

Научная статья

УДК 621.742.48

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-12-24

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТВЕРЖДЕННЫХ РАСПЛАВНЫХ КЛЕЕВЫХ ЭПОКСИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ МЕТОДАМИ СКЛЕРО- И МИКРОТВЕРДОМЕТРИИ

Р.К. Салахова¹, Е.А. Вешкин¹, А.В. Апалькова¹, Н.Д. Симирина¹

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

Аннотация. Представлены результаты измерений микротвердости в поперечном сечении образцов отвержденных связующих расплавно-го типа (составы I–VII), рассчитаны коэффициенты объемной анизотропии и изучена корреляционная зависимость между микротвердостью полимерной матрицы и силой сопротивления царапанию индентором. Проведен сравнительный анализ изменений микротвердости в высотном направлении образцов и склерограмм, полученных с помощью лабораторного скретч-тестера СТ-01. Для клеевого расплавно-го связующего пониженной горючести (состав VII) выбран оптимальный двухступенчатый режим отверждения и определена степень конверсии полимера.

Ключевые слова: клеевые расплавно-го связующие, обшивки заготовок панелей пола, микротвердость, склерометрия, сила сопротивления царапанию, степень отверждения, степень конверсии, коэффициент объемной анизотропии

Для цитирования: Салахова Р.К., Вешкин Е.А., Апалькова А.В., Симирина Н.Д. Исследование отвержденных расплавно-го клеевых эпоксидных связующих методами склеро- и микротвердометрии // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-12-24.

Scientific article

STUDY OF CURED HOT MELT ADHESIVE EPOXY BINDERS BY SCLERO- AND MICROHARDNESS METHODS

R.K. Salakhova¹, E.A. Veshkin¹, A.V. Apalkova¹, N.D. Simirgina¹

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 results of cross-sectional microhardness measurements grade binders (compositions I–VII) are presented. Volumetric anisotropy coefficients are calculated, and the correlation between polymer matrix microhardness and the indenter scratch resistance parameter is studied. A comparative analysis of microhardness changes in the height direction of the samples and sclerograms obtained using an ST-01 laboratory scratch tester is conducted. For the low-flammability hot melt adhesive binder (composition VII), the optimal two-stage curing mode is selected, and the degree of polymer conversion is determined.

Keywords: hot melt adhesives, floor panel sheetings, microhardness, sclerometry, scratch resistance force, degree of curing, degree of conversion, volumetric anisotropy coefficient

For citation: Salakhova R.K., Veshkin E.A., Apalkova A.V., Simirgina N.D. Study of cured hot melt adhesive epoxy binders by sclero- and microhardness methods. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-12-24.

Введение

В настоящее время главным материалом, удовлетворяющим комплексу требований по весовой эффективности, механической прочности и химической инертности, являются композиты на основе полимерных, металлических и керамических матриц, армированных современными углеродными, борными, органическими и стеклянными волокнами [1–3]. Сохраняется тенденция неуклонного увеличения доли полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных отраслях, в частности в авиационной промышленности, которая является основным потребителем данного класса материалов [4]. Совершенствование существующих технологий изготовления ПКМ и создание новых конкурентоспособных материалов напрямую связаны с современными вызовами, продиктованными политикой импортозамещения и выполнением национальных проектов РФ, направленных на развитие отечественного авиастроения. Очевидно, что успешная реализация национального проекта «Беспилотные авиационные системы» (2025–2030 гг.) невозможна без технологического лидерства в области создания полимерных материалов с новым уровнем свойств, так как доля ПКМ в конструкции беспилотных летательных аппаратов может достигать 90 % [5].

Свойства любого композита определяют входящие в его состав компоненты, при этом роль матрицы является фундаментальной. Понятие «матрица» (от лат. *matrix* – источник, начало) характеризует непрерывную пространственную фазу, ответственную за технологические и эксплуатационные характеристики ПКМ. К ключевым функциям матрицы относятся связывание и стабилизация, передача нагрузки, защита наполнителя от внешних воздействий, определение формы, обеспечение термо-, огне- и химической стойкости, влияние на поверхностные свойства и др. Таким образом, разработка полимерных матриц для ПКМ – сложная и важная задача, причем выбор правильной матрицы определяет область применения композита и конструкции из ПКМ в целом [6].

В данной работе в качестве объектов исследования рассматриваются терморезистивные клеящие связующие расплавленного типа на основе эпоксидных смол, модифицированные термопластами (полисульфон клеевой ПСК-1, полиарилсульфон клеевой ПСФФ-30) [7, 8]. Особый интерес представляет исследование многокомпонентного клеящего связующего пониженной горючести, представляющего собой композицию из смеси эпоксидных смол, отвердителей, эластомера (каучук), термопласта и антипирена. Введенные специальные добавки повышают ударную вязкость и термостойкость материала практически без снижения его прочностных характеристик [9]. Механизм упрочнения при введении термопластов можно объяснить фазовой сепарацией материала в процессе отверждения, т. е. возникновением двухфазной гетерогенной системы, где пластичные частицы термопласта, равномерно распределенные в эпоксидной матрице, деформируясь, «залечивают» трещины, в том числе магистральные, заставляя их ветвиться и превращаться в микротрещины [10].

Использование модифицированного клеящего связующего пониженной горючести, армированного углеродным и стекловолокном, позволяет получать монолитные конструкционные ПКМ с необходимой толщиной монослоя, а также высоконагруженные сотовые (слоистые) конструкции одинарной и сложной кривизны с реализацией высокоэффективной технологии интегрального формования трехслойных сотовых панелей, при которой одновременно (за одну технологическую операцию) происходят формование обшивки и ее приклеивание к сотовому наполнителю [11]. Примером такого рода конструкций являются панели пола салона и багажно-грузового отсека современных пассажирских самолетов. Повышенный уровень эксплуатационных свойств расплавленных связующих на основе эпоксидиановых смол связан с наличием кардовых групп в термопластичных добавках. Кардовые группы – это объемные боковые

циклические группы в повторяющемся звене макромолекул полисульфона, их количество определяет процесс термодинамического совмещения полиарилсульфона с эпоксидными смолами до полной гомогенизации смеси [12–14]. Экзотермический эффект реакции растворения полисульфонов в эпоксиановом олигомере достаточно подробно исследован методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) путем построения термокинетических кривых [15].

Конечные свойства ПКМ зависят от многих факторов, основным из которых является степень отверждения полимерной матрицы (степень конверсии). Подбор оптимальных температурно-временных и монометрических параметров отверждения позволит достигнуть максимально возможной степени конверсии. В настоящее время для определения полноты протекания реакции отверждения широко используется метод ДСК. Прибор измеряет тепловой эффект реакции в отвержденном образце и сравнивает его с теплотой реакции неотвержденного (исходного) связующего, рассчитывая степень конверсии по полученной модели [16, 17]. На практике для оценки степени полимеризации часто используют метод экстракции с помощью аппарата Сокслета [18]. Общий принцип данного способа: неотвержденную полимерную матрицу вымывают при контакте образцов с насыщенным растворителем, циклический процесс продолжается до тех пор, пока весь растворимый компонент не будет извлечен из исследуемого образца. К недостаткам метода относятся необходимость подбора оптимального растворителя и сложность оценки завершения процесса экстрагирования.

Большинство неразрушающих и разрушающих методик контроля степени конверсии, в том числе указанные, являются интегральными и не позволяют оценить характеристики в объеме полимера. В связи с этим предложена методика оценки полимерной матрицы в объеме ПКМ, основанная на измерении твердости и стойкости к царапанию полимеров, традиционно применяемом для оценки физико-механических свойств металлических функциональных покрытий [19, 20]. Полимерные цепи редко располагаются хаотично, как правило, они образуют надмолекулярную структуру, при которой упорядоченное расположение молекул (или их фрагментов) стабилизируется не ковалентными, а более слабыми молекулярными взаимодействиями. При этом наличие упорядоченных областей (кристаллиты и сферолиты) обеспечивает повышение уровня механических свойств ПКМ. Доказано, что в термопластах степень кристалличности и размер сферолитов наиболее высокие [21]. Можно предположить, что при различных температурах выдержки в отверждаемых модифицированных терморезистивных связующих формируется различная упаковка надмолекулярной структуры с преобладанием тех или иных кристаллических структур. Обоснованной представляется возможность исследования процесса упорядочения структур путем изменения величины микротвердости и анализа характера царапин полимерных материалов [22].

Исходя из изложенного, сформулированы цели данной работы:

- классифицировать отвержденные расплавные эпоксидные связующие по величине микротвердости;
- исследовать корреляционную зависимость микротвердости от силы сопротивления царапанию отвержденных эпоксидных связующих в поперечном сечении образцов;
- исследовать закономерность изменения микротвердости отвержденных связующих от степени конверсии полимера.

Для реализации поставленных целей выполнены оценка микротвердости и скретч-тестирование (склерометрия) отвержденных клеевых связующих в выбранной зоне исследования.

Материалы и методы

В качестве объектов исследований выбраны расплавные термореактивные клеевые связующие на основе эпоксидиановых смол с добавлением модифицирующих добавок: I – связующее с пластификатором (каучук низкомолекулярный СКН-30 КТРА); II, III – связующие, модифицированные термопластом (полисульфон клеевой ПСК-1); IV, V, VI – связующие, модифицированные термопластом (полиарилсульфон порошкообразный клеевой ПСФФ-30); VII – связующее пониженной горючести с пластификатором (каучук), термопластом (полисульфон ПСК-1) и антипиреном.

Связующие отверждали при выбранных режимах на специальной оснастке в сушильном шкафу СМ 50/250 1000 ШС.

Реакционную способность связующих исследовали методом ДСК по ГОСТ Р 56755–2015. Условия проведения испытаний: нагрев до температуры от 25 до 280 °С со скоростью 10 °С/мин; охлаждение до температуры 60 °С со скоростью 15 °С/мин; продувочный и защитный газ – азот, скорость подачи составила 200 мл/мин (степень очистки 99,999 %).

Режимы отверждения связующих выбраны на основе анализа ДСК-кривых реакционной способности связующих и изотерм вязкости, полученных на ротационном вискозиметре. Степень отверждения связующих контролировали путем проведения термического анализа неотвержденных (базовых) и отвержденных связующих.

Степень конверсии в связующем пониженной горючести рассчитана с использованием специальной программы калориметрических измерений путем исследования кинетики отверждения образцов связующего по результатам ДСК и построения моделей расчетных кривых на основе экспериментальных [23]. Программа позволяет прогнозировать изменение степени полимеризации связующего в зависимости от температурно-временных режимов отверждения. Кривые ДСК получены при трех скоростях нагрева (5, 10 и 20 °С/мин). Расчет модели проводили для одностадийной реакции полимеризации.

Микротвердость отвержденных связующих измеряли с помощью микротвердомера ПМТ-3М по методу Виккерса при нагрузках 10 и 20 г. Оценку микротвердости и царапание отвержденных смол проводили на поперечных шлифах посередине образца в направлении от поверхности, прилегающей к дну лунок (углублений) оснастки. Получено не менее 10 отпечатков алмазной пирамиды в направлении, указанном на рис. 1.

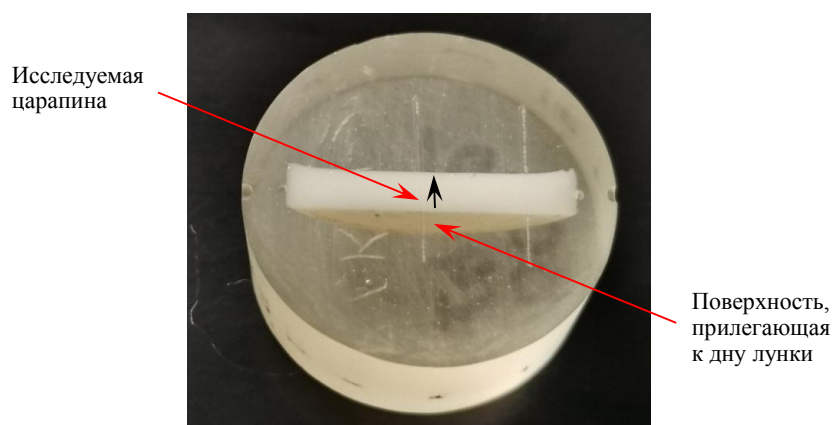


Рис. 1. Поперечный шлиф отвержденного связующего II

Предложена методика расчета коэффициента объемной анизотропии B , отражающего разницу в свойствах материала в различных точках образца, обусловленную неоднородностью структуры или другими факторами.

Коэффициент объемной анизотропии рассчитывали по формуле

$$B = (H_{\text{мс}} - H_{\text{мп}})/H_{\text{мс}},$$

где $H_{\text{мс}}$ – значение микротвердости в сердцевинной зоне образца, МПа; $H_{\text{мп}}$ – значение микротвердости в подповерхностной зоне образца, МПа.

Коэффициент объемной анизотропии является безразмерной величиной и свидетельствует о различиях в значениях микротвердости отвержденного связующего в высотном направлении. Как видно из формулы, этот параметр может принимать положительные, отрицательные или нулевые значения.

Скретч-тестирование образцов проводили с помощью лабораторного прибора СТ-01, принципиальная схема которого представлена на рис. 2.

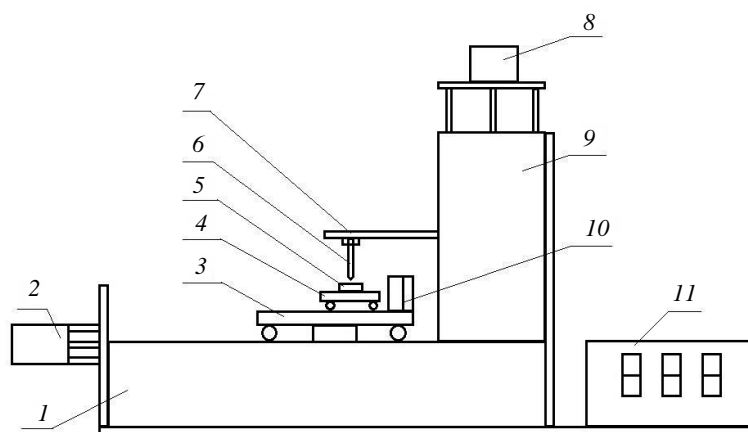


Рис. 2. Принципиальная схема скретч-тестера СТ-01: 1 – неподвижная платформа; 2 – двигатель привода подвижной платформы; 3 – подвижная платформа; 4 – тележка установки образца; 5 – образец; 6 – алмазный индентор; 7 – тензодатчик нагрузки индентора; 8 – двигатель нагрузки привода индентора; 9 – привод индентора; 10 – тензодатчик силы сопротивления; 11 – блок управления

В процессе царапания на дисплее пульта управления прибора и мониторе компьютера отображаются нагрузка на индентор и сила сопротивления царапанию. Индентор представляет собой алмазный конус, угол при вершине которого составляет 120 градусов, а радиус скругления вершины равен 0,2 мм. Технические характеристики скретч-тестера СТ-01: максимальная длина царапания 40 мм, скорость царапания 1 мм/с, максимальные габариты образца 50×45 мм, нагрузка индентора на образец 30 Н, скорость нагружения 1,63 Н/с.

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

Результаты и обсуждение

Для контроля микротвердости и оценки сопротивления царапанию (склерометрические измерения) полимерных матриц на основе расплавных связующих изготовлены образцы отвержденных связующих I–VII. Отверждение проводили в термопечи, в качестве оснастки использовали диск полимеризационной плитки, схема которого представлена на рис. 3. Получены образцы в виде таблеток высотой от 2 до 5 мм. Режимы отверждения связующих представлены в табл. 1. При этом связующее пониженной горючести отверждали по двухступенчатому режиму с временным варьированием 2-й ступени.

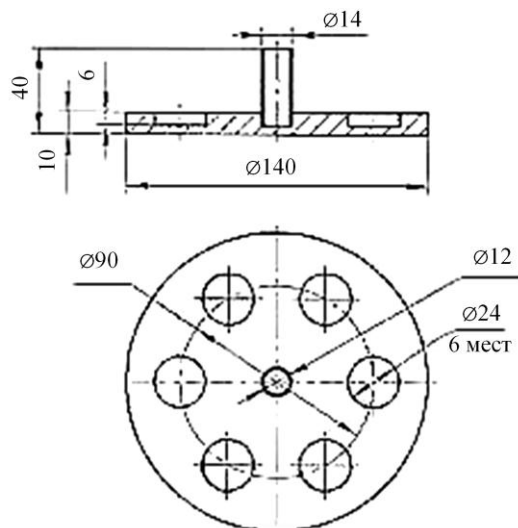


Рис. 3. Схема диска полимеризационной плитки

Таблица 1

Режимы отверждения связующих

Связующее	Температура отверждения, °С	Продолжительность отверждения, мин
I	120	90
II	155	
III	165	
IV	145	
V	150	
VI		
VII	90 (1-я ступень)	60
	140 (2-я ступень)	30, 60, 180

Степень полимеризации связующих контролировали путем проведения термического анализа с построением кривых реакционной способности неотвержденных и отвержденных связующих. На рис. 4 представлены ДСК-кривые полимеризации связующего VII, отвержденного при различных режимах второй ступени (кривые 1.1, 3.1, 4.1) в сравнении с неотвержденным связующим (кривая 2.1).

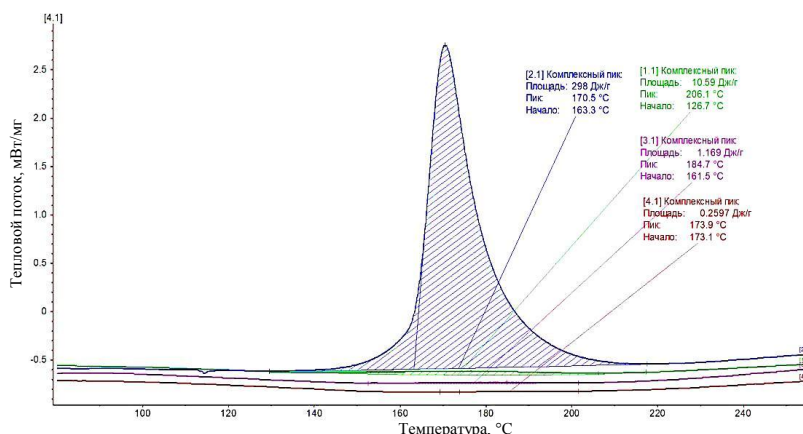


Рис. 4. Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии для образцов связующего VII, отвержденных по двухступенчатому режиму при продолжительности 2-й ступени 30 (1.1), 60 (3.1), 180 мин (4.1) и неотвержденного (2.1)

Анализ кривых показал, что выбранный двухступенчатый режим отверждения связующего VII обеспечивает практически полную степень отверждения, причем при увеличении продолжительности выдержки образцов на 2-й ступени (30, 60 и 180 мин) степень отверждения связующего повышается (96,45; 99,61 и 99,91 % соответственно).

Этот факт подтверждается также полученными моделями температурно-временных режимов отверждения и кривыми зависимости степени конверсии полимера от продолжительности изотермической выдержки, построенными на основе термокинетических расчетов ДСК-кривой (рис. 5 и 6). Сходимость результатов оценки степени отверждения связующего по реакционной способности и результатов исследования степени конверсии свидетельствует об адекватности выбранной модели отверждения полимерной матрицы VII.

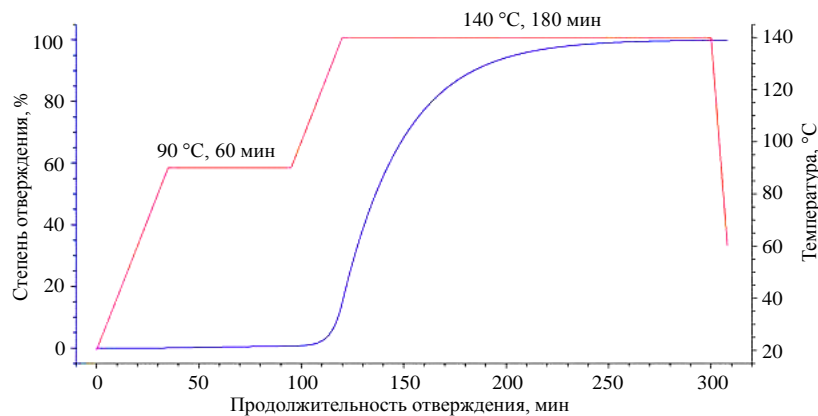


Рис. 5. Моделирование двухступенчатого режима отверждения связующего VII

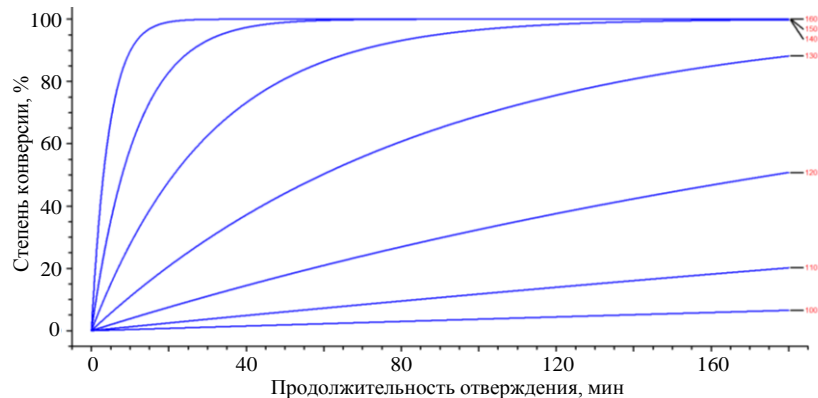


Рис. 6. Прогнозируемое изменение степени конверсии связующего VII при изотермических выдержках в диапазоне температур от 100 до 160 °С

На рис. 7 представлены графики изменения микротвердости отвержденных связующих по толщине образцов в высотном направлении.

Полученные результаты позволяют утверждать, что значения микротвердости для связующих I, II, III и VII практически не зависят от позиционирования измерений по толщине образца, а для связующего IV и вовсе не меняются в высотном направлении. Тогда как для связующих V и VI характерна нелинейная зависимость с небольшими точками максимума. При этом следует отметить, что максимальное значение микротвердости зафиксировано для полимерной матрицы VI (345,3 МПа), минимальное – для связующего пониженной горючести VII (178,7 МПа).

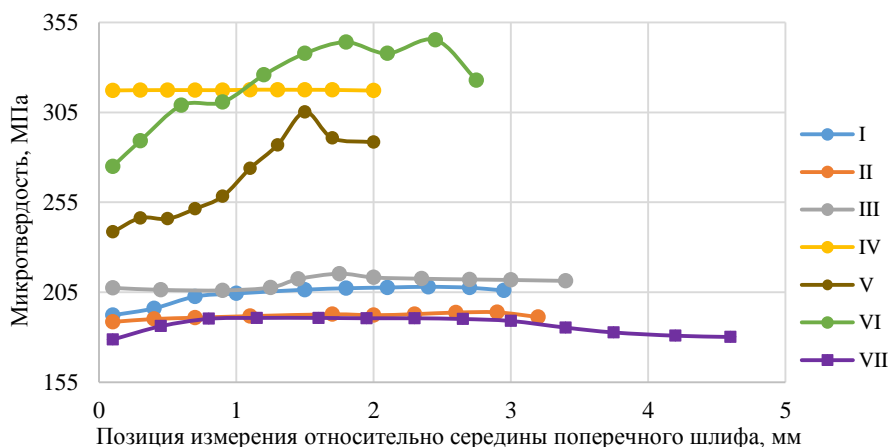


Рис. 7. Исследование микротвердости отвержденных клеевых связующих I–VII

Склерограммы отвержденных связующих получены на лабораторном скретч-тестере СТ-01, нагрузка индентора на образец составила 30 Н, фиксировали силу сопротивления царапанию.

Проведенный сравнительный анализ данных склеро- и микротвердометрии показал корреляцию полученных результатов для всех указанных связующих при обратной зависимости силы сопротивления царапанию от микротвердости. Очевидно, что чем больше микротвердость материала, тем он легче царапается и, соответственно, меньше сила сопротивления царапанию, что наглядно продемонстрировано на рис. 8 и 9 на примере связующих V и VII. Кривые зависимости на рис. 8 и 9, а, б являются практически зеркальным отражением друг друга.

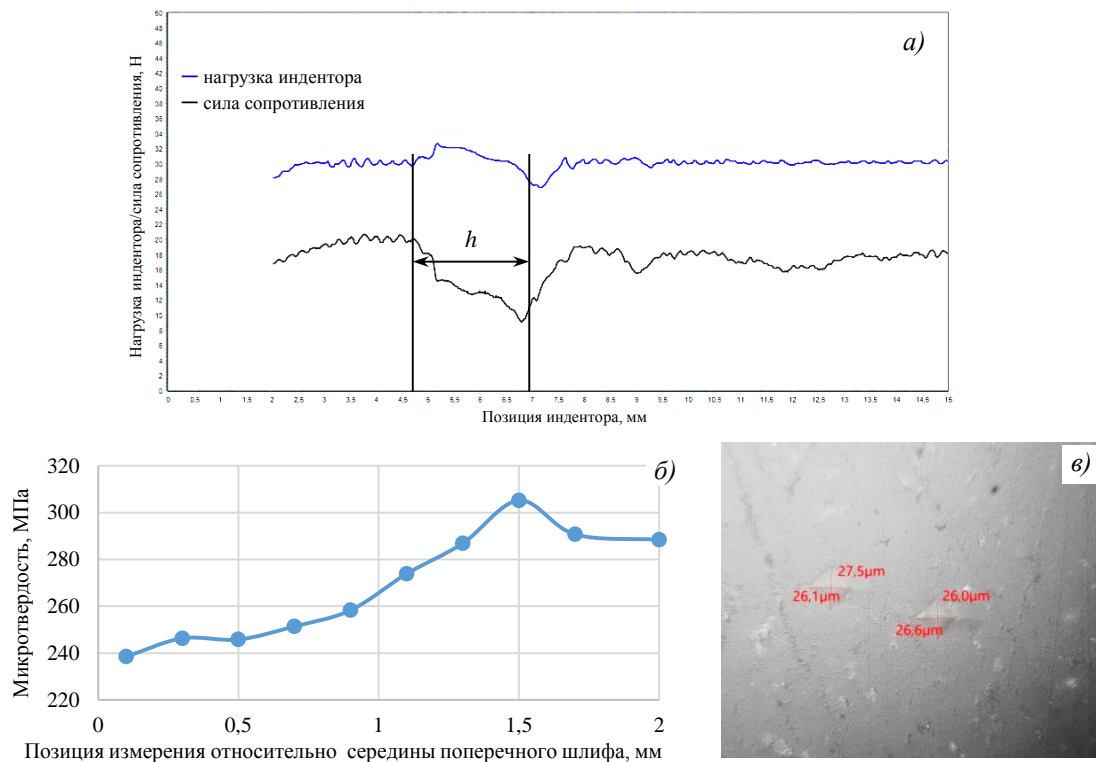


Рис. 8. Исследование отверждения связующего V: а – метод склерометрии (h – толщина образца); б, в – метод микротвердометрии (отпечаток получен при нагрузке 10 г)

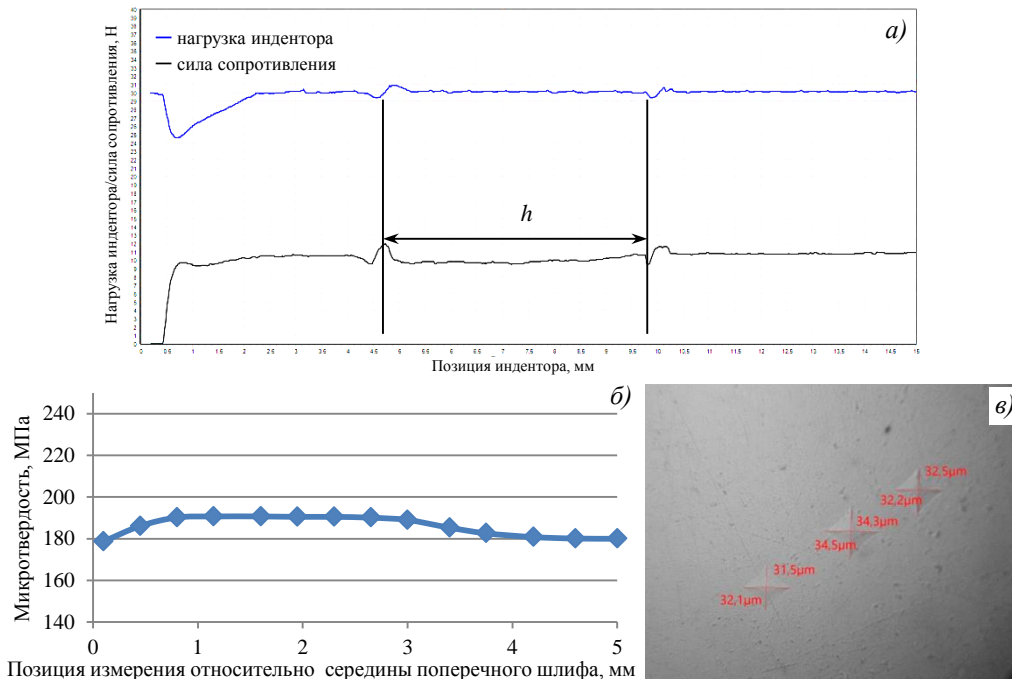


Рис. 9. Исследование отверждения связующего VII: *a* – метод склерометрии (*h* – толщина образца); *б*, *в* – метод микротвердомерии (отпечаток получен при нагрузке 10 г)

Результаты измерений микротвердости и скретч-тестирования отвержденных связующих сведены в табл. 2. За результат склерометрических измерений принимали значение силы сопротивления царапанию на плато склерограмм. Рассчитан коэффициент объемной анизотропии *B*, величина которого не превысила 0,10 и для всех видов связующего имеет положительный знак. Полученные значения коэффициента *B* свидетельствуют о высокой однородности и пониженной анизотропии свойств отвержденных полимеров, а полимерную матрицу связующего IV с коэффициентом объемной анизотропии, стремящимся к нулю ($9,45 \cdot 10^{-4}$), можно отнести к изотропному полимеру. Нулевые значения коэффициента объемной анизотропии характеризуют отсутствие анизотропии свойств в сечении образца. Положительный знак коэффициента *B*, характерный для экзотермических реакций отверждения, согласуется с данными термохимического анализа связующих.

Таблица 2

Результаты измерения микротвердости и скретч-тестирования отвержденных связующих

Связующее	Микротвердость по Виккерсу, МПа	Сила сопротивления царапанию, Н	Коэффициент объемной анизотропии <i>B</i>
I	<u>192,2–208,7</u> 203,8	9,5	0,03
II	<u>188,5–193,8</u> 191,8	9,7	0,02
III	<u>206,0–215,3</u> 210,5	9,5	0,02
IV	<u>317,1–317,6</u> 317,4	8,8	~0 ($9,45 \cdot 10^{-4}$)
V	<u>238,5–305,2</u> 268,5	9,2	0,02
VI	<u>275,0–345,3</u> 319,7	8,8	0,10
VII	<u>178,7–190,7</u> 186,1	9,8	0,06

Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

В дальнейшем предполагается продолжить склерометрические исследования полимерных матриц – изучить характеристики самих царапин (ширина, глубина и морфология склерометрических бороздок), в том числе для оценки объемной анизотропии ненаполненных отвержденных связующих.

Заключения

Проведена классификация отвержденных клеевых расплавных связующих по величине микротвердости, позволяющая прогнозировать степень отверждения связующих.

Исследована корреляционная зависимость между микротвердостью полимерной матрицы и силой сопротивления царапанию индентором, установлена обратная корреляция этих величин. По характеру склерограмм можно прогнозировать закономерность изменения микротвердости исследуемой зоны.

Исследована кинетика реакции отверждения связующего пониженной горючести VII, получена адекватная модель температурно-временных режимов отверждения, обеспечивающая степень конверсии связующего >99 %.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Министерство) в рамках Соглашения № 075-11-2025-011 между Министерством и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на основании Распоряжения Правительства Российской Федерации № 1789-р от 04.07.2023 об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства».

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
2. Каблов Е.Н. Наука как отрасль экономики // Наука и жизнь. 2009. № 10. С. 6–10.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
4. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
6. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
7. Исаев А.Ю., Рубцова Е.В., Котова Е.В., Сутягин М.Н. Исследование свойств клеев и клеевых связующих, изготовленных с использованием современной отечественной компонентной базы // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
8. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Тюменева Т.Ю. Клеевые препреги – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
9. Чурсова Л.В., Цыбин А.И., Гребенева Т.А. Связующие для полимерных композиционных и функциональных материалов. Предшествующий опыт, современное состояние и перспективы развития // Новости материаловедения. Наука и техника. 2017. № 2 (26). С. 34–46. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 09.04.2025).

10. Сопотов Р.И., Горбунова И.Ю., Онучин Д.В. и др. Влияние модификаторов полисульфона и полиэфирсульфона на термомеханические свойства эпоксиаминного связующего // *Успехи в химии и химической технологии*. 2015. Т. 29. № 10. С. 62–64.
11. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н. и др. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавленных связующих для полимерных композиционных материалов // *Полимерные материалы и технологии*. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
12. Копицына М.Н., Бессонов И.В., Котомин С.В. Трещиностойкость эпоксидных связующих, модифицированных термопластичным полисульфоном и фурфуролацетоновой смолой // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2016. № 12. С. 1–9.
13. Хасбулатова З.С. Ароматические полисульфоны // *Пластические массы*. 2009. № 4. С. 20–23.
14. Костромина Н.В., Олихова Ю.В., Малаховский С.С., Горбунова И.Ю. Разработка эпоксидных связующих, модифицированных термостойкими термопластами, для создания армированных композиционных материалов // *Пластические массы*. 2022. № 9-10. С. 17–19.
15. Бородулин А.С. Пластификаторы для эпоксидных клеев и связующих // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2012. № 7. С. 31–35.
16. Малышева Г.В., Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Николаев Е.В. Оптимизация режимов отверждения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
17. Большаков В.А., Антюфеева Н.В. Оценка модели процесса отверждения клеевого связующего в препреге // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
18. Медведева К.А., Черезова Е.Н. Изучение в качестве отвердителей для эпоксидных олигомеров новых аминофенольных соединений // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 6. Ч. 5. С. 1085–1088.
19. Семеньев В.В., Салахова Р.К. Прибор для оценки свойств покрытий // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 2. С. 60–65.
20. Салахова Р.К., Кирилин С.Г., Тихообразов А.Б., Смирнова Т.Б. Скретч-тестирование электролитических никелевых покрытий на углепластиковой подложке // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2021. Т. 20. № 4. С. 100–114.
21. Заболотнов А.С., Гостев С.С., Маклакова И.А. и др. Влияние кристаллической структуры на комплекс физико-механических характеристик композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // *Высокомолекулярные соединения. Сер.: Б*. 2023. Т. 65. № 5. С. 341–346.
22. Матвеева Л.Ю., Ястребинская А.В. Взаимосвязь надмолекулярной структуры и свойств полимерных композиционных материалов на основе терморезистивных связующих // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 12. С. 49–54.
23. Вешкин Е.А., Славин А.В., Постнова М.В., Апалькова А.В. Роль температурно-временных условий отверждения в формировании свойств однонаправленного и равнопрочного углепластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 2 (79). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.

References

1. Kablov E.N. New Generation Materials – the Basis for Innovation, Technological Leadership, and National Security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
2. Kablov E.N. Science as a Branch of the Economy. *Nauka i zhizn*, 2009, no. 10, pp. 6–10.

3. Kablov E.N. Composites: Today and Tomorrow. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.
4. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Mishkin S.I. Application of carbon fiber plastics in constructions of pilotless devices (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 30, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
6. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
7. Isaev A.Yu., Rubtsova E.V., Kotova E.V., Sutyagin M.N. Research of properties of glues and glue binding, made with use of modern domestic component base. *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 09, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
8. Kutsevich K.E., Dementeva L.A., Lukina N.F., Tyumeneva T.Yu. Adhesive prepregs as promising materials for parts and assemblies from polymeric composite materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
9. Chursova L.V., Tsybin A.I., Grebeneva T.A. Binders for polymer composite and functional materials. Previous experience, current status and development prospects. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2017, no. 2 (26), pp. 34–46. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: April 09, 2025).
10. Sopotov R.I., Gorbunova I.Yu., Onuchin D.V. et al. Effect of polysulfone and polyethersulfone modifiers on the thermomechanical properties of epoxyamine binder. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2015, vol. 29, no. 10, pp. 62–64.
11. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N. et al. Developments of FSUE VIAM in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
12. Kopitsyna M.N., Bessonov I.V., Kotomin S.V. Crack resistance of epoxy binders modified with thermoplastic polysulfone and furfural acetone resin. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2016, no. 12, pp. 1–9.
13. Khasbulatova Z.S. Aromatic polysulfones. *Plasticheskiye massy*, 2009, no. 4, pp. 20–23.
14. Kostromina N.V., Olikhova Yu.V., Malakhovsky S.S., Gorbunova I.Yu. Development of epoxy binders modified with heat-resistant thermoplastics for the creation of reinforced composite materials. *Plasticheskiye massy*, 2022, no. 9–10, pp. 17–19.
15. Borodulin A.S. Plasticizers for epoxy adhesives and binders. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2012, no. 7, pp. 31–35.
16. Malysheva G.V., Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Nikolaev E.V. Optimization of the curing modes of fiber-glass based on epoxy binder. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 06, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
17. Bolshakov V.A., Antyufeeva N.V. Evaluation of the curing process model of the adhesive binder in prepreg. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 08, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
18. Medvedeva K.A., Cherezova E.N. Study of new aminophenolic compounds as hardeners for epoxy oligomers. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 6, part 5, pp. 1085–1088.
19. Semenychev V.V., Salakhova R.K. Device for assessing coating properties. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 2, pp. 60–65.
20. Salakhova R.K., Kirilin S.G., Tikhoobrazov A.B., Smirnova T.B. Scratch testing of electrolytic nickel coatings on a carbon fiber substrate. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye*, 2021, vol. 20, no. 4, pp. 100–114.

21. Zabolotnov A.S., Gostev S.S., Maklakova I.A. et al. Influence of Crystalline Structure on a Set of Physicomechanical Characteristics of Composite Materials Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Ser.: B*, 2023, vol. 65, no. 5, pp. 341–346.
22. Matveeva L.Yu., Yastrebinskaya A.V. Relationship between Supramolecular Structure and Properties of Polymer Composite Materials Based on Thermosetting Binders. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 2017, no. 12, pp. 49–54.
23. Veshkin E.A., Slavin A.V., Postnova M.V., Apalkova A.V. The role of temperature-time curing conditions in the formation of unidirectional and equally strong carbon fiber plastics properties. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.

Информация об авторах

Салахова Розалия Кабировна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вешкин Евгений Алексеевич, начальник филиала, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Апалькова Анна Витальевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Симиргина Наталья Дмитриевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Rosalia K. Salakhova, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeniy A. Veshkin, Head of USTC, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna V. Apalkova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalia D. Simirgina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.12.2025.
The article was submitted 01.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 03.12.2025.