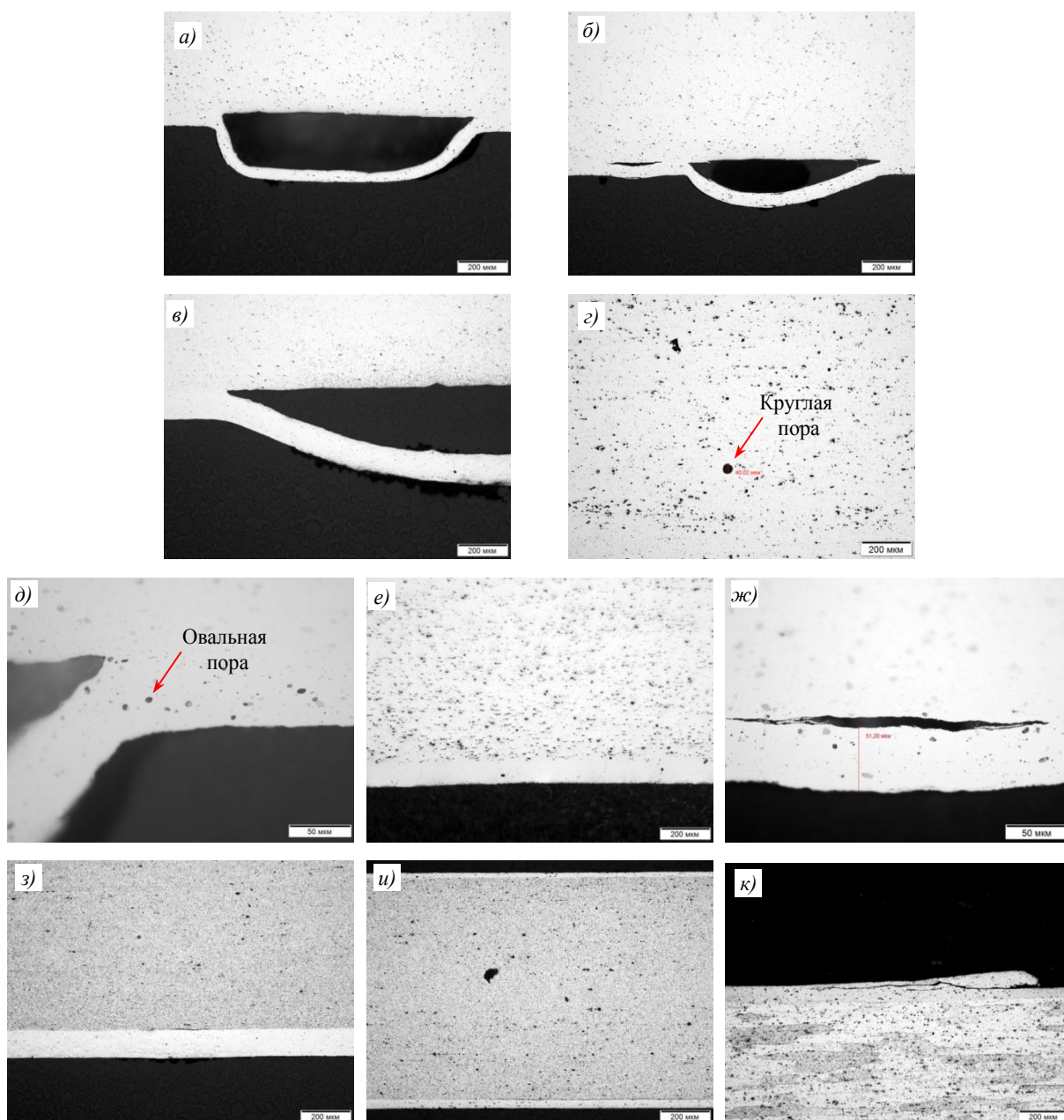


Рис. 2. Микроструктура типичных дефектов в поперечном сечении листов толщиной 2,5–4,0 мм из сплавов 1163 (а–д, з–к) и Д19ч. (е) (без травления): а–в – пузыри; г – поры в основе листа; д – поры в плакирующем слое; е – поры в основе и плакирующем слое; ж, з – непривар плакирующего слоя к основе листа; и – поры в основе листа и непривар плакирующего слоя; к – разрыв и трещина в плакировке (травление реактивом Келлера)

Отмеченное ранее различие по содержанию водорода в слитках (табл. 1 и 2) не привело к заметному влиянию на количество и размеры пузырей на поверхности закаленных или отожженных исследованных листов.

Для выявления зеренной структуры в листах, полученных в отожженном состоянии (М), заготовки для микрошлифов подвергали закалке. Все исследованные листы имеют зеренную структуру, типичную для листов из сплавов типа дюралюмин (рис. 3, а–г). Средний размер зерна в основе листов в плоскости прокатки не превышает 200 мкм, что соответствует требованиям ТУ1-801-006–2011 и ОСТ1 90070–92.

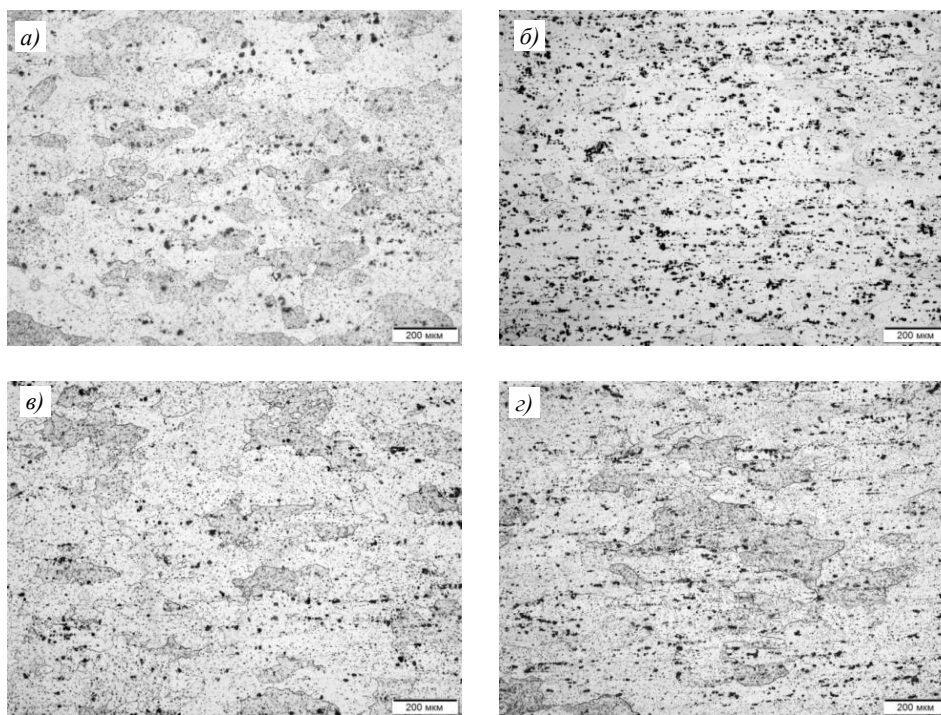


Рис. 3. Типичная микроструктура исследованных листов толщиной 1–4 мм из сплавов 1163-РДМВ (*а, в, з*) и Д19ч.-АМВ (*б*) в плоскости прокатки (травление реактивом Келлера)

Фрактографический анализ

Фрактографическому анализу подвергали поверхность листов в зонах с дефектами, а также поверхность изломов, искусственно полученных в этих зонах.

При разрезке через дефектную область с пузырями листов толщиной 4 мм из сплава 1163-РДМВ произошло частичное отделение плакирующего слоя от поверхности листа (рис. 4, *а, б*). Исследование показало, что внутренняя поверхность плакирующего слоя ровная, не содержит следов присутствия каких-либо включений (рис. 4, *в*). Под слоем плакировки на поверхности листа наблюдаются равномерно распределенные частицы размером 1,5–2 мкм. Рентгеноспектральным микроанализом установлено, что это частицы на основе меди, входящей в состав сплава (рис. 4, *з–е*). В трещине по плакирующему слою (выделенный фрагмент на рис. 4, *б*) также наблюдается ровная поверхность с равномерно распределенными частицами на основе меди (рис. 4, *ж, з*). На поверхности листа присутствуют углубления, предположительно образовавшиеся в результате деформирования в ходе прокатки имеющих в структуре материала несплошностей типа газовых пор (рис. 5). Скоплений каких-либо инородных включений (следов эмульсии, смазки и т. п.) под поверхностью пузырей не выявлено.

На поверхности листовых образцов толщиной 4 мм из сплава 1163-АМВ кроме пузырей наблюдаются трещины в плакирующем слое, показанные стрелками (рис. 6, *а, б*). В трещинах просматривается поверхность листа со следами пластической деформации (рис. 6, *в–е*). В спектрограммах, снятых с таких участков, наблюдаются только элементы, входящие в состав сплава, и пики О и С слабой интенсивности (рис. 6, *ж*). Встречаются также участки с равномерно распределенными частицами размером 1–2 мкм (рис. 6, *з, и*). В спектрограммах, снятых с этих частиц, присутствуют пики меди повышенной интенсивности (рис. 6, *к*), по-видимому, соответствующие вторичным частицам S-фазы, типичным для сплавов типа 1163, аналогично результатам, приведенным на рис. 4, *з, д*.

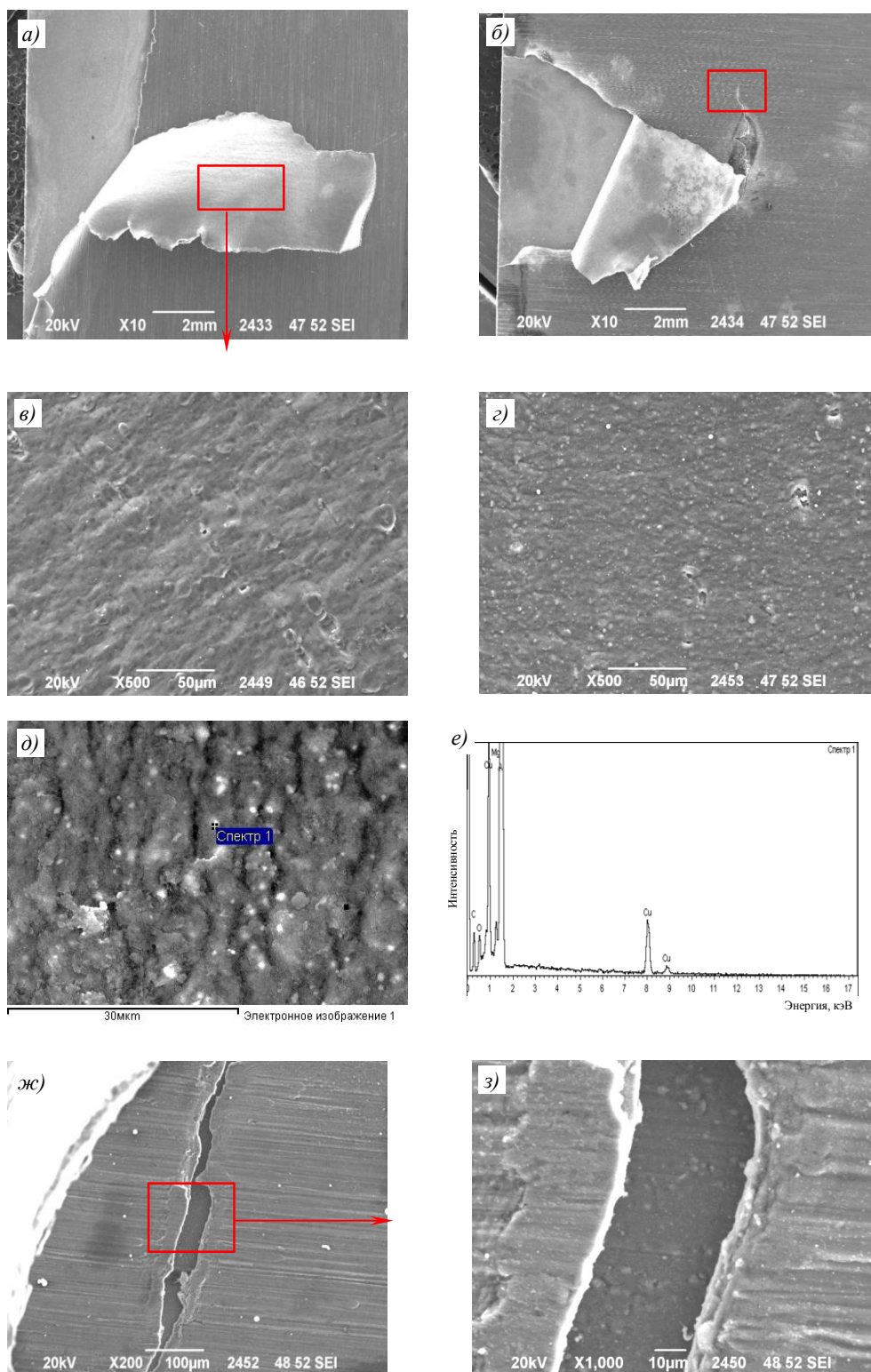


Рис. 4. Вид поверхности образца из листа толщиной 4 мм сплава 1163-РДМВ: *а, б* – отделение плакирующего слоя от поверхности листа; *в* – внутренняя поверхность плакирующего слоя; *г* – поверхность под плакирующим слоем; *д* – частицы на поверхности под плакирующим слоем; *е* – спектрограмма, снятая с частиц; *ж* – трещина в плакирующем слое (выделенный фрагмент); *з* – вид поверхности под плакирующим слоем

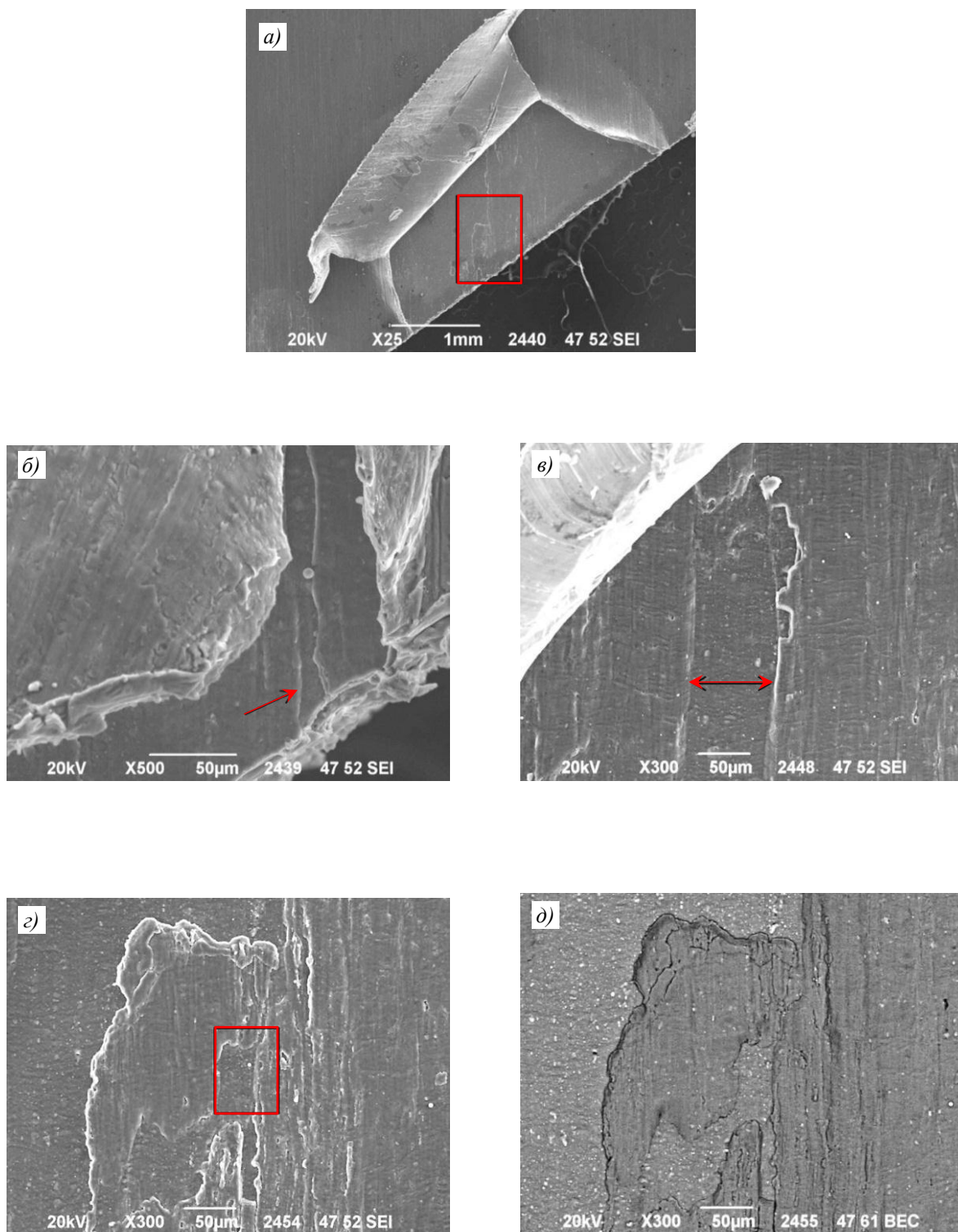


Рис. 5. Строение поверхности образца из листа толщиной 4 мм сплава 1163-РДТВ: *a* – вид пузыря с отделившимся плакирующим слоем; *б–в* – углубления на поверхности листа под плакирующим слоем; *д* – углубление в участке, выделенном на рис. 5, *a* (режим COMPO)

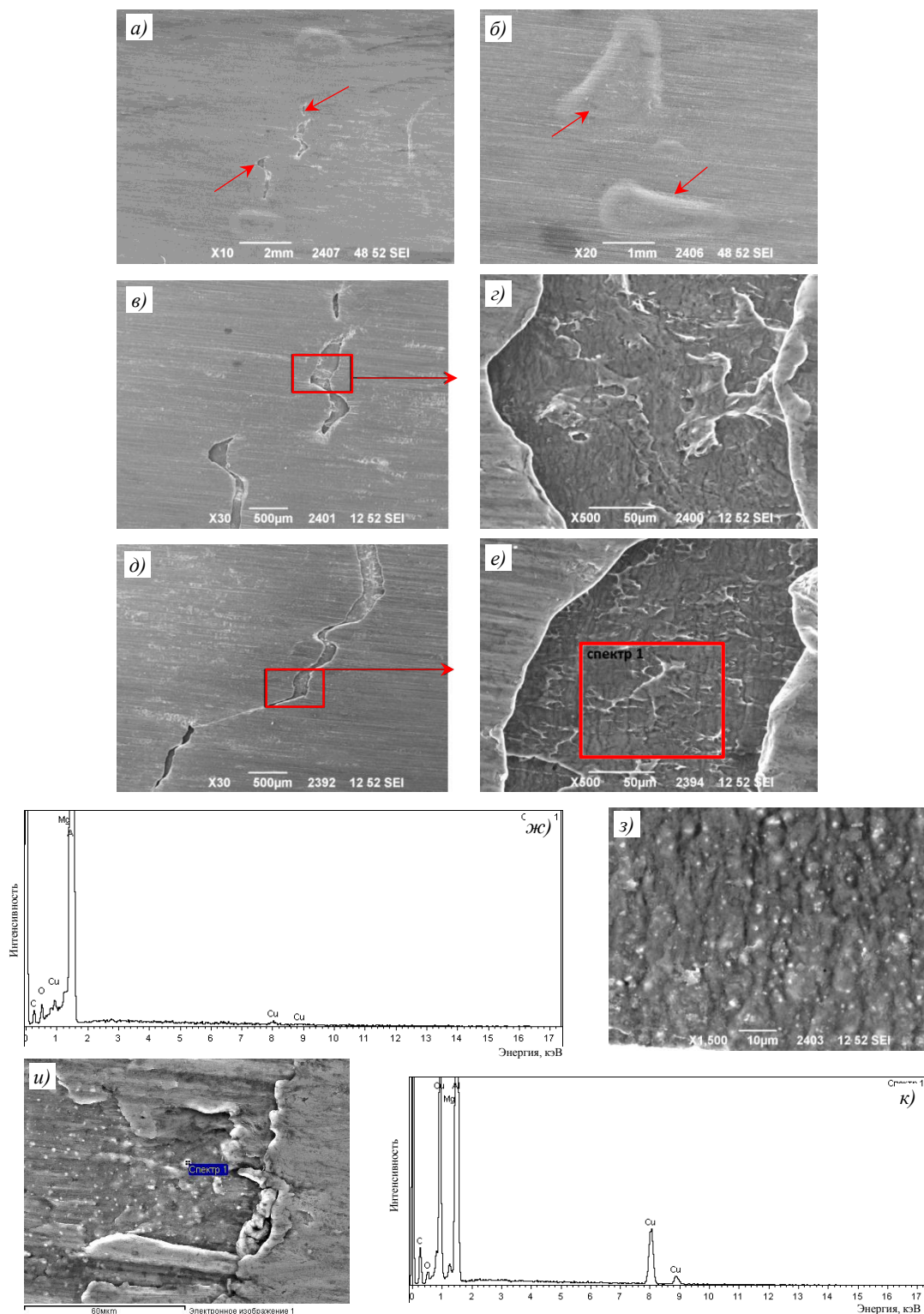


Рис. 6. Строение поверхности образца из листа толщиной 4 мм сплава 1163-АМВ: а, б – трещины и дефекты типа «пузырь» на поверхности (показаны стрелками); в–д – трещины и вид поверхности листа в трещинах; е – участок поверхности в трещине, с которого снята спектрограмма; ж – спектрограмма, снятая с выделенного участка; з, и – частицы под плакирующим слоем; к – спектрограмма, снятая с частицы на рис. 6, и

На листовых образцах из сплава 1163-РДТВ толщиной 3,5 мм (рис. 7) и толщиной 4 мм (рис. 8) и листа толщиной 4 мм из сплава Д16ч.-АТВ (рис. 9) через поверхностные дефекты в виде пузырей получены искусственные изломы [15, 16]. Общий вид изломов приведен на рис. 7, *а*; 8, *а, б* и 9, *а, б*. В области пузырей наблюдается отделение плакирующего слоя от поверхности листов. На поверхности листов под плакирующим слоем присутствуют следы деформации (в отличие от листов в состоянии М), скопления медьсодержащих частиц не наблюдается (рис. 7, *б*; 8, *в* и 9, *в*). На внутренней поверхности плакирующего слоя в образцах из сплава 1163-РДТВ (рис. 8, *з*, выделенный участок 2 на рис. 8, *б*), а также из сплава Д16ч.-АТВ (рис. 9, *з*, выделенный участок на рис. 9, *б*) наблюдаются углубления, по-видимому, образовавшиеся при деформации внутренних пор в ходе прокатки. Изломы имеют вязкое ямочное строение, типичное для алюминиевых сплавов (рис. 7, *в, г*; 8, *д, е* и 9, *д, е*). Помимо ямок в изломе присутствуют поры (рис. 7, *д, е*), характеризующиеся сглаженным рельефом (рис. 8, *ж, з*). В изломе также присутствуют участки со сглаженным рельефом, вторичные трещины и поры (рис. 9, *ж-и*).

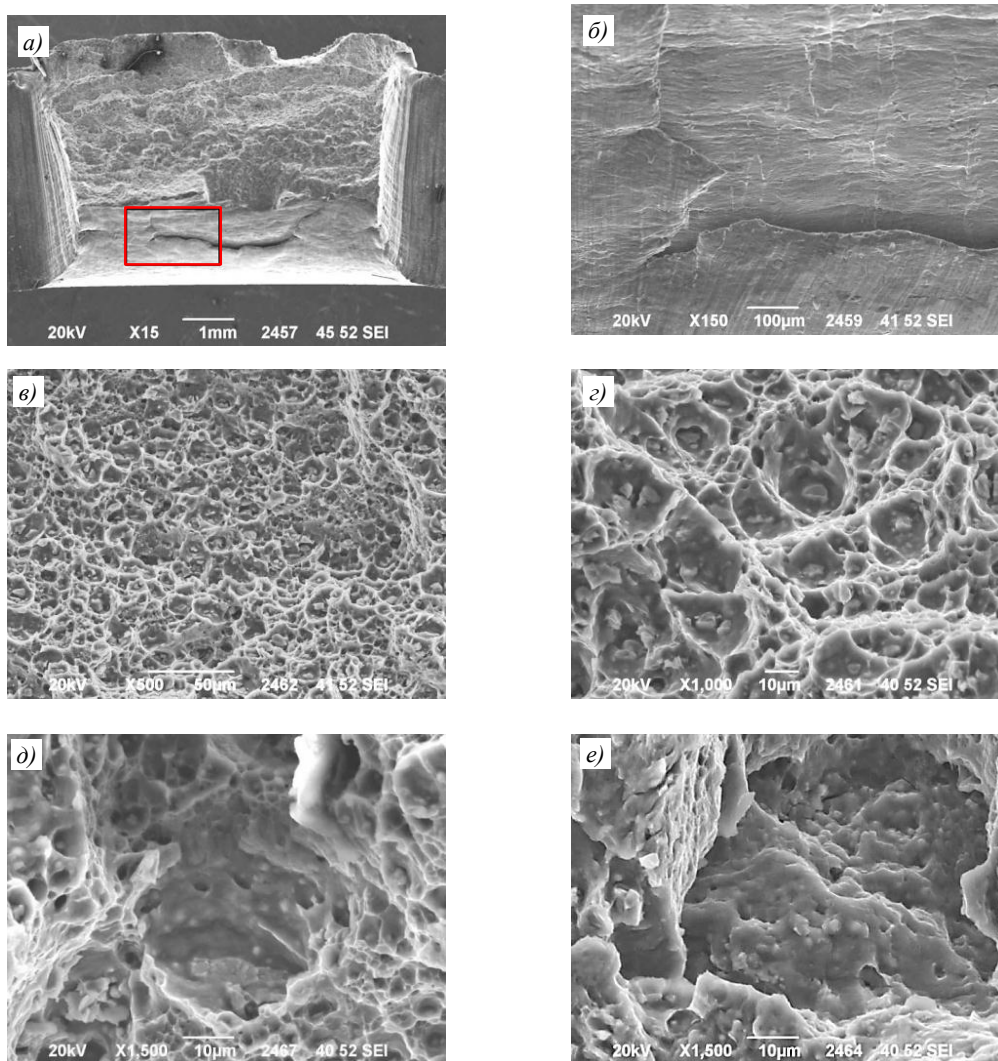


Рис. 7. Строение излома образца из листа толщиной 3,5 мм сплава 1163-РДТВ: *а* – общий вид излома с выделенным дефектом плакирующего слоя; *б* – отделение плакирующего слоя от поверхности листа (выделенный участок на рис. 7, *а*); *в, г* – вязкий ямочный рельеф; *д, е* – поры в изломе

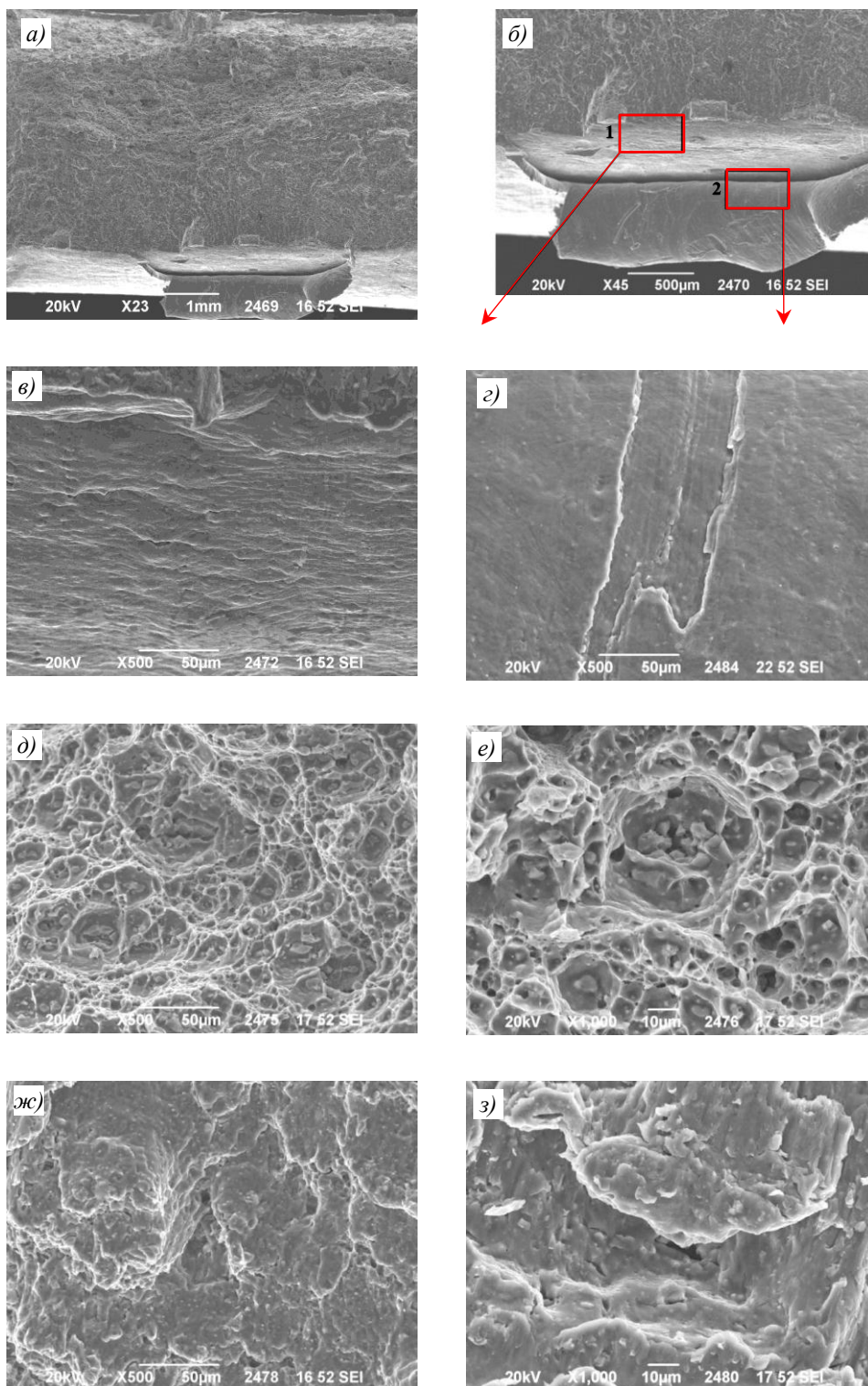


Рис. 8. Структура излома образца из листа толщиной 4 мм сплава 1163-РДТВ: а – общий вид излома с дефектом лакирующего слоя; б – область дефекта с выделенными зонами 1 и 2; в – поверхность листа в выделенной зоне 1; г – углубление в поверхности лакирующего слоя в выделенной зоне 2; д, е – вязкий ямочный рельеф; ж, з – участки излома со сглаженной поверхностью

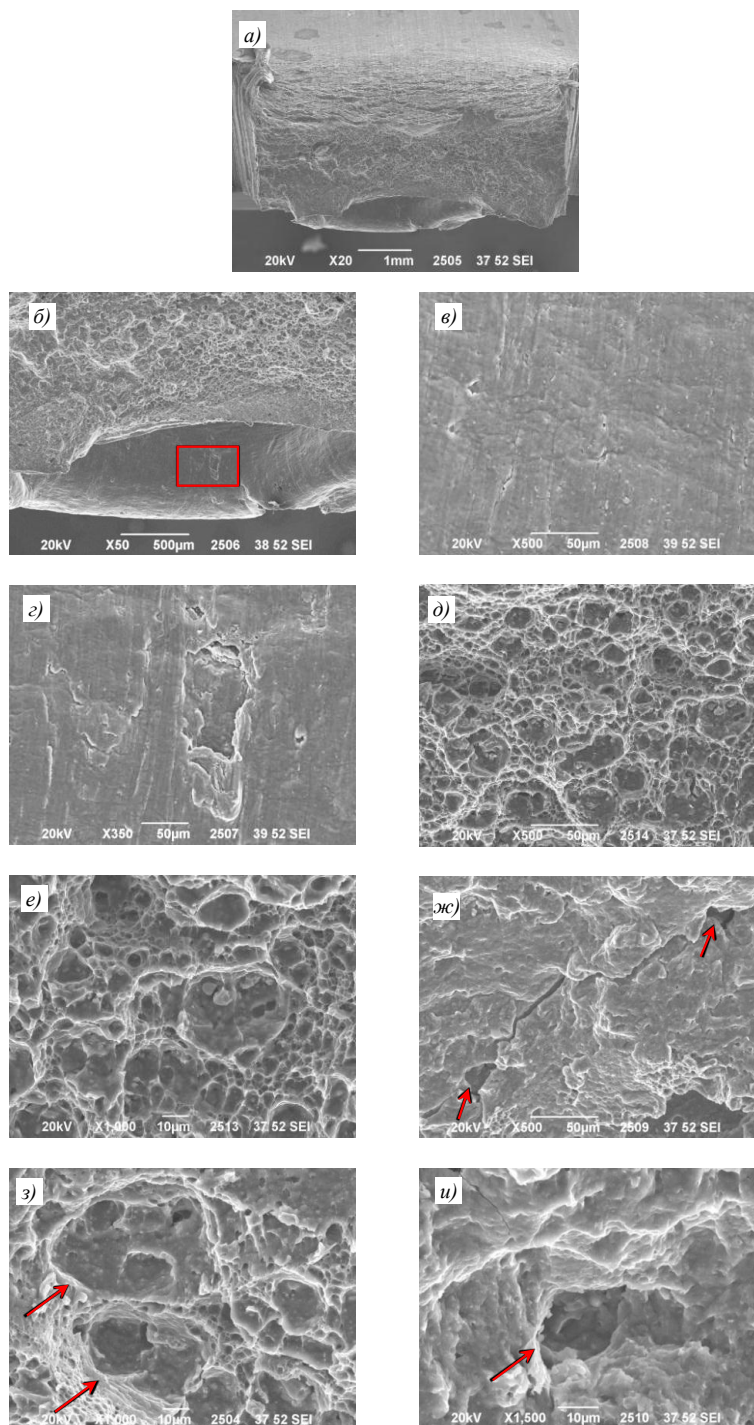


Рис. 9. Строение излома и поверхности образца из листа толщиной 4 мм сплава Д16ч.-АТВ: *a* – общий вид излома с дефектом плакирующего слоя; *б* – область дефекта с выделенным участком; *в* – внутренняя поверхность плакирующего слоя; *г* – углубление в поверхности плакирующего слоя в выделенном участке; *д, е* – вязкий ямочный рельеф; *ж* – участок излома со сглаженной поверхностью, поры (показаны стрелками), вторичная трещина; *з, и* – поры в изломе (показаны стрелками)

Механические свойства листов

Как видно из данных табл. 5, наличие поверхностных дефектов типа пузырей не привело к ухудшению прочностных свойств исследованных листов толщиной 2,5–4,0 мм из сплавов 1163-РДТВ и 1163-АТВ, однако прослеживается тенденция

к снижению характеристик пластичности листов с более высоким содержанием водорода, при этом по фактическим значениям механические свойства соответствуют требованиям ТУ1-801-006-2011 и ОСТ1 90070-92.

Таблица 5

Механические свойства листов толщиной 2,5–4,0 мм из сплава 1163

Состояние образца	Толщина листа, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	Содержание водорода, см ³ /100 г Ме
РДМВ	4,0	$\frac{80-90}{86}$	$\frac{190-195}{192}$	$\frac{24,0-24,0}{24,0}$	0,57–0,66
	3,0	$\frac{80-85}{83}$	$\frac{180-185}{183}$	$\frac{21,5-22,0}{22,0}$	0,72–0,78
РДТВ	3,5	$\frac{310-310}{310}$	$\frac{450-455}{455}$	$\frac{22,0-22,5}{22,0}$	0,40–0,52
	3,5	$\frac{320-325}{322}$	$\frac{460-465}{460}$	$\frac{23,5-24,0}{23,5}$	0,31–0,37
	2,5	$\frac{310-310}{310}$	$\frac{440-450}{455}$	$\frac{20,0-22,0}{21,0}$	0,40–0,45
АТВ	4,0	$\frac{310-310}{310}$	$\frac{450-455}{450}$	$\frac{20,5-23,0}{21,0}$	0,42–0,55
Требования по ТУ1-801-006-2011	1163-РДМВ	≤95	145–235	≥12,0	≤0,25
	1163-РДТВ	≥275	≥425	≥15,0	
Требования по ОСТ1 90070-92	1163-АТВ	≥275	≥425	≥11,0	

Обсуждение и заключения

На основании проведенного методами металлографического, фрактографического и газового анализов всестороннего исследования образцов из листов толщиной от 1 до 4 мм сплавов 1163-РДТВ (РДМВ), 1163-АМВ, Д16ч.-АТВ, Д19ч.-АМВ с дефектами структуры в виде пузырей на поверхности, а также результатов определения механических свойств при испытаниях на растяжение, можно сделать следующие заключения.

Все исследованные листовые образцы, независимо от сплава и типа плакировки, имеют аналогичные дефекты.

Наряду с дефектами типа пузырей установлены другие основные дефекты структуры листов из сплавов 1163-РДТВ (РДМВ), Д16ч.-АТВ, Д19ч.-АМВ:

- пористость с размером пор 10–40 мкм, как в основном металле, так и в плакировке исследованных листов;
- дефектные участки некачественной сварки плакировки и основного металла в отдельных образцах;
- трещины в плакирующем слое в зоне пузырей;
- углубления на поверхности листов, предположительно образовавшиеся в результате деформирования при прокатке имеющих в структуре материала несплошностей типа газовых пор.

В исходных слитках содержание водорода соответствует требованиям ОСТ1 90070-92 и составляет, см³ на 100 г металла:

- от 0,08 до 0,24 – в сплаве 1163-РДТВ (РДМВ);
- 0,34 – в сплаве Д16ч.-АТВ;
- 0,09–0,18 – в сплаве Д19ч.-АМВ.

В листовых образцах содержание водорода не соответствует требованиям ТУ1-801-006-2011 и ОСТ1 90070-92 и составляет от 0,31 до 0,78 см³ на 100 г металла, т. е. в 1,5–3 раза больше, чем в слитках.

Анализ формы пор в листах и данных по содержанию водорода в слитках и листах, определенному при газовом анализе, свидетельствует как о наличии пор

в исходных слитках (поры вытянуты в направлении деформации), так и об образовании пор из дефектов структуры при прокатке или отжиге на металлургическом заводе (равноосные поры, непривар плакировки к основе листа).

Механические свойства и средний размер зерна в основном металле исследованных листовых образцов соответствуют требованиям ТУ1-801-006–2011 и ОСТ1 90070–92, однако при увеличении содержания водорода в листах отмечается тенденция к снижению их относительного удлинения.

Наиболее вероятной причиной появления пузырей в исследованных листах служит наличие внутренних поверхностей раздела в виде пор в основном металле листов и плакировке, а также дефектных участков некачественной сварки плакировки и основного металла листа, в которые выделяется водород из твердого раствора и водород, образующийся на поверхности листа при реакции алюминия с парами влаги в процессе прокатки или отжига.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.
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. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
4. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
5. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // Технология легких сплавов. 2002. № 4. С. 1212–1217.
6. Дуюнова В.А., Нечайкина Т.А., Оглодков М.С., Яковлев А.Л., Леонов А.А. Перспективные разработки в области легких материалов для современной авиакосмической техники // Технология легких сплавов. 2018. № 4. С. 28–43.
7. Селиванов А.А., Ткаченко Е.А., Попова О.И., Бабанов В.В. Высокопрочный алюминиевый деформируемый свариваемый сплав В-1963 для деталей силового набора изделий современной авиационной техники // Труды ВИАМ. 2017. № 2 (50). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-1-1.
8. Кишкина С.И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1981. 280 с.
9. Атлас структур слитков и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов / под ред. В.И. Добаткина, В.И. Елагина, Л.М. Хитрова. М.: Металлургия, 1971. 152 с.
10. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов / под ред. В.И. Елагина, В.А. Ливанова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984. 408 с.
11. Добаткин В.И., Габидуллин Р.М., Колачев Б.А., Макаров Г.С. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
12. Давыдов Д.М., Титов В.И., Летов А.Ф., Луценко А.Н. Сравнительная оценка методов определения содержания водорода в металлических материалах // Труды ВИАМ. 2019. № 11 (83). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-75-84.
13. Цукров С.Л. Развитие технологии закалки полуфабрикатов из алюминиевых сплавов // Перспективные технологии легких и специальных сплавов. М.: Физматлит, 2006. С. 323–338.
14. Колобнев Н.И., Бер Л.Б., Цукров С.Л. Термическая обработка деформируемых алюминиевых сплавов / под науч. ред. Е.Н. Каблова. М.: АПРАЛ, 2020. 552 с.
15. Григоренко В.Б., Морозова Л.В. Применение фрактографического анализа для определения причин разрушения изделий из среднеуглеродистых сталей // Труды ВИАМ. 2018. № 8 (68). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-98-111.
16. Жегина И.П., Проходцева Л.В., Шванова Н.Ф. Фрактографический метод оценки качества материала // Авиационные материалы и технологии. 2001. № 1. С. 42–61.

References

1. Kablov E.N. The main directions of development of materials for aerospace technology of the XXI century. *Perspektivnye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
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. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.
4. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
5. Fridlyander I.N. Aluminum alloys in aircraft in the periods 1970–2000 and 2001–2015. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2002, no. 4, pp. 1212–1217.
6. Duyunova V.A., Nechaikina T.A., Oglodkov M.S., Yakovlev A.L., Leonov A.A. Perspective developments in the field of light materials for modern aerospace technology. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2018, no. 4, pp. 28–43.
7. Selivanov A.A., Tkachenko E.A., Popova O.I., Babanov V.V. High-strength wrought aluminum weldable V-1963 alloy for details of primary structure of modern aviation engineering. *Trudy VIAM*, 2017, no. 2 (50), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 29, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-1-1.
8. Kishkina S.I. *Fracture resistance of aluminum alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1981, 280 p.
9. *Atlas of structures of ingots and semi-finished products from aluminum alloys*. Ed. V.I. Dobatkin, V.I. Elagin, L.M. Khitrov. Moscow: Metallurgiya, 1971, 152 p.
10. *Aluminum alloys. Structure and properties of semi-finished products from aluminum alloys*. Ed. V.I. Elagin, V.A. Livanov. 2nd ed., rev. and add. Moscow: Metallurgiya, 1984, 408 p.
11. Dobatkin V.I., Gabidullin R.M., Kolachev B.A., Makarov G.S. *Gases and oxides in wrought aluminum alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 264 p.
12. Davydov D.M., Titov V.I., Letov A.F., Lutsenko A.N. Comparative evaluation of methods for determining the content of hydrogen in metal materials. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 29, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-75-84.
13. Tsukrov S.L. Development of technology for hardening semi-finished products from aluminum alloys. *Perspektivnyye tekhnologii legkikh i spetsialnykh splavov*. Moscow: Fizmatlit, 2006, pp. 323–338.
14. Kolobnev N.I., Ber L.B., Tsukrov S.L. *Thermal treatment of deformable aluminum alloys*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: APRAL, 2020, 552 p.
15. Grigorenko V.B., Morozova L.V. The usage of fractographic analysis to diagnostic the causes of destruction of products from medium-carbon steel. *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 29, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-98-111.
16. Zhegina I.P., Prokhodtseva L.V., Shvanova N.F. Fractographic method for assessing the quality of the material. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2001, no. 1, pp. 42–61.

Информация об авторах

Селиванов Андрей Аркадьевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ткаченко Евгения Анатольевна, старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бабанов Виталий Викторович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Асташкин Александр Игоревич, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Andrey A. Selivanov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeniya A. Tkachenko, Senior Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vitaly V. Babanov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander I. Astashkin, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.01.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 26.01.2022.
The article was submitted 21.01.2022; approved and accepted for publication after reviewing 26.01.2022.