

УДК 621.792.053

*Н.Ф. Лукина<sup>1</sup>, А.П. Петрова<sup>1</sup>, А.Ю. Исаев<sup>1</sup>, О.И. Смирнов<sup>1</sup>***КЛЕЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ В СОСТАВЕ ПКМ  
НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ\***

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-31-38

*Рассмотрено применение различных клеев и клеевых связующих в составе органо-пластиков, а также клеев для приклеивания элементов конструкций из органо-пластиков в составе изделий. Приведены примеры использования пленочного клея ВК-3 в составе органо-пластиков ВКО-20 и ВКО-2ТБ, клея ВК-36РТ в составе органо-пластиков ВКО-19 и ВКО-19Л, а также клеевого связующего ВСК-14-2м в составе органо-пластика ВКО-24. Представлены результаты применения клея ВК-41М в составе алюмооргано-пластика Алор Д16/41 и использования этого материала в конструкции самолета Ан-124.*

**Ключевые слова:** клеи, клеевое связующее, органо-пластик, защитный экран, арамидные волокна, демпфирующие характеристики.

*N.Ph. Lukina<sup>1</sup>, A.P. Petrova<sup>1</sup>, A.Yu. Isaev<sup>1</sup>, O.I. Smirnov<sup>1</sup>***ADHESIVES AS PART OF PCM BASED ON ORGANIC FILLERS**

*The use of various adhesives and adhesive binders in the composition of organoplastics is shown, as well as the use of adhesives for gluing structural elements made of organoplastics in the composition of products. Examples of the use of VK-3 film adhesive as part of VKO-20 and VKO-2TB organoplastics, VK-36RT adhesive as part of VKO-19, VKO-19L organoplastics, VSK-14-2m adhesive binder as part of VKO-24 organoplastics are given. The results of the use of VK-41M adhesive in the composition of the Alor D16/41 aluminum organoplastic and the use of this material in the An-124 aircraft are presented.*

**Keywords:** adhesives, adhesive binder, organoplastic, protective screen, aramid fibers, damping characteristics.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Органо-пластики относят к полимерным композиционным материалам (ПКМ), в которых полимерное связующее армировано органическими волокнами. Органо-пластики впервые привлекли внимание материаловедов в качестве отличных диэлектриков для радиопрозрачных и радиопоглощающих конструкций [1]. Совершенствование свойств органо-пластиков позволило разработать конструкционные и баллистические материалы, которые нашли применение в вертолетостроении, конструкции корпуса вентиляторов авиационных двигателей [2–4]. Первые органо-пластики получали при использовании в их составе связующих в форме раствора в органических растворителях. В основном это были материалы на основе эпоксидных олигомеров, в которых в качестве растворителя использовали смесь этилового спирта с ацетоном. Однако применение таких связующих не позволяет получить тонкие обшивки (0,4–0,5 мм) высокого качества: обшивки получаются негерметичными из-за пористости, возникающей вследствие удаления из связующего остатков растворителя при проведении процесса формования [5].

\* Исследование проводилось под руководством кандидата технических наук Г.Ф. Железиной.

Для повышения баллистической стойкости органопластиков при их изготовлении вместо растворных связующих стали использовать пленочные клеи – феноло-каучуковый пленочный клей ВК-3, эпоксидный пленочный клей ВК-36, а также эпоксидное клеевое связующее ВСК-14-2м, не содержащие растворитель. При изготовлении слоистого гибридного металлополимерного композиционного материала Алор Д16/41 применяют эпоксидный пленочный клей ВК-41М [6, 7].

Использование в качестве связующих клеев, не содержащих в своем составе органических растворителей, позволяет обеспечить экологическую безопасность производства, повысить технологичность процесса изготовления изделий различной формы и кривизны.

Свойства используемых клеящих материалов в качестве связующих в составе органопластиков приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Прочностные характеристики клеевых соединений, выполненных с применением клеящих материалов, используемых в составе органопластиков (склеиваемый материал – алюминиевый сплав Д16-АТ Ан.Окс.хром)**

Клеящий материал	Нормативно-техническая документация	Режим отверждения	Предел прочности при сдвиге, МПа (не менее), при температуре испытания, °С			Форма поставки
			20	80	150	
ВСК-14-2м	ТУ 1-595-14-1034-2009	175±5 °С, 3 ч	19,6	–	17,6	Однородная пластичная масса
ВК-3	ТУ 6-17-663-84	165±5 °С, 1 ч	15,0	10,0	–	Пленка
ВК-36РТ	ТУ 1-596-389-96	175±5 °С, 3 ч	33,0	33,0	25,0	
ВК-41М	ТУ 1-596-389-96	125±5 °С, 3 ч	31,0	27,0	–	

Цель работы – разработка органопластиков авиационного назначения с применением в качестве связующих клеящих материалов

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.1. «Многофункциональные клеящие системы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [8–10].

**Материалы и методы**

В качестве объектов исследования использованы широко применяемый пленочный клей ВК-3, пленочный клей ВК-36РТ, клеевое связующее ВСК-14-2м и пленочный клей ВК-41М.

Исследования проводили с использованием стандартных методов испытаний: прочность клеевых соединений при сдвиге – в соответствии с ГОСТ 14759–91; прочность клеевых соединений при равномерном отрыве – в соответствии с ГОСТ 14760–85.

**Результаты и обсуждение**

Полимерные композиционные материалы на основе арамидной ткани (органопластики) относятся к ударостойким и баллистически стойким материалам, имеющим широкий спектр применения. В составе органопластиков в качестве связующего используют пленочный клей ВК-3 [10, 11].

Толщина пленок клея ВК-3 составляет от 0,08 до 0,15 мм. Они выпускаются серийно в соответствии с ТУ 6-17-663–84 на специализированном предприятии, оснащенном необходимым оборудованием [6]. Использование пленочного клея ВК-3 в органопластике в качестве связующего, вместо растворных связующих, позволяет склеивать арамидную ткань без пропитки и благодаря этому сохранить ее свойства. Клей

располагается преимущественно между слоями армирующей ткани и обеспечивает ее структурную подвижность и деформативность при баллистическом воздействии. В результате органопластики, полученные с использованием пленочного клея ВК-3, являются ударо- и баллистически стойкими [12–14]. С применением данного клея в качестве связующего в сочетании с тканью Руслан разработаны органопластики ВКО-2ТБ и ВКО-20. Свойства указанных органопластиков приведены в табл. 2 [11].

Таблица 2

Свойства органопластиков ВКО-2ТБ и ВКО-20 [11]

Свойства	Значения свойств органопластиков	
	ВКО-2ТБ	ВКО-20
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1020–1120	1060
Прочность при растяжении, МПа	670	676
Модуль упругости при растяжении, ГПа	3,6	8,1
Прочность при сжатии, МПа	–	39
Прочность при изгибе, МПа	60	41
Горючесть	Трудногорающий	Самозатухающий (при толщине 5 мм)
Стойкость к баллистическому воздействию пули калибра 44 Magnum (при массе пули 15,6 г и скорости 436 м/с)	Отсутствие сквозных повреждений (при массе 1 м <sup>2</sup> органопластика 5,5 кг)	
Коррозионная безопасность	Может применяться в контакте с алюминиевыми, титановыми сплавами и сталями	

Органопластики ВКО-2ТБ и ВКО-20 обеспечивают баллистическую стойкость элементов авиационных конструкций в соответствии с требованиями п. 25.795 Авиационных правил АП-25 (при массе 1 м<sup>2</sup> органопластика 5,5 кг). Материалы являются пожаро- и коррозионнобезопасными, устойчивыми к воздействию микроорганизмов, сохраняют работоспособность при длительном воздействии повышенной влажности и перепадов температур. По физико-механическим свойствам они могут быть использованы для изготовления средне- и слабонагруженных конструкций или в качестве защитных покрытий элементов конструкций.

Детали из органопластиков изготавливают способами прессового или автоклавного формования. В качестве полуфабриката используют препреги органопластиков.

Органопластики ВКО-2ТБ и ВКО-20 рекомендованы для изготовления ударо- и баллистически стойких конструкций (корпус вентилятора двигателя, двери и перегородки кабины экипажа и другие защитные устройства), работающих в интервале температур от –60 до +70 °С, в том числе при температуре +70 °С в течение не менее 2000 ч. Органопластик ВКО-2ТБ применяют в конструкции самолета Sukhoi Superjet 100 для изготовления перегородки кабины экипажа [15–17]. Таким образом, применение пленочного клея ВК-3 в качестве связующего вместо типовых растворных связующих позволяет увеличить стойкость конструктивных органопластиков к ударным и баллистическим воздействиям.

Пленочный эпоксидный клей ВК-36РТ использовали в качестве связующего в составе органопластиков марок Органит 11ТЛ (армирующий наполнитель – ткань из арамидных волокон СВМ), ВКО-19 и ВКО-19Л (армирующий наполнитель – ткань саржевого плетения Руслан). Благодаря использованию в качестве связующего пленочного клея ВК-36РТ и применению отработанной технологии изготовления материала происходит формирование полимерной матрицы с минимальной пористостью, обеспечивается герметичность и устойчивость элементов конструкции из такого материала к воздействию тепла и влаги.

Органопластики Органит 11ТЛ и ВКО-19Л предназначены для изготовления тонкослойных обшивок для трехслойных сотовых панелей внешнего контура вертолетов и самолетов и рассчитаны на длительную эксплуатацию при воздействии температур от  $-60$  до  $+80$  °С. В настоящее время Органит 11ТЛ применяют в обшивках хвостовых секций несущего винта вертолетов Ми-28Н и Ми-38 (табл. 3) [18–20].

Таблица 3

**Свойства органопластиков на основе пленочного клея ВК-36РТ**

Свойства	Значения свойств органопластиков		
	Органит 11ТЛ	ВКО-19Л	ВКО-19
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,37–1,39	1,34	1,35
Водопоглощение за 24 ч, %	0,76	0,10	0,10
Прочность при растяжении при температуре 20 °С, МПа	670–680	750–760	820
Модуль упругости при растяжении при температуре 20 °С, ГПа	30,5	32	33,9
Прочность при изгибе при температуре 20 °С, МПа	510–520	510	505

Органопластик ВКО-19Л с рабочим диапазоном температур от  $-60$  до  $+80$  °С имеет назначение, аналогичное органопластику Органит 11ТЛ, и рекомендуется в качестве его замены в связи с тем, что обладает лучшими показателями свойств по прочности, герметичности и устойчивости к поглощению влаги.

Использование пленочного клея ВК-36РТ в качестве связующего позволяет снизить воздухопроницаемость органопластиков до нулевого значения при толщине обшивки до  $0,44 \pm 0,04$  мм. В табл. 4 приведены сравнительные данные по воздухопроницаемости тонких листовых обшивок для органопластиков, изготовленных с применением как растворных связующих, так и клея ВК-36РТ.

Таблица 4

**Воздухопроницаемость тонколистовых обшивок (толщина  $0,44 \pm 0,04$  мм) из органопластиков на основе связующих различных типов**

Органопластик	Тип и марка связующего	Толщина листа, мм	Длительность испытания, ч	Воздухопроницаемость, л/(ч·м <sup>2</sup> )
Органит 7Т	Растворное эпоксифенольное 5-211-БН	0,45	120	130
Органит 16Т-Рус	Растворное эпоксидное ВС-2526к	0,48	240	145
Органит 18Т-Рус	Растворное эпоксидное ЭНФБ-2М	0,44	160	150
Органит 11ТЛ	Пленочный клей ВК-36РТ	0,44	360	12
ВКО-19	–	–	–	0
ВКО-19Л	–	–	–	0

Органопластики ВКО-19 и ВКО-19Л содержат в своем составе армирующий наполнитель Руслан и пленочный клей ВК-36РТ в качестве связующего и характеризуются высоким уровнем сохранения прочности после воздействия климатических факторов.

Органопластик ВКО-19 рекомендуется для изготовления средне- и слабонагруженных элементов конструкций (обшивки сотовых панелей, монолитных деталей), эксплуатируемых при температурах от  $-60$  до  $+80$  °С. Изготовление деталей с применением органопластика ВКО-19 осуществляют с помощью полуфабриката (препрега) по выкладочной технологии. Герметичный органотекстолит ВКО-19Л применяют для изготовления воздуховодов самолета Ил-96-300ПУ.

Таким образом, использование пленочного клея ВК-36РТ в качестве связующего вместо растворных связующих позволяет повысить герметичность материала, исключить воздухопроницаемость тонких обшивок, а также повысить устойчивость к воздействию тепла и влаги. Разработанные органопластики ВКО-19 и ВКО-19Л отличаются высокими эксплуатационной надежностью и ресурсом при изготовлении ответственных конструкционных элементов вертолетов.

На основе пленочного клея ВК-36РТ, использованного в качестве связующего, проведено опробование нового наполнителя – арамидного волокна Русар-НТ (разработчик – АО НПП «Термотекс») в составе органопластика авиационного назначения [13].

Показана возможность получения материалов на основе пленочного клея ВК-36РТ и арамидного наполнителя Русар-НТ с повышенной стойкостью в условиях высокой влажности, при воздействии жестких климатических условий.

В составе экспериментальных органопластиков использованы эпоксидные клеевые связующие ВСК-14-2м и ВСК-14-3 в сочетании с наполнителем из материала Русар-НТ. Клеевые связующие не содержат в своем составе растворитель и используются для получения препрегов, применяемых при изготовлении деталей и агрегатов из ПКМ слоистой и сотовой конструкции [21]. Свойства клеевых связующих представлены в табл. 5 [20].

Таблица 5

Свойства клеевых связующих

Связующее	Предел прочности при сдвиге, МПа (не менее), при температуре испытания, °С			Диапазон рабочих температур, °С
	20	120	150	
ВСК-14-3	14,7	–	14,7	От $-60$ до $+150$
ВСК-14-2м	20,0	20,0	–	От $-60$ до $+120$

С применением связующих ВСК-14-3 и ВСК-14-2м получены экспериментальные органопластики, армированные двумя типами наполнителей Русар-НТ: экспериментальной тканью атласного переплетения из нити Русар-НТ линейной плотности 14,3 текс; жгутом Русар-НТ линейной плотности 600 текс. Изготовлены органотекстолит состава ВСК-14-3/ткань Русар-НТ и однонаправленный органопластик состава ВСК-14-2м/жгут Русар-НТ.

В работе [17] показано, что арамидное волокно Русар-НТ не оказывает отрицательного влияния на процесс отверждения полимерных связующих ВСК-14-2м и ВСК-14-3 (табл. 6). Температуры отверждения связующего в исходном состоянии и в составе препрега совпадают, тепловой эффект реакции отверждения связующего соответствует тепловому эффекту отверждения связующего в препреге (при пересчете на 100 % связующего) [11].

Свойства однонаправленного органопластика на основе наполнителя жгута Русар-НТ и связующего ВСК-14-2м [18, 19]:

Свойства	Значения свойств
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,3–1,4
Водопоглощение за 90 сут, %	1,0–1,5
Прочность при растяжении при температуре 20 °С, МПа	1300–1900
Модуль упругости при растяжении при температуре 20 °С, ГПа	50–100
Сохранение прочности при температуре 80 °С, %	>90

Таблица 6

**Параметры отверждения клеевых связующих и препрегов на их основе**

Свойства	Значения свойств материалов			
	связующее ВСК-14-2м	препрег состава ВСК-14-2м/ткань Русар-НТ	связующее ВСК-14-3	препрег состава ВСК-14-3/ткань Русар-НТ
Температура начала реакции отверждения, °С	177	178	189	189
Температура максимума реакции отверждения, °С	184	184	195	197
Тепловой эффект реакции отверждения, Дж/г	491	387	513	315
Тепловой эффект реакции отверждения связующего в препреге с учетом доли связующего, Дж/г	491	496	513	508

Органопластики (органотекстолиты и однонаправленные) более устойчивы к поглощению влаги, чем аналогичные органотекстолиты на основе серийной ткани Руслан. Например, водопоглощение образцов, армированных тканью из нити Русар-НТ, составляет 1,76 % (выдержка в воде в течение 90 сут), что в ~2 раза меньше, чем водопоглощение органопластиков аналогичного состава, но армированных тканью из нитей Руслан.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что клеевые связующие расплавного типа ВСК-14-2м и ВСК-14-3 могут использоваться для изготовления конструкционных однонаправленных органопластиков и органотекстолитов, армированных арамидным наполнителем нового поколения Русар-НТ, обладающих высокими физико-механическими свойствами и эксплуатационной надежностью в условиях повышенных температуры и влажности. Использование в составе препрега клеевого связующего позволит также обеспечить экологическую безопасность производства, повысить технологичность и удобство применения препрега при изготовлении из него изделий различной формы и кривизны для получения ответственных силовых элементов, намоточных изделий, а также сократить процесс сборки клеевых высоконагруженных сотовых или слоистых конструкций до одной стадии.

Клей ВК-41М нашел применение при разработке слоистого гибридного алюмополимерного композиционного материала Алор Д16/41. В его состав входят чередующиеся листы из алюминиевого сплава Д16ч.-АТ, промежуточные слои из ткани из органических волокон СВМ, пленочный клей ВК-41М (который соединяет эти материалы). Выбор пленочного клея ВК-41М обусловлен тем, что он имеет температуру отверждения 130 °С, поскольку при более высоких температурах происходит снижение прочности алюминиевых сплавов. Алюмоорганопластик Алор Д16/41 применен в конструкции самолета Ан-124, благодаря чему удалось увеличить ресурс отсеков крыла в 8 раз [2, 20, 21].

### Заключения

Рассмотрены органопластики на основе пленочных клеев ВК-3, ВК-36РТ (серийные органопластики) и клеевых связующих ВСК-14-2м и ВСК-14-3 (перспективные органопластики).

Показано, что для изготовления конструкционных и баллистически стойких органопластиков применение пленочных клеев и расплавных клеевых связующих, как с технологической точки зрения, так и с точки зрения повышения уровня их свойств, является наиболее предпочтительным.

Показана возможность получения органотекстолитов и органопластиков нового поколения на основе клеевого пленочного связующего и арамидного наполнителя Русар-НТ, характеризующихся высокими физико-механическими свойствами и повышенной среди арамидных органопластиков стойкостью в условиях повышенной температуры и влажности.

Показана возможность получения алюмоорганопластиков на основе алюминиевых листов Д16ч.-АТ с промежуточными слоями из ткани на основе органических волокон СВМ и пленочного клея ВК-41М, применение которых в конструкции самолета Ан-124 позволило увеличить ресурс отсеков крыла в 8 раз.

### Библиографический список

1. Машинская Г.П. Органопластики – итоги и проблемы // Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков. М.: ВИАМ, 1994. С. 219–228.
2. Машинская Г.П., Перов Б.В., Шалин Р.Е. Органопластики многоцелевого назначения для авиационной техники // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбил. науч.-техн. сб. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2002. С. 247–270.
3. Железина Г.Ф. Особенности разрушения органопластиков при ударных воздействиях // Авиационные материалы и технологии: юбил. науч.-техн. сб. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. С. 272–277.
4. Гуняев Г.М., Железина Г.Ф., Зеленина И.В. и др. Корпоративные нано- и CALS-технологии в наукоемких отраслях промышленности // Труды 4-й Междунар. конф. «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов» (ТПКММ). М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2005. С. 739–743.
5. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 2. С. 38–42.
6. Петрова А.П., Донской А.А., Чалых А.Е., Щербина А.А. Клеящие материалы. Герметики. СПб.: Проффессионал, 2008. 589 с.
7. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
8. 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.
9. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. № 4. С. 28–29.
10. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
11. Кулагина Г.С., Железина Г.Ф. Конструкционные и баллистически стойкие органопластики на основе пленочных клеев // Сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания клеев, клеевых связующих и клеевых препрегов» (Москва, 24 мая 2018 г.). М.: ВИАМ, 2018. С. 31–42.
12. Железина Г.Ф., Шульдешова П.М. Конструкционные органопластики на основе пленочных клеев // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 2. С. 9–14.

13. Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Шульдешова П.М., Черных Т.Е. Органопластики на основе термостойких полимерных волокон и матриц // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-78-86.
14. Железина Г.Ф., Тихонов И.В., Черных Т.Е. и др. Арамидные волокна третьего поколения Русар-НТ для армирования органотекстолитов авиационного назначения // Пластические массы. 2019. № 3–4. С. 43–47.
15. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
16. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С. Арамидные органотекстолиты для ударостойких авиационных конструкций // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. Вып. 3. С. 358–364. DOI: 10.1134/S0044461819030101.
17. Шульдешова П.М., Деев И.С., Железина Г.Ф. Особенности разрушения арамидных волокон СМВ и конструкционных органопластиков на их основе // Труды ВИАМ. 2016. № 2 (38). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-11-11.
18. Железняк В.Г., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Исследование возможности создания термоактивного связующего на рабочую температуру до 400 °С // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 58–61.
19. Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 368–378. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-368-378.
20. Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Шульдешова П.М. Органопластики авиационного назначения, свойства и применения // Сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы нового поколения для гражданских отраслей промышленности» (Москва, 23 окт. 2020 г.). М.: ВИАМ, 2020. С. 55–62.
21. Антипов В.В., Котова Е.В., Серебренникова Н.Ю., Петрова А.П. Клеевые связующие и клеевые препреги для алюмополимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2018. № 5 (65). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-44-54.