УДК 665.939.5

А.П. Петрова[1], Н.Ф. Лукина[1], А.Ю. Исаев[1]

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ЭПОКСИДНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ КЛЕЯХ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НАГРУЗОК И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-57-63

Рассмотрена работоспособность клеевых соединений, выполненных эпоксидными пленочными клеями ВК-31, ВК-41 и ВК-51, при одновременном воздействии условий теплого влажного климата побережья Черного моря и нагрузок 0,2–0,5 от исходной прочности клеевых соединений. Показано, что на уровень остаточной прочности после воздействия вышеуказанных условий влияет не только исходная прочность клеевых соединений, но и температура, при которой проходит отверждение клея. Клеевые соединения на всех трех клеях показали высокий уровень остаточной прочности после воздействия климатических условий теплого влажного климата побережья Черного моря и нагрузок.

Ключевые слова: *пленочный клей, эпоксидный клей, старение, климатическая стойкость, уровень нагружения, прочность клеевых соединений.*

A.P. Petrova[1], N.Ph. Lukina[1], A.Yu. Isaev[1]

OPERABILITY OF GLUED JOINTS ON EPOXY FILM ADHESIVES AT SIMULTANEOUS INFLUENCE OF LOADINGS AND CLIMATIC FACTORS

Reviewed the performance of adhesive joints made of epoxy film adhesives VK-31, VK-41 and MC-51, while the impact of conditions of warm humid climate of Black sea coast and loads of 0.2–0.5 of the original strength of the adhesive joints. It is shown that the level of remaining strength after exposure to the above conditions affects not only the initial strength of the adhesive joints, but also the temperature at which the curing of the adhesive. Adhesive bonding for all three adhesives showed a high level of retained strength after exposure to climatic conditions of warm moist climate of Black sea coast and loads.

Keywords: *tape adhesive, epoxy adhesive, ageing, environmental resistance, the level of loading, the strength of adhesive joints.*

[1]Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Пленочные клеи нашли широкое применение во всех изделиях авиационной техники и в изделиях других отраслей благодаря упрощению технологии их применения (отпадает необходимость в изготовлении клеев, упрощается технология их нанесения) и гарантированному получению стабильных характеристик клеевых соединений. Особое место среди пленочных клеев занимают эпоксидные высокопрочные пленочные клеи, поскольку они позволяют получить высокую прочность клеевых соединений, не требуют применения жидкого подслоя под пленку и обеспечивают склеивание при

невысоком удельном давлении. При склеивании сотовых конструкций при температуре, создаваемой в процессе отверждения, они обладают свойством термоусадки и за счет этого способны образовывать галтели по торцам сотового заполнителя, тем самым увеличивая площадь склеивания и повышая прочность клеевых соединений. С учетом широкого применения пленочных клеев в авиакосмической технике важно знать работоспособность клеевых соединений, полученных с их применением, при одновременном воздействии нагрузок и климатических факторов. Для получения таких сведений проведены испытания клеевых соединений, выполненных с применением пленочных клеев ВК-31, ВК-41М и ВК-51, при одновременном воздействии теплого влажного климата и нагрузок при уровне нагружения от 0,2 до 0,5 от исходной прочности. Все три клея относятся к эпоксидным клеям, модифицированным низкомолекулярными каучуками, и различаются прочностными характеристиками и температурой отверждения.

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») [1–3].

Материалы и методы

Исследованы высокопрочные эпоксидные пленочные клеи марок ВК-31, ВК-41М и ВК-51. Свойства клеев по технической документации приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства эпоксидных пленочных клеев

Клей	Внешний вид	Срок хранения, мес	Режим склеивания			Температура испытания, °С	Предел прочности при сдвиге, МПа
			t, °С	τ, ч	*P*, МПа		
ВК-31 (ТУ1-596-398–96)	Неармированная пленка серого цвета	1 мес при 18–25°С, 3 мес при <5°С	175±5	1,5	0,05–0,1	20 80	29,4 24,5
ВК-41М (ТУ1-595-14-785–2004)	Пленка синего цвета	1 мес при 18–25°С, 2 мес при 5°С, 3 мес при <5°С	125±5	3	0,1–0,65	20 80	35 32,6
ВК-51 (ТУ1-596-389–96)	Пленка от светло- до темно-желтого цвета	6 мес при 20°С, 3 мес при 10°С	125±5	3	0,173	20 80	35,3 27,4

Для сохранения свойств анодной пленки, которая наносится на поверхность алюминиевых сплавов в качестве подготовки под склеивание, использована грунтовка ЭП-0234 (ТУ1-595-24-501–97). Грунтовка предназначена для обработки поверхности алюминиевых сплавов (анодированных в хромовой кислоте) перед склеиванием конструкционными клеями.

Грунтовку наносили на анодированную поверхность образцов не позднее 2 ч после анодирования. Расход грунтовки – не более 100 г/м^2, при этом ее толщина составляет 2–3 мкм. Свойства грунтовки: массовая доля нелетучих веществ 51–22%, степень перетира 25 мкм, цвет – желтый. Сушку грунтовки после нанесения на поверхность образцов проводили при температуре 125±5°С в течение 1ч.

Испытания клеевых соединений проводили с применением образцов для определения предела прочности при сдвиге (ГОСТ 14759–91 «Клеи. Метод определения прочности при сдвиге»).

Натурные климатические испытания проводили в соответствии с ГОСТ 9.906–83 и ГОСТ 9.708–83. Испытания проводили в зоне с теплым влажным климатом на климатической станции, отвечающей требованиям ГОСТ 9.906–83 «ЕСЗКС. Станции климатические испытательные. Общие требования». Экспозиция в этих климатических зонах

наиболее полно воспроизводит комплекс климатических воздействий предполагаемых условий эксплуатации (хранения). Натурные климатические испытания проводили в соответствии с ГОСТ 9.708–83 «ЕСЗКС. Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов». Экспозицию образцов клеевых соединений проводили как в условиях неотапливаемых складских помещений, так и на открытых стендах.

Результаты и обсуждение

В статье [4] представлены данные по климатической стойкости клеевых соединений, выполненных эпоксидными клеями, и показано, что высокопрочные пленочные клеи имеют высокую климатическую стойкость. Повышению климатической стойкости клеевых соединений способствует модификация эпоксидных олигомеров в составе клеевых композиций эластомерами, благодаря чему повышаются упруго-прочностные свойства клеев, исходная прочность клеевых соединений и их климатическая стойкость, при этом значения остаточной прочности при сдвиге после воздействия климатических условий почти в 2 раза превосходят аналогичные значения для фенолокаучукового клея ВК-32-200. К эпоксидным пленочным клеям, модифицированным эластомерами, относятся клеи ВК-31, ВК-41М и ВК-51. Назначение клеев приведено в табл. 2.

Таблица 2

Назначение клеев

Клей	Рекомендуемая область применения	Особые свойства
ВК-31	В сотовых конструкциях из алюминиевых сплавов с неперфорированным заполнителем и сотовых конструкциях из полимерных композиционных материалов (ПКМ) для склеивания обшивок с заполнителем	Водостойкий, высокопрочный пленочный клей (в последнее время заменяется клеями с более низкой температурой отверждения)
ВК-41М	Для склеивания металлов и неметаллических материалов в закрытых клеевых соединениях, а также сотовых конструкциях из алюминиевых сплавов с неперфорированным заполнителем и сотовых конструкциях из ПКМ для склеивания обшивок с заполнителем	Высокопрочный клей с пониженной температурой отверждения 125±5°С вместо 175±5°С для клея ВК-31
ВК-51	Для склеивания конструкций из металлов и ПКМ, в том числе сотовых конструкций из алюминиевых сплавов с неперфорированным заполнителем и сотовых конструкций из ПКМ для склеивания обшивок с заполнителем	Обладает высокими прочностными характеристиками в диапазоне рекомендуемых температур, высокими длительной прочностью и сопротивлением усталости. Содержание летучих веществ в пленке ≤2%, масса 1 м^2 составляет 265–325 г/м^2

В реальных условиях изделия с клеевыми соединениями испытывают воздействие не только климатических условий, но и нагрузок. В то же время известно, что при одновременном воздействии окружающей среды и механической нагрузки на клеевые соединения эти факторы не просто суммируются, а часто усиливают друг друга [5–7].

В связи с этим проведены испытания клеевых соединений алюминиевого сплава Д19-АТ, выполненных с применением эпоксидных пленочных клеев ВК-31, ВК-41М и ВК-51, после экспозиции в течение 5 лет в условиях теплого влажного климата побережья Черного моря в свободном и нагруженном состоянии. Испытания проведены как на открытой атмосферной площадке, так и в условиях неотапливаемого склада.

Далее представлены результаты испытаний по клеям ВК-31 (табл. 3), ВК-41М (табл. 4) и ВК-51 (табл. 5) [8, 9].

Таблица 3

Прочность при сдвиге $\tau_в$ клеевых соединений сплава Д19-АТ Ан.Окс.хром на клее ВК-31 после естественного старения в течение 5 лет в свободном и нагруженном состоянии в условиях теплого влажного климата побережья Черного моря

Условия выдержки	Уровень нагружения $\tau_в$*	$\tau_в$, МПа, после выдержки, год			
		в исходном состоянии	1	3	5
Открытая атмосферная площадка	Без нагружения	33,1	33,1	31,4	31,0
	0,2		31,4	30,0	29,6
	0,3		29,4	27,8	26,2
	0,4**		–	–	20,6
	0,5**		–	–	19,1
Неотапливаемый склад	Без нагружения		33,4	31,6	29,5
	0,2		31,6	29,8	29,4
	0,3		30,4	28,4	26,5

* Долговечность клеевых соединений ограничена разрушением металла в зажиме испытательной машины, прочность клеевого шва осталась нереализованной, испытания закончены после пяти лет с определением остаточной прочности по трем образцам каждого уровня.

** Образцы при нагружении $0{,}4\tau_в$ и $0{,}5\tau_в$ выдерживали до разрушения.

Результаты испытаний, приведенные в табл. 3, показывают, что клеевые соединения, изготовленные с применением клея ВК-31, имеют высокую климатическую стойкость: после воздействия климатических условий на открытой атмосферной площадке без нагрузки в течение 5 лет их прочность снизилась на ~6%.

При этом характеристики клеевых соединений, выдержанных в условиях неотапливаемого склада, находятся приблизительно на том же уровне, что и после выдержки на открытой атмосферной площадке [10].

Следует отметить, что при испытаниях клеевых соединений на открытой атмосферной площадке под нагрузкой 0,2 и 0,5 от исходной $\tau_в$ климатическая стойкость клеевых соединений не реализована, поскольку разрушение клеевых соединений имело место в зажиме испытательной машины по склеиваемому металлу. Это подтверждает нецелесообразность применения для склеивания алюминиевых сплавов клеев с температурой отверждения 175°С, поскольку воздействие этой температуры приводит к появлению межкристаллитной коррозии в алюминиевых сплавах, несмотря на продолжительность отверждения 1,5 ч.

Таблица 4

Механические свойства клеевых соединений сплава Д16-АТ Ан.Окс.хром на клее ВК-41М после естественного старения в течение 3 лет в свободном и нагруженном состоянии в условиях теплого влажного климата побережья Черного моря

Условия выдержки	Уровень нагружения $\tau_в$	$\tau_в$, МПа, после выдержки, год			
		в исходном состоянии	1	2	3
Открытая атмосферная площадка	Без нагружения	31,4	30,4	27,2	25,1
	0,2		27,9	25,9	–
	0,3		25,8	24,5	–
	0,5*		Долговечность составила 8 760 ч (1 год)		
Неотапливаемый склад	Без нагружения		–	28,2	26,7
Навес	0,2		–	26,2	–
	0,3		–	25,4	–

* Образцы при нагружении $0{,}5\tau_в$ выдерживали до разрушения.

Клеевые соединения, выполненные с применением клея ВК-41М, отверждение которого проводят при температуре 125°С в течение 3 ч, в исходном состоянии имеют прочность на ~4,5% ниже, чем клеевые соединения на клее ВК-31 (табл. 4). После воздействия климатических условий открытой атмосферной площадки без нагрузки в течение 3 лет их прочность снизилась на ~20% по сравнению с 4,5% для клея ВК-31. Еще более ощутимое снижение прочности имеет место при одновременном воздействии нагрузок и климатических факторов: при уровне нагружения 0,2 от исходной прочности $\tau_в$ снижение составляет через 2 года – на 17%, а через 3 года – на 19%. В условиях неотапливаемого склада снижение прочности клеевых соединений меньше, чем на открытой атмосферной площадке. Более низкую атмосферостойкость клеевых соединений, выполненных клеем ВК-41М, по сравнению с клеевыми соединениями на клее ВК-31, вероятно, можно объяснить пониженной температурой отверждения [11–14].

Таблица 5

Прочность при сдвиге $\tau_в$ клеевых соединений сплава Д16-АТ Ан.Окс.хром с грунтом ЭП-0234 и без грунта на клее ВК-51 после натурных климатических испытаний в условиях теплого влажного климата в свободном и нагруженном состоянии

Условия выдержки	Продолжительность выдержки, год	Наличие грунта	Уровень нагружения $\tau_в$	$\tau_в$, МПа, при температуре испытания, °С	
				20	80
В исходном состоянии		Без грунта	Без нагружения	36,5	28,0
			0,2	35,5	27,5
		ЭП-0234	0,2	35,5	33,0
Открытая площадка	1	Без грунта	Без нагружения	32,6	24,0
			0,2	28,0	21,0
		ЭП-0234	0,2	32,0	26,5
	2	Без грунта	0,2	27,5	19,0
		ЭП-0234	0,2	29,0	25,5
	3	Без грунта	Без нагружения	32,0	20,5
Неотапливаемый склад	1	Без грунта	Без нагружения	31,0	22,5
	3	Без грунта	Без нагружения	33,0	21,5

Клей ВК-51 является наиболее прочным из трех рассматриваемых эпоксидных пленочных клеев, при этом для него рекомендован режим отверждения, аналогичный режиму отверждения клея ВК-41М. Результаты исследований климатической стойкости клеевых соединений, выполненных с применением клея ВК-51, приведены в табл. 5. Из этих данных следует, что после выдержки клеевых соединений на открытой климатической площадке в течение 3 лет снижение прочности клеевых соединений при комнатной температуре составило 12% и 28% – при температуре 80°С. При испытаниях клеевых соединений под нагрузкой 0,2 от исходной прочности $\tau_в$ снижение прочности еще более значительное и составляет 24,6% при температуре 20°С и 32% – при 80°С.

При склеивании высокопрочными эпоксидными клеями алюминиевых сплавов поверхность последних анодируют, а с целью увеличения разрыва между анодированием и склеиванием на анодную пленку наносят адгезионный грунт ЭП-0234. Адгезионные грунты выполняют в клеевом соединении ряд функций:

– защищают подготовленные под склеивание поверхности при промежуточной обработке, транспортировке и хранении деталей; увеличивают промежуток времени между операциями подготовки поверхности и склеивания и тем самым увеличивают количество деталей, проходящих одновременную подготовку поверхности;

– улучшают смачиваемость клеем склеиваемой поверхности за счет наличия в грунте специальных компонентов;

– ингибируют коррозию на поверхности вследствие наличия в их составе ингибиторов хроматного типа;

– закрывают поры в покрытии после анодирования (Ан.Окс.хром), что препятствует проникновению влаги по торцам клеевого шва.

Состав грунта подбирают таким образом, чтобы адгезия клея к нему была не меньше, чем к активной (непосредственно после анодирования) поверхности.

Адгезионный грунт ЭП-0234 предназначается для обработки поверхности алюминиевых сплавов, анодированных в хромовой кислоте (Ан.Окс.хром), которые затем склеивают эпоксидными высокопрочными пленочными клеями, и позволяет обеспечить разрыв между операциями анодирования и склеивания до 30 сут.

Грунт ЭП-0234 готовят разбавлением полуфабриката (грунтовки ЭП-0234) смесью растворителей в соотношении 30:30:40 мас. ч – ацетон+этилцеллозольв+ксилол. Грунтовку ЭП-0234, представляющую собой 51–55%-ный раствор смол, отвердителя и наполнителей в вышеуказанной смеси растворителей, доводят на месте потребления до концентрации 3±1% при применении клея ВК-27 и 11±1% – остальных клеев. Полученный грунт можно хранить в течение 5 сут при температуре 20±2°С и влажности не более 75%. Гарантийный срок хранения грунтовки ЭП-0234 составляет 4 мес.

Грунт наносят окунанием, кистью или пульверизатором в один слой с расходом ~(70–100) г/м^2 не позднее чем через 2 ч после анодного оксидирования. Сушку проводят при температуре 125±5°С в течение 1 ч после выдержки деталей с нанесенным грунтом на воздухе не менее 20 мин. При выполнении такой операции получают слой грунта толщиной ~5 мкм. Детали с грунтом, прошедшим сушку, хранят с защитой, исключающей их загрязнение. Грунт не снижает прочности клеевых соединений и позволяет увеличить временно́й промежуток между анодированием и склеиванием с 3 до 30 сут.

Исследовано влияние наличия грунта на склеиваемой поверхности на климатическую стойкость клеевых соединений в условиях теплого влажного климата. Приведенные в табл. 4 результаты испытаний показывают, что нанесение грунта ЭП-0234 под клей ВК-51 способствует сохранению прочности при комнатной температуре в исходном состоянии, повышению прочностных характеристик при температуре испытания 80°С, а также сохранению более высоких прочностных характеристик при одновременном воздействии климатических условий и нагрузок [15–23].

Заключения

Приведенные в статье результаты экспериментальных данных показывают, что клей ВК-51 среди высокопрочных пленочных клеев аналогичного назначения обеспечивает самую высокую работоспособность клеевых соединений при одновременном воздействии нагрузок и климатических факторов в климатической зоне с теплым влажным климатом. Применение адгезионного грунта ЭП-0234 для предварительного нанесения на поверхность при склеивании высокопрочными пленочными клеями обеспечивает увеличение промежутка времени между анодированием поверхности алюминиевого сплава и склеиванием до 30 сут и улучшение климатической стойкости клеевых соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
4. Сорокин А.Е., Бейдер Э.Я., Перфилова Д.Н. Влияние климатических факторов на свойства углепластика на полифениленсульфидном связующем // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №1. Ст. 10. URL: http://viam-works.ru (дата обращения: 12.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-10-10.

5. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохраняемости свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.
6. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Шарова И.А. Оценка прочности клеевых соединений, выполненных эпоксидными клеями, при воздействии различных факторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №8. С. 28–34.
7. Сорокин А.Е., Бейдер Э.Я., Изотова Т.Ф., Николаев Е.В., Шведкова А.К. Исследование свойств углепластика на полифениленсульфидном связующем после ускоренных и натурных климатических испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3 (42). С. 66–72. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-66-72.
8. Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И. Динамические механические свойства эпоксидных клеевых композиций, наполненных молотым карбонатом кальция // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. №2. С. 35–44.
9. Лукина Н.Ф., Петрова А.П., Мухаметов Р.Р., Когтёнков А.С. Новые разработки в области клеящих материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 452–459. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-452-459.
10. Дементьева Л.А., Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Применение и назначение эпоксидного пленочного клея ВК-31 // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. №1. С. 25–29.
11. Дементьева Л.А., Бочарова Л.И., Лукина Н.Ф., Петрова А.П. Высокопрочные пленочные клеи ВК-51 и ВК-51А // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. №4. С. 17–19.
12. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и теплостойкие клеи // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 328–335.
13. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Рубцова Е.В., Петрова А.П. Исследование эпоксидно-полисульфоновых полимерных систем как основы высокопрочных клеев авиационного назначения // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. №3. С. 7–12.
14. Шарова И.А. Эпоксидные клеи холодного отверждения для склеивания и ремонта деталей авиационной техники: автореф. дисс. … канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2015. 26 с.
15. Тюменева Т.Ю., Лукина Н.Ф. Разработки в области эластомерных клеев авиационного назначения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №8 (44). Ст. 9. URL: http://viam-works.ru (дата обращения: 12.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-9-9.
16. Сытов В.А., Верстаков А.Е., Воронин А.Е., Сытов В.В. Современные синтетические клеи на основе эпоксикаучуковых композиций // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №9. С. 6–9.
17. Сытов В.А., Сытов В.В., Веттегрень В.И. Температурная зависимость прочности клеевых соединений стали на основе эпоксикаучуковых клеев // Тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф. «Современные достижения в области клеев и герметиков. Материалы, сырье, технологии» (Дзержинск, 17–19 сент. 2013 г.). Дзержинск, 2013. С. 50–52.
18. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Аниховская Л.И. Клеящие материалы в конструкции лопастей вертолетов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7 (43). Ст. 07. URL: http://viam-works.ru (дата обращения: 12.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-7-7.
19. Коноплин А.Ю., Нелюб В.А. Прочность клеевых соединений, изготовленных при отрицательных значениях температур // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. №9. С. 20–23.
20. Ткачук А.И., Гуревич Я.М., Гусева М.А., Мишуров К.С. Технологические и эксплуатационные характеристики и области применения эпоксидного связующего ВСЭ-1212, перерабатываемого по препреговой технологии // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. №4. С. 29–34.
21. Нелюб В.А. Оценка адгезионной прочности методом pull-out в системе связующее–элементарная нить в зависимости от типа обработки нити // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. №3. С. 28–32.
22. Ткачук А.И., Терехов И.В., Кудрявцева А.Н., Григорьева К.Н. Использование реологических методов исследования при отверждении эпоксидных связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. №2. С. 15–20.
23. Цверава В.Г., Русин М.Ю., Неповинных В.И., Химицаев А.С. Анализ влияния ускоренного климатического старения на прочность клеевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. №8. С. 28–31.