

Научная статья

УДК 669.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-92-107

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ТЕРМОРЕАКТИВНОГО СВЯЗУЮЩЕГО НА СВОЙСТВА СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

Е.А. Серкова¹, О.Б. Застрогина¹, И.А. Сарычев¹,
Д.Н. Скурихина¹, Э.Ю. Долгов¹, Е.В. Куршев¹, С.Л. Лонский¹

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

Аннотация. Рассмотрено влияние состава термореактивного связующего на механические и пожаробезопасные свойства стеклопластиков, предназначенных для применения в конструкциях авиационного интерьера. Показано, что выбор полимерной матрицы определяет не только прочность и жесткость материала, но и его пожаробезопасные свойства. Проанализированы особенности эпоксидных и фенолформальдегидных связующих, а также способы их модификации. На основании научно-технических литературных данных и проведенных исследований разработано новое расплавленное фенолформальдегидное связующее.

Ключевые слова: фенолформальдегидная смола, эпоксидная смола, отвердитель, антипирен, наполнитель, связующее, стеклопластик, горючесть

Для цитирования: Серкова Е.А., Застрогина О.Б., Сарычев И.А., Скурихина Д.Н., Долгов Э.Ю., Куршев Е.В., Лонский С.Л. Исследование влияния состава термореактивного связующего на свойства стеклопластиков // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 92–107. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-92-107.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE THERMOSETTING BINDER COMPOSITION ON THE PROPERTIES OF FIBERGLASS PLASTICS

E.A. Serkova¹, O.B. Zastrogina¹, I.A. Sarychev¹,
D.N. Skurikhina¹, E.Yu. Dolgov¹, E.V. Kurshev¹, S.L. Lonskii¹

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 considers the effect of thermosetting binder composition on the mechanical and fire-safety properties of fiberglass plastics for use in aircraft interior structures. It is shown that the choice of polymer matrix determines not only the strength and stiffness of the material, but also its fire resistant properties. The article analyzes the specific features of epoxy and phenol-formaldehyde binders, as well as methods for their modification. Based on the scientific and technical literature data, and conducted research, a new molten phenol-formaldehyde binder has been developed.

Keywords: phenol-formaldehyde resin, epoxy resin, hardener, fire retardant, filler, binder, fiberglass plastic, flammability

For citation: Serkova E.A., Zastrogina O.B., Sarychev I.A., Skurikhina D.N., Dolgov E.Yu., Kurshev E.V., Lonskii S.L. Investigation of the effect of the thermosetting binder composition on the properties of fiber-glass plastics. *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 92–107. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-92-107.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) постепенно заменяют традиционные металлические сплавы в конструкциях авиационной техники благодаря сочетанию высокой удельной прочности и небольшой плотности, что позволяет одновременно снижать массу летательных аппаратов и повышать эффективность и эксплуатационную надежность конструкций.

Наряду с механическими характеристиками, важнейшим требованием к авиационным ПКМ, особенно применяемым в элементах интерьера, является обеспечение высокого уровня пожарной безопасности, благодаря чему широкое применение получили ПКМ на основе фенолформальдегидных связующих (ФФС) [1].

Определяющим фактором выбора фенольных смол в качестве полимерной матрицы является их поведение при воздействии высоких температур и открытого пламени. В отличие от эпоксидных смол, склонных в процессе термодеструкции к выделению значительного количества токсичных летучих горючих продуктов, фенольные смолы характеризуются способностью к карбонизации с образованием пористого коксового остатка. Данный слой выполняет барьерную функцию, замедляя теплоперенос и ограничивая доступ кислорода к поверхности материала. Не менее важными являются низкое дымообразование и токсичность продуктов горения фенольных смол. Это обстоятельство имеет принципиальное значение для обеспечения времени безопасной эвакуации пассажиров в аварийных ситуациях [2–5].

Однако разработчики сталкиваются с определенными ограничениями при переработке ФФС. Во-первых, в процессе отверждения фенольных олигомеров выделяются вода и низкомолекулярные продукты поликонденсации, что приводит к высокой пористости композиционных материалов. Во-вторых, имея разветвленную структуру, данные полимерные матрицы довольно хрупкие – обладают низкой ударной вязкостью [6]. Наконец, ФФС характеризуются ограниченной адгезией к стеклянным и углеродным волокнам. Тем не менее в условиях приоритета требований пожарной безопасности данные недостатки являются приемлемыми и компенсируются конструктивными решениями с оптимизацией технологических процессов переработки полуфабрикатов ПКМ.

Механические свойства стеклопластиков определяются не только прочностью армирующего наполнителя, но и особенностями структуры полимерной матрицы, характером межфазного взаимодействия и степенью дефектности материала. Фенольные смолы образуют сшитую пространственную структуру, характеризующуюся значительной жесткостью и ограниченной подвижностью макромолекулярных сегментов. Высокая плотность поперечных связей обеспечивает теплостойкость и стабильность размеров, однако одновременно способствует хрупкому разрушению материала при механическом нагружении [7–11]. В работе [12] показано, что увеличение степени сшивки фенольной матрицы приводит к возрастанию модуля упругости и температуры стеклования, но сопровождается снижением ударной вязкости и трещиностойкости. Поэтому большинство методов модификации направлено либо на снижение хрупкости матрицы, либо на повышение эффективности передачи напряжений между матрицей и стекловолокном или любым другим армирующим наполнителем [13].

В свою очередь прочность стеклопластиков также влияет на характер разрушения трехслойных сотовых конструкций, из которых они состоят. При высокой прочности

стеклопластиковой обшивки разрушение чаще локализуется в зоне контакта с сотами: по клеевому слою, по границе раздела фаз или с частичным разрушением кромок сот. Если же прочность стеклопластика недостаточна, возможны внутрислойные повреждения самой обшивки: растрескивание полимерной матрицы, расслоение стеклоткани, вырыв отдельных волокон. В этом случае измеренное усилие отдира обшивки от сот снижается, так как разрушение начинается не только по границе раздела «обшивка–соты», но и внутри менее прочного композитного слоя.

В работе [14] показано, что повышение трещиностойкости фенольных композитов возможно путем увеличения способности матрицы к локальной пластической деформации. Авторы отмечают, что основной фактор повышения вязкости разрушения – подавление быстрого распространения трещины и развитие механизмов рассеяния энергии в зоне разрушения за счет введения армирующих волокон. Аналогичные результаты наблюдаются при использовании гибридных матриц и термопластичных модификаторов. Введение полиамидных модификаторов или поливинилацеталей способствует повышению ударной вязкости и трещиностойкости благодаря формированию двухфазной структуры с дисперсной термопластичной фазой. Такие системы характеризуются повышенной способностью к релаксации напряжений и меньшей склонностью к хрупкому разрушению [15–22].

Один из наиболее распространенных способов улучшения механических свойств ФФС – модификация эластомерными компонентами [23, 24]. Введение каучуков способствует повышению ударной вязкости и сопротивления распространению трещин за счет локальной пластической деформации матрицы. Наиболее широко применяются нитрильные, бутадиен-нитрильные и карбоксилсодержащие каучуки [25–28]. Механизм повышения трещиностойкости связан с образованием дисперсной эластомерной фазы, способной поглощать энергию разрушения и препятствовать развитию микротрещин.

Другой эффективный метод – химическая модификация фенольных смол эпоксидными соединениями. Эпоксиды способны вступать в реакции с гидроксиметильными и фенольными группами фенолформальдегидных олигомеров, формируя комбинированную пространственную сетку. Подобная структура характеризуется более высокой деформационной способностью и улучшенной адгезией к армирующим волокнам. В результате повышаются прочность при растяжении, межслойная прочность и сопротивление усталостному разрушению. Кроме того, модификация эпоксидными олигомерами способствует снижению внутренних напряжений, возникающих при отверждении, что особенно важно для толстостенных композиционных конструкций [29–36].

Наряду с полимерными модификаторами, широкое распространение получили наноразмерные наполнители. Добавление углеродных нанотрубок, графена, наноглин или оксидных наночастиц позволяет существенно улучшить механические характеристики фенольных стеклопластиков даже при низких концентрациях наполнителя [37–39]. Эффект обусловлен высокой удельной поверхностью наночастиц и их способностью армировать матрицу на микро- и наноуровне. Наночастицы препятствуют распространению микротрещин, увеличивают модуль упругости и повышают сопротивление усталостному разрушению [40].

Важным способом повышения механических свойств фенольных стеклопластиков является оптимизация процессов отверждения. Кинетика отверждения оказывает непосредственное влияние на структуру пространственной сетки, уровень остаточных напряжений и степень дефектности материала. Слишком быстрое отверждение сопровождается интенсивным выделением летучих продуктов, образованием пор и возникновением внутренних напряжений. В результате снижаются межслойная прочность и сопротивление ударным нагрузкам. Согласно данным работы [12], оптимизация

температурного режима отверждения позволяет существенно повысить прочностные характеристики фенольных материалов путем формирования более однородной структуры. Один из наиболее эффективных технологических приемов – ступенчатое отверждение, при котором процесс проводят в несколько стадий с постепенным повышением температуры. Такой подход способствует более равномерному удалению летучих продуктов и уменьшению вероятности образования микродефектов. Дополнительное применение вакуумирования и подпрессовки позволяет снизить пористость композита и повысить степень пропитки армирующего наполнителя. Снижение пористости особенно важно для ПКМ на основе ФФС, поскольку поры являются концентраторами напряжений и существенно ухудшают прочность при растяжении и межслойном сдвиге.

Дополнительный способ модификации – введение минеральных наполнителей и антипиренов, одновременно влияющих на механические и огнезащитные свойства материала. В работе [41] показано, что введение гидроксида алюминия способствует повышению огнестойкости фенольных стеклопластиков, однако избыток наполнителя приводит к снижению механической прочности вследствие нарушения сплошности матрицы. Поэтому при разработке модифицированных ФФС необходимо учитывать компромисс между пожаробезопасными и механическими характеристиками.

Современные исследования также направлены на использование гибридных армирующих структур, сочетающих стеклянные и углеродные волокна. В работе [42] показано, что гибридизация армирования позволяет повысить прочность и ударную вязкость композита благодаря сочетанию высокой жесткости углеродных волокон и повышенной деформационной способности стекловолокна. Использование подобных структур особенно перспективно в сочетании с модифицированными фенольными матрицами.

Существенное влияние на механические характеристики стеклопластиков оказывает межфазное взаимодействие между стекловолокном и фенольной матрицей. В работах [9, 43] показано, что прочность композита в значительной степени определяется адгезией на границе раздела фаз. Недостаточная совместимость поверхности стеклянных волокон с фенольной матрицей приводит к преждевременному межслойному разрушению, образованию дефектов и снижению прочности при растяжении. Одним из наиболее эффективных методов повышения адгезии является применение силановых аппретов. Силаны образуют химические связи как с гидроксильными группами поверхности стекловолокна, так и с реакционноспособными группами фенольной смолы, формируя прочный межфазный слой. Использование силановых модификаторов позволяет существенно повысить межслойную прочность, сопротивление расслоению и долговечность стеклопластиков [44]. Согласно данным работы [45], применение аминопропилтриэтоксисилана приводит к заметному увеличению прочности при растяжении и изгибе благодаря улучшению передачи напряжений между волокном и матрицей. Дополнительное преимущество силановой обработки – снижение вероятности образования межфазных дефектов и повышение влагостойкости композита.

В данной статье рассматривается влияние состава термореактивных связующих на механические и пожаробезопасные свойства получаемых стеклопластиков для материалов интерьера авиационной техники.

Работа выполнена в рамках комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» комплексной научной проблемы 13.1. «Связующие для полимерных и композиционных материалов конструкционного и специального назначения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

Данную работу выполняли на экспериментальных композициях, в составе которых в качестве полимерной основы применяли смеси термореактивных фенольных и модифицированных эпоксидных смол. В качестве модифицирующих добавок и антипиренов добавляли широко используемые: гидроксид алюминия, трифенилфосфат, полифосфат аммония, терморасширяемый графит и низкомолекулярный уретановый каучук марки ПДИ-3АК.

Для сравнения полученных результатов использовали данные на разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ фенолформальдегидное связующее марки РС-Н (ТУ 1-595-12-896–2006) и эпоксидные связующие марок ЭДТ-69Н (ТУ 1-595-584–2006) и ВС-77 (ТУ 20.14.63-156-07545412–2024).

Исследуемые композиции изготавливали путем механического смешения смол, модифицирующих добавок и антипиренов в стеклянных или металлических реакторах объемом до 3 л. Содержание дисперсной фазы в составах композиций варьировали от 10 до 40 % (по массе).

Для изготовления препрегов на основе экспериментальных композиций использовали полую стеклоткань сатинового плетения марки Т-15(П)-76 с поверхностной плотностью 160 г/м². Стеклопластики изготавливали методом прямого прессования по ступенчатому температурному режиму с толщиной монослоя 0,14–0,17 мм и средним содержанием связующего 30±2 %. Изготавливали и исследовали препреги и стеклопластики только тех композиций, технологические свойства которых оптимально подходили для переработки в препрег.

Определяли следующие свойства стеклопластиков на основе экспериментальных композиций:

- температуру стеклования по ГОСТ Р 57739–2017;
- предел прочности при растяжении по ГОСТ Р 56785–2015;
- модуль упругости при растяжении по ГОСТ Р 56785–2015;
- прочность при статическом изгибе по ГОСТ Р 56805–2015;
- модуль упругости при изгибе по ГОСТ Р 56805–2015;
- кажущийся предел прочности при межслойном сдвиге по ГОСТ 32659–2014;
- тепловыделение по АП-25 (Приложение F, Часть IV);
- дымообразование по АП-25 (Приложение F, Часть V) и ГОСТ 24632–81;
- горючесть по АП-25 (Приложение F, Часть I) и ГОСТ Р 57924–2017.

Микроструктурные исследования проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа в режиме вторичных электронов при увеличениях от ×600 до ×10000. Подготовку образцов для исследования микроструктуры проводили по специальной методике (ММ 1.595-12-243–2007), разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

В настоящее время в России действуют нормы летной годности НЛГ-25 и НЛГ-29, которые регламентируют требования к летной годности самолетов и вертолетов транспортной категории. В обоих случаях большое внимание уделяется пожаробезопасности материалов интерьера, однако уровень требований, объем испытаний и критерии оценки существенно различаются вследствие особенностей эксплуатации воздушных судов, их размеров, вместимости и возможностей эвакуации.

В нормах НЛГ-25 предъявляются наиболее жесткие требования к материалам интерьера. Помимо требований по горючести, добавляются требования по дымообразованию и тепловыделению, но они относятся только к крупным элементам интерьера

пассажирских салонов, таким как боковые панели, потолки, перегородки, багажные полки, кухонные модули и т. д., в свою очередь, для панелей багажного отделения и панелей пола такие требования отсутствуют [46, 47].

Именно различием требований объясняется более широкое применение фенольных стеклопластиков в интерьерах гражданских самолетов, тогда как в вертолетной технике чаще допускается использование модифицированных эпоксидных систем с менее жесткими характеристиками по пожаробезопасности.

Рассмотрим пример: в вертолетной технике широко используются материалы на основе эпоксидного связующего ЭДТ-69Н, в составе которого содержатся эпокситрифенольная смола и галогенсодержащая эпоксидная смола для снижения показателей по горючести [48]. В свою очередь, в 2024 г. в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработано расплавное эпоксидное связующее марки ВС-77. Для улучшения показателей по пожаробезопасности и снижения дымообразования в его составе использовали эпоксиноволачную смолу и смесь антипиренов, не содержащих галогены, при этом механические свойства связующего ВС-77 также повысились [49].

Для снижения показателей по тепловыделению эпоксидных связующих проводили модификацию связующего ВС-77 – образцы ЭН-1 и ЭН-2 (табл. 1). Увеличение количества минеральных антипиренов не привело к положительным результатам. Показатели по тепловыделению даже увеличились, а предел прочности при растяжении немного снизился.

Таблица 1

**Механические и пожаробезопасные свойства стеклопластиков
на основе эпоксидных связующих**

Свойства	Значения свойств для стеклопластиков на основе ткани Т-15(П)-76			
	ЭДТ-69Н	ВС-77	ЭН-1	ЭН-2
Предел прочности при растяжении, МПа	460	447	425	420
Модуль упругости при растяжении, ГПа	21	24	21	22
Прочность при статическом изгибе, МПа	500	696	–	–
Модуль упругости при изгибе, ГПа	–	24	–	–
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	39	56	–	–
Температура стеклования, °С	140	119	–	139
Горючесть при толщине стеклопластика 0,3 мм	Самозатухающий	Трудносгорающий	–	–
Дымообразование	Сильнодымящий	Среднедымящий	–	–
Максимальная скорость выделения тепла (пик), кВт/м ² /общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин, кВт·мин/м ² (при толщине стеклопластика 0,3 мм)	–	55/31 (45/21)*	–	58/28
* Показатель для связующего ВС-77, модифицированного графитом.				

Наиболее эффективным способом модификации стеклопластика на основе эпоксидного связующего ВС-77 оказалось введение графита на стадии переработки препрега стеклопластика. Показатели максимальной скорости выделения тепла и общее количество выделившегося тепла снизились с 55 до 45 кВт/м² и с 31 до 21 кВт·мин/м² соответственно. При этом прочностные характеристики не изменились.

Модификация эпоксидных связующих позволяет получать стеклопластики с показателями по тепловыделению, соответствующими требованиям норм НЛГ-25, но так как в конструкциях интерьерных панелей применяются в основном трехслойные панели с декоративной отделкой (пленки, ламинированные панели, лакокрасочные системы и др.), то по данным показателям стеклопластики должны иметь дополнительный эксплуатационный резерв.

В 2006 г. в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработано фенолформальдегидное связующее марки РС-Н, представляющее собой высококонцентрированный раствор фенолформальдегидных олигомеров резольного и новолачного типа в органическом растворителе без применения антипиренов [50]. Разработанные материалы для интерьера на его основе полностью отвечают требованиям по пожаробезопасности в соответствии с нормами АП-25 и НЛГ-25. Данные на стеклопластики приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические и пожаробезопасные свойства стеклопластиков на основе фенолформальдегидных связующих

Свойства	Значения свойств для стеклопластиков на основе ткани Т-15(П)-76				
	ЭР-1	ЭР-2	ЭР-3	ЭР-4	РС-Н
Предел прочности при растяжении, МПа	128	191	202	383	235
Модуль упругости при растяжении, ГПа	18	21	24	26	22
Прочность при статическом изгибе, МПа	–	–	–	397	345
Модуль упругости при изгибе, ГПа	–	–	–	20	–
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	–	–	–	32	31
Температура стеклования, °С	166	178	170	174	147
Горючесть при толщине стеклопластика 0,3 мм	–	–	–	Трудногорящий	Самозатухающий
Дымообразование	–	–	–	Слабодымящий	
Максимальная скорость выделения тепла (пик), кВт/м ² /общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин, кВт·мин/м ² (при толщине стеклопластика 0,3 мм)	33/15	–	–	22/12	25/23

Помимо пожаробезопасных свойств материалов, важны и механические характеристики, поэтому проведены исследования по модификации фенолформальдегидного связующего различными добавками – композиции ЭР (табл. 2).

Традиционно фенолформальдегидные связующие применяются в виде растворов, однако растворная технология может ухудшать физико-механические показатели изготавливаемых деталей из-за образования летучих продуктов при отверждении. Расплавные технологии позволяют снизить пористость пластиков, обеспечивают более точное содержание связующего в препреге, повышают экологичность и безопасность производства.

Композиция ЭР-1 состоит из смеси резольной, эпоксиноволачной и эпоксианилиновой смол с добавлением мелкодисперсных антипиренов. Долю антипиренов в композиции определяли по возможности совмещения с полимерной основой и требуемой вязкостью для переработки в препрег. В композиции ЭР-2 эпоксианилиновую смолу заменили на бифункциональный эпоксидный разбавитель для снижения вязкости системы и добавили низкомолекулярный уретановый каучук марки ПДИ-ЗАК, что привело к улучшению показателя по прочности при растяжении (композиция ЭР-3).

Повышение прочности при растяжении стеклопластика положительно влияет на сопротивление отдиру обшивки от сот. При растяжении обшивки в зоне изгиба верхние слои воспринимают растягивающие напряжения; если матрица хорошо удерживает стеклянные волокна и эффективно передает нагрузку, то обшивка дольше сохраняет целостность. При слабой адгезии между фенольной матрицей и стеклотканью, наличии пористости или микротрещин растягивающие напряжения вызывают преждевременное расслоение, уменьшающее фактическое усилие отдира.

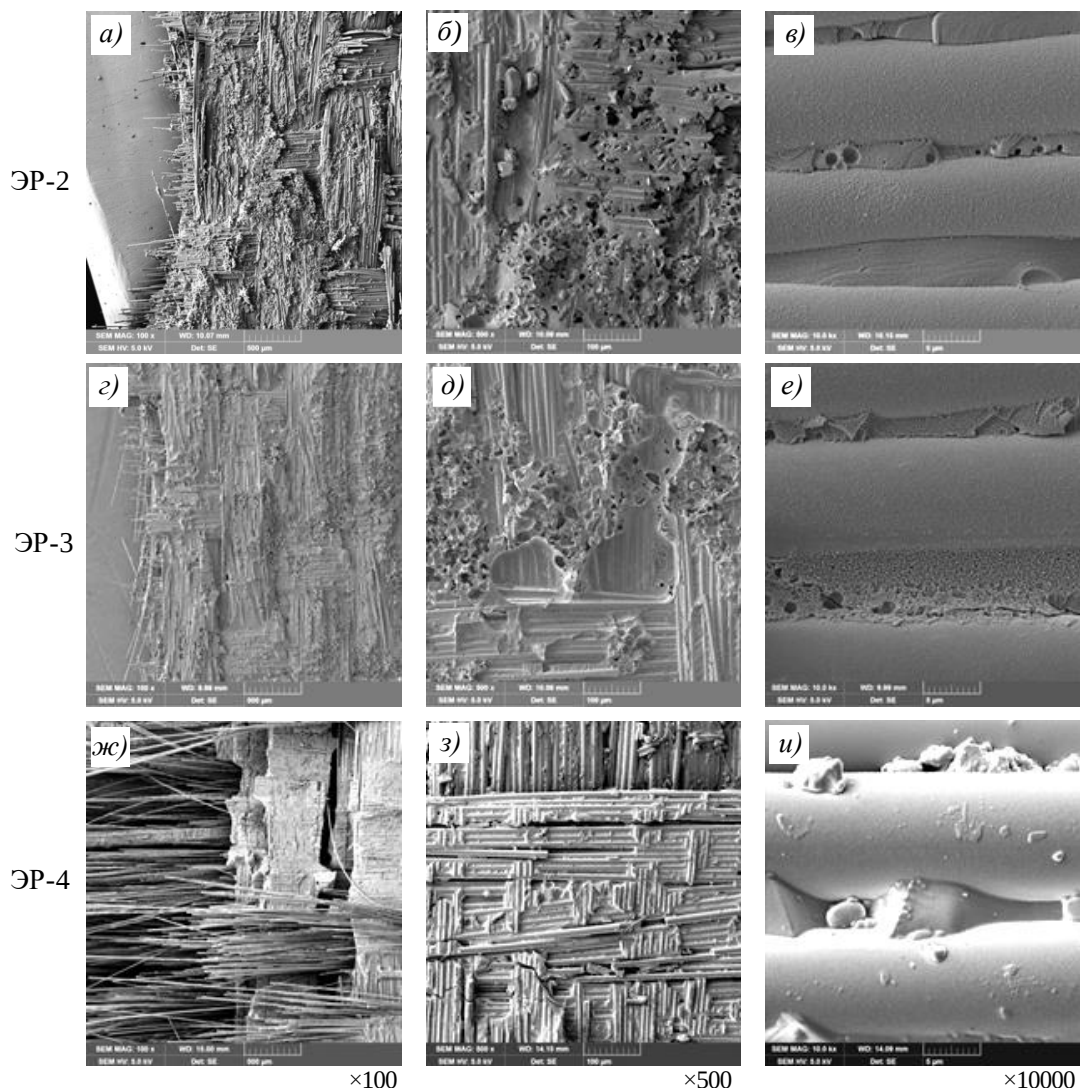
При этом в случае чрезмерной жесткости обшивки не всегда однозначно повышается прочность соединения. В очень жесткой, но хрупкой фенольной матрице могут хуже перераспределяться локальные напряжения, особенно при ударных или циклических нагрузках. В этом случае разрушение может переходить от плавного отдира к хрупкому отрыву с резким распространением трещины. Поэтому оптимальным является не просто повышение модуля упругости стеклопластика, а сочетание достаточной жесткости, высокой межслойной прочности и хорошей адгезии к сотам.

В связи с этим для увеличения прочности и модуля упругости стеклопластика проводили исследования по влиянию соотношения компонентов полимерной смеси на прочностные характеристики. На основании полученных данных оптимальной выбрана композиция ЭР-4, не содержащая дисперсных наполнителей.

Методом сканирующей электронной микроскопии проведены микроструктурные исследования поверхности расслоения стеклопластиков на основе композиций ЭР-2, ЭР-3 и ЭР-4 после испытания на растяжение.

Выявлены основные различия микроструктуры поверхностей разрушения стеклопластиков на основе композиций ЭР-2, ЭР-3 и ЭР-4 после испытания на растяжение. Установлено, что во всех трех случаях, механизм расслоения стеклопластиков смешанный – расслоение происходит как по полимерной матрице, так и по стеклянному волокну (см. рисунок). В стеклопластиках на основе композиций ЭР-2 и ЭР-3 обнаружены участки с крупными воздушными пустотами, а также множественные микропоры в пленке матрицы и в матрице между волокнами (см. рисунок, б, д). Полимерная матрица в этих стеклопластиках имеет участки локальной неоднородности, образование таких участков связано с неравномерным распределением дисперсного наполнителя (см. рисунок, а, б, г, д). Матрица между волокнами в стеклопластиках на основе композиций ЭР-2 и ЭР-3 разрушается без образования торсионов, что свидетельствует о низкой адгезии полимерной матрицы к поверхности стеклянного волокна (см. рисунок, в, е). Модифицирующие компоненты в составе композиции ЭР-4 в стеклопластике образуют малопористую гомогенную полимерную матрицу, что свидетельствует о высокой степени их совмещения (см. рисунок, ж, з). Важно отметить наличие торсионов в матрице

между стеклянными волокнами в стеклопластике на основе композиции ЭР-4, что свидетельствует о хорошей смачиваемости волокна связующим и повышении адгезии на границе раздела «волокно–матрица» (см. рисунок, *и*).



Микроструктуры поверхности разрушения стеклопластиков на основе композиций ЭР-2 (*а–в*), ЭР-3 (*г–е*) и ЭР-4 (*ж–и*) после испытания на растяжение при температуре 20 °С

Заключения

Проведенный анализ научно-технических литературных данных показал, что при разработке стеклопластиков для материалов интерьера авиационной техники повышение пожаробезопасности должно рассматриваться совместно с обеспечением механических свойств и технологичности. Для эпоксидного связующего ВС-77 наиболее эффективным приемом снижения тепловыделения стало введение графита на стадии переработки препрега: максимальная скорость тепловыделения и суммарное тепловыделение уменьшились без заметного снижения прочности. Однако для трехслойных панелей с декоративной отделкой требуется большой запас по пожаробезопасности, что обосновывает переход к модификации фенолформальдегидных связующих. Установлено, что свойства фенольных стеклопластиков определяются соотношением компонентов матрицы, качеством пропитки стеклоткани, пористостью и межфазным взаимодействием.

Композиции ЭР-2 и ЭР-3 характеризуются микропористостью и локальной неоднородностью, что ограничивает адгезию матрицы к стекловолокну и снижает сопротивление расслоению. Оптимальной признана композиция ЭР-4, формирующая гомогенную и беспористую структуру с хорошей смачиваемостью волокон. Это обеспечивает повышение прочности и модуля упругости стеклопластика, улучшение межслойной прочности при сохранении высоких показателей пожаробезопасности. Полученные результаты подтверждают перспективность модификации фенольных связующих для интерьерных конструкций.

Полученные данные позволили разработать новое расплавное связующее марки РС-Нр (ТУ 1-595-12-896-2006, Изменение № 5) и стеклопластики на его основе с улучшенными прочностными характеристиками и показателями по пожаробезопасности в соответствии с нормами НЛГ-25.

Список источников

1. Барботько С.Л. Требования авиационных норм и применяемые методы оценки пожарной безопасности // Полимерные материалы пониженной горючести: сб. тез. XII Междунар. конф. (Балашиха, 09–12 сентября 2025 года). Балашиха: Всерос. науч.-исслед. ин-т противопожарной обороны МЧС РФ, 2025. С. 430–436.
2. Kim M., Choe J., Lee D.G. Development of the Fire Retardant Glass Fabric/Carbonized Phenolic Composite // *Composite Structures*. 2016. Vol. 158. P. 272–280. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.04.003.
3. Mouritz A.P., Gibson A.G. *Fire Properties of Polymer Composite Materials*. Dordrecht: Springer, 2006. 400 p.
4. Gardziella A., Pilato L., Knop A. *Phenolic Resins: Chemistry, Applications, Standardization, Safety and Ecology*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2000. 584 p. DOI: 10.1007/978-3-662-04101-7.
5. Zaks Y., Lo J., Raucher D., Pearce E.M. Some Structure-Property Relationships in Polymer Flammability: Studies of Phenolic-Derived Polymers // *Journal of Applied Polymer Science*. 1982. Vol. 27. P. 913–930. DOI: 10.1002/app.1982.070270311.
6. Charalambides M.N., Williams J.G. Fracture toughness characterization of phenolic resin and its composite // *Polymer Composites*. 1995. Vol. 16. No. 1. P. 17–28. DOI: 10.1002/pc.750160105.
7. Zhou D.-P., Fan H. Mechanical and High-Temperature Properties of Glass Fibers Reinforced Phenolic Composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2008. Vol. 27. No. 13. P. 1449–1460. DOI: 10.1177/0731684407086613.
8. Shudo Y., Izumi A., Hagita K. et al. Structure-Mechanical Property Relationships in Crosslinked Phenolic Resin Investigated by Molecular Dynamics Simulation // *Polymer*. 2017. Vol. 116. P. 506–514. DOI: 10.1016/j.polymer.2017.02.037.
9. Tavakoli S.M., Avella M., Phillips M.G. Fibre/Resin Compatibility in Glass/Phenolic Laminating Systems // *Composites Science and Technology*. 1990. Vol. 39. No. 2. P. 127–145. DOI: 10.1016/0266-3538(90)90051-6.
10. Naveen J., Chitra F., Naveen Kumar M. Mechanical Properties of Phenolic Resins // *Phenolic Resins: A Century of Progress and Their Future Applications*. 2026. P. 443–470. DOI: 10.1016/B978-0-323-95660-4.00011-8.
11. Gibson R.F. *Principles of Composite Material Mechanics*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 694 p.
12. Wolfrum J., Ehrenstein G.W. Interdependence between the Curing, Structure, and the Mechanical Properties of Phenolic Resins // *Journal of Applied Polymer Science*. 1999. Vol. 74. No. 4. P. 779–786. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19991024)74:4<779::AID-APP7>3.0.CO;2-7.
13. Tang K., Zhang A., Ge T. et al. Research progress on modification of phenolic resin // *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 26. Art. 101879. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492820328907> (дата обращения: 17.05.2026). DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101879.
14. Charalambides M.N., Williams J.G. Fracture Toughness Characterization of Phenolic Resin and Its Composite // *Journal of Composite Materials*. 1995. Vol. 29. No. 7. P. 892–905. DOI: 10.1002/pc.750160105.

15. Застрогина О.Б., Серкова Е.А., Сарычев И.А., Вавилова М.И. Влияние винифлекса российского и китайского производства на свойства связующего ВФТ и стеклотекстолита на его основе // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-3-9.
16. Синяков С.Д., Застрогина О.Б., Павлюк Б.Ф. Композиции на основе фенолформальдегидных смол, модифицированных поливинилацетатами (обзор) // *Новости материаловедения*. Наука и техника. 2018. № 1–2 (29). С. 56–67. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 04.05.2026).
17. Лукина Н.Ф., Котова Е.В., Петрова А.П., Исаев А.Ю. Улучшение свойств фенолформальдегидных клеев при модификации их поливинилацетатами // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). С. 27–36. URL: <https://viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7- 27-36.
18. Ma C.C.M., Lee C.T., Wu H.D. Mechanical properties, thermal stability, and flame retardance of pultruded fiber-reinforced poly(ethylene oxide)-toughened novolak-type phenolic resin // *Journal of Applied Polymer Science*. 1998. Vol. 69. No. 6. P. 1129–1136. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19980808)69:6<1129::AID-APP10>3.0.CO;2-O.
19. Wang F.Y., Ma C.C.M., Wu W.J. Mechanical properties, morphology and flame retardance of glass fiber-reinforced polyamide-toughened novolak-type phenolic resin // *Journal of Applied Polymer Science*. 1999. Vol. 73. P. 881–887. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19990808)73:6<881::AID-APP4>3.0.CO;2-I.
20. Li D., Hu X., Huang Z. et al. Effect of several modifiers on the mechanical and tribological properties of phenol formaldehyde resin // *High Performance Polymers*. 2018. Vol. 30. No. 5. P. 580–590. DOI: 10.1177/0954008317710317.
21. Taheri H., Oliaei M., Ipakchi H., Saghaf H. Toughening phenolic composite laminates by interleaving hybrid pyrolytic carbon/polyvinyl butyral nanomat // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 191. Art. 107981. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836819351030> (дата обращения 14.05.2026). DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107981/.
22. Ipakchi H., Rezadoust A.M., Esfandeh M., Rezaei M. Improvement of interlaminar fracture toughness of phenolic laminates interleaved with electrospun polyvinyl butyral nanofibers // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2020. Vol. 105. Art. 102406. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844219301466> (дата обращения: 21.05.2026). DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.102406.
23. Cardona F., Kin-Tak A.L., Fedrigo J. Novel phenolic resins with improved mechanical and toughness properties // *Journal of Applied Polymer Science*. 2012. Vol. 123. No. 4. P. 2131–2139. DOI: 10.1002/app.34719.
24. Derakhshandeh B., Shojaei A., Faghihi M. Effects of rubber curing ingredients and phenolic-resin on mechanical, thermal, and morphological characteristics of rubber/phenolic-resin blends // *Journal of Applied Polymer Science*. 2008. Vol. 108. No. 6. P. 3808–3821. DOI: 10.1002/app.28034.
25. Gopala Krishnan P.S., Venkatesan N., Adhinarayanan K. Effect of phenolic resin structure on the bonding properties of nitrile rubber-based adhesives // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2004. Vol. 18 (13). P. 1483–1495. DOI: 10.1163/1568561042411240.
26. Ghosh P., Banerjee S.S., Khastgir D. Performance assessment of hybrid fibrous fillers on the tribological and thermo-mechanical behaviors of elastomer modified phenolic resin friction composite // *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. P. 1–14. DOI: 10.1007/s42452.020.
27. Nawaz R., Rashid N., Ali Z. et al. 7 Effects on Thermal and Ablative Properties of Phenolic Resin (Novolac) Blended Acrylonitrile Butadiene Rubber // *Fibers and Polymers*. 2018. No. 19. P. 1318–1326. DOI: 10.1007/s12221-018-8075-5.
28. Yu Z., Li J., Yang L. et al. Synthesis and properties of nano carboxylic acrylonitrile butadiene rubber latex toughened phenolic resin // *Journal of Applied Polymer Science*. 2012. No. 123. P. 1079–1084. DOI: 10.1002/app.34573.
29. Rutnakornpituk M. Modification of epoxy–novolac resins with polysiloxane containing nitrile functional groups: synthesis and characterization // *European Polymer Journal*. 2005. No. 41. P. 1043–1052. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2004.11.013.

30. Ebrahimi H., Roghani-Mamaqani H., Salami-Kalajahi M. et al. Chemical incorporation of epoxymodified graphene oxide into epoxy/novolac matrix for the improvement of thermal characteristics // *Carbon Letters*. 2020. No. 30. P. 13–22. DOI: 10.1007/s42823-019-00065-5.
31. Patel M., Yadav M., Raj M. Development in the Modification of Phenolic Resin by Renewable Resources: (A-Review) // *Oriental Journal of Chemistry*. 2023. No. 39. P. 867–880. DOI: 10.13005/ojc/390407.
32. Lei Z., Ji J., Wu Q. et al. Curing behavior and microstructure of epoxy-POSS modified novolac phenolic resin with different substitution degree // *Polymer*. 2019. Vol. 178. Art. 121587. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386119305713> (дата обращения: 14.05.2026). DOI: 10.1016/j.polymer.2019.121587.
33. Munoz J.-C., Ku H., Cardona F., Rogers D. Effects of catalysts and post-curing conditions in the polymer network of epoxy and phenolic resins: Preliminary results // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 202. P. 486–492. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.025.
34. Manfredi L.B., Fraga A.N., Vázquez A. Influence of the network structure and void content on hygrothermal stability of resol resin modified with epoxy-amine // *Journal of Applied Polymer Science*. 2006. Vol. 102. P. 588–597. DOI: 10.1002/app.24323.
35. Tyberg C.S., Sankarapandian M., Bears K. et al. Tough, void-free, flame retardant phenolic matrix materials // *Construction and Building Materials*. 1999. Vol. 13. P. 343–353. DOI: 10.1016/S0950-0618(99)00022-7.
36. Auad M.L., Zhao L., Shen H., Nutt S.R., Sorathia U. Flammability properties and mechanical performance of epoxy modified phenolic foams // *Journal of Applied Polymer Science*. 2007. Vol. 104. P. 1399–1407. DOI: 10.1002/app.24405.
37. Yang W., Rallini M., Natali M. et al. Preparation and properties of adhesives based on phenolic resin containing lignin micro and nanoparticles: A comparative study // *Materials & Design*. 2019. Vol. 161. P. 55–63. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.032.
38. Chen J., Zhang W., Liu J. et al. Improved thermal stability of phenolic resin by graphene-encapsulated nano-SiO₂ hybrids // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019. Vol. 135. P. 2377–2387. DOI: 10.1007/s10973-018-7325-5.
39. Деев И.С., Застрогина О.Б., Швец Н.И. Влияние наномодификаторов на микроструктуру и механическую прочность стеклотекстолита на основе фенолоформальдегидного связующего // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. № 5. С. 55–60.
40. Bakhshi B., Heydarian M. Study of mechanical, flame, and water stability of phenolic resin/carbon fiber/nanosilica composites // *Polymer Composites*. 2021. No. 42 (8). P. 3892–3898. DOI: 10.1002/pc.26101.
41. Santhosh M.S., Thangavel T., Sasikumar R. et al. Mechanical and Fire Performance of Aluminium Hydroxide Filled E-Glass/Phenolic Hybrid Composites // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 6662–6668. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.649.
42. Zhang J., Chaisombat K., He S., Wang C. Hybrid Composite Laminates Reinforced with Glass/Carbon Woven Fabrics for Lightweight Load Bearing Structures // *Materials and Design*. 2012. Vol. 36. P. 75–80. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.11.006.
43. Morii T., Ivens J., Verpoest I. Interfacial Effects on the Mechanical Properties of Glass/Phenolic Composites // *Advanced Composites Letters*. 1999. Vol. 8. No. 6. P. 295–302. DOI: 10.1177/096369359900800604.
44. Hu X., Zeng J., Dai W. et al. EPDM/vinyl triethoxysilane modified phenol formaldehyde resin composite // *Polymer Bulletin*. 2011. No. 66 (5). P. 703–710. DOI: 10.1007/s00289-010-0374-y.
45. Wu Q., Zhang C., Liang W. Effect of Silane Coupling Agent on Interfacial Adhesion of Glass Fiber/Phenolic Resin Composites // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 320. P. 696–701. DOI: 10.1006/jcis.2001.7788.
46. Сарычев И.А., Серкова Е.А., Хмельницкий В.В., Застрогина О.Б. Термореактивные связующие для материалов панелей пола летательных аппаратов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7 (79). С. 26–33. URL: <https://viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33.

47. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Шершак П.В., Галиуллин А.Р. Панели пола салона и багажно-грузового отсека из полимерных композиционных материалов современного отечественного самолета. Часть 1. Разнообразие требований отечественных разработчиков воздушных судов к панелям пола салона и багажно-грузового отсека из полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). С. 25–36. URL: <https://viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-25-36.
48. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П., Пономаренко С.А., Долгова Е.В., Павлюк Б.Ф. Свойства связующего ЭДТ-69Н и ПКМ на его основе // Труды ВИАМ. 2018. № 4 (64). С. 28–37. URL: <https://viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-28-37.
49. Колпачков Е.Д., Вавилова М.И., Серкова Е.А., Долгов Э.Ю., Антипов В.В. ПКМ нового поколения на основе стеклянных наполнителей для изготовления элементов интерьера вертолетной техники // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). С. 63–73. URL: <https://viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-63-73.
50. Застрогина О.Б., Швец Н.И., Постнов В.И., Серкова Е.А. Фенолформальдегидные связующие нового поколения для материалов интерьера // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 265–272.

References

1. Barbotko S.L. Requirements of aviation standards and applied methods of fire safety assessment. *Polymeric materials of low flammability*: collection of abstracts of the XII Int. Conf. (Balashikha, September 9–12, 2025). Balashikha: All-Rus. Research Institute of Fire Defense of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation, 2025, pp. 430–436.
2. Kim M., Choe J., Lee D.G. Development of the Fire Retardant Glass Fabric/Carbonized Phenolic Composite. *Composite Structures*, 2016, vol. 158, pp. 272–280. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.04.003.
3. Mouritz A.P., Gibson A.G. *Fire Properties of Polymer Composite Materials*. Dordrecht: Springer, 2006, 400 p.
4. Gardziella A., Pilato L., Knop A. *Phenolic Resins: Chemistry, Applications, Standardization, Safety and Ecology*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2000, 584 p. DOI: 10.1007/978-3-662-04101-7.
5. Zaks Y., Lo J., Raucher D., Pearce E.M. Some Structure-Property Relationships in Polymer Flammability: Studies of Phenolic-Derived Polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 1982, vol. 27, pp. 913–930. DOI: 10.1002/app.1982.070270311.
6. Charalambides M.N., Williams J.G. Fracture toughness characterization of phenolic resin and its composite. *Polymer Composites*, 1995, vol. 16, no. 1, pp. 17–28. DOI: 10.1002/pc.750160105.
7. Zhou D.-P., Fan H. Mechanical and High-Temperature Properties of Glass Fibers Reinforced Phenolic Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2008, vol. 27, no. 13, pp. 1449–1460. DOI: 10.1177/0731684407086613.
8. Shudo Y., Izumi A., Hagita K. et al. Structure-Mechanical Property Relationships in Crosslinked Phenolic Resin Investigated by Molecular Dynamics Simulation. *Polymer*, 2017, vol. 116, pp. 506–514. DOI: 10.1016/j.polymer.2017.02.037.
9. Tavakoli S.M., Avella M., Phillips M.G. Fibre/Resin Compatibility in Glass/Phenolic Laminating Systems. *Composites Science and Technology*, 1990, vol. 39, no. 2, pp. 127–145. DOI: 10.1016/0266-3538(90)90051-6.
10. Naveen J., Chitra F., Naveen Kumar M. Mechanical Properties of Phenolic Resins. *Phenolic Resins: A Century of Progress and Their Future Applications*, 2026, pp. 443–470. DOI: 10.1016/B978-0-323-95660-4.00011-8.
11. Gibson R.F. *Principles of Composite Material Mechanics*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2016, 694 p.
12. Wolfrum J., Ehrenstein G.W. Interdependence between the Curing, Structure, and the Mechanical Properties of Phenolic Resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, vol. 74, no. 4, pp. 779–786. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19991024)74:4<779::AID-APP7>3.0.CO;2-7.
13. Tang K., Zhang A., Ge T. et al. Research progress on modification of phenolic resin. *Materials Today Communications*, 2021, vol. 26, art. 101879. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492820328907> (accessed: May 17, 2026). DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101879.

14. Charalambides M.N., Williams J.G. Fracture Toughness Characterization of Phenolic Resin and Its Composite. *Journal of Composite Materials*, 1995, vol. 29, no. 7, pp. 892–905. DOI: 10.1002/pc.750160105.
15. Zastrogina O.B., Serkova E.A., Sarychev I.A., Vavilova M.I. Influence of Russian and Chinese vinylflex on the properties of the VFT binder and fiberglass based on it. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-3-9.
16. Sinyakov S.D., Zastrogina O.B., Pavlyuk B.F. Composites based on phenol-formaldehyde resins modified with polyvinyl acetals (review). *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2018, no. 1–2 (29), pp. 56–67. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: May 04, 2026).
17. Lukina N.F., Kotova E.V., Petrova A.P., Isaev A.Yu. Improvement of properties of fenolformaldegidny adhesives when updating by their polyvinylacetals. *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), pp. 27–36. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7- 27-36.
18. Ma C.C.M., Lee C.T., Wu H.D. Mechanical properties, thermal stability, and flame retardance of pultruded fiber-reinforced poly(ethylene oxide)-toughened novolak-type phenolic resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 1998, vol. 69, no. 6, pp. 1129–1136. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19980808)69:6<1129::AID-APP10>3.0.CO;2-O.
19. Wang F.Y., Ma C.C.M., Wu W.J. Mechanical properties, morphology and flame retardance of glass fiber-reinforced polyamide-toughened novolac-type phenolic resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, vol. 73, pp. 881–887. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19990808)73:6<881::AID-APP4>3.0.CO;2-I.
20. Li D., Hu X., Huang Z. et al. Effect of several modifiers on the mechanical and tribological properties of phenol formaldehyde resin. *High Performance Polymers*, 2018, vol. 30, no. 5, pp. 580–590. DOI: 10.1177/0954008317710317.
21. Taheri H., Oliaei M., Ipakchi H., Saghaf H. Toughening phenolic composite laminates by interleaving hybrid pyrolytic carbon/polyvinyl butyral nanomat. *Composites Part B: Engineering*, 2020, vol. 191, art. 107981. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836819351030> (accessed: May 14, 2026). DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107981/.
22. Ipakchi H., Rezadoust A.M., Esfandeh M., Rezaei M. Improvement of interlaminar fracture toughness of phenolic laminates interleaved with electrospun polyvinyl butyral nanofibers. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, vol. 105, art. 102406. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844219301466> (accessed: May 21, 2026). DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.102406.
23. Cardona F., Kin-Tak A.L., Fedrigo J. Novel phenolic resins with improved mechanical and toughness properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, vol. 123, no. 4, pp. 2131–2139. DOI: 10.1002/app.34719.
24. Derakhshandeh B., Shojaei A., Faghihi M. Effects of rubber curing ingredients and phenolic-resin on mechanical, thermal, and morphological characteristics of rubber/phenolic-resin blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol. 108, no. 6, pp. 3808–3821. DOI: 10.1002/app.28034.
25. Gopala Krishnan P.S., Venkatesan N., Adhinarayanan K. Effect of phenolic resin structure on the bonding properties of nitrile rubber-based adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2004, vol. 18 (13), pp. 1483–1495. DOI: 10.1163/1568561042411240.
26. Ghosh P., Banerjee S.S., Khastgir D. Performance assessment of hybrid fibrous fillers on the tribological and thermo-mechanical behaviors of elastomer modified phenolic resin friction composite. *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, pp. 1–14. DOI: 10.1007/s42452.020.
27. Nawaz R., Rashid N., Ali Z. et al. 7 Effects on Thermal and Ablative Properties of Phenolic Resin (Novolac) Blended Acrylonitrile Butadiene Rubber. *Fibers and Polymers*, 2018, no. 19, pp. 1318–1326. DOI: 10.1007/s12221-018-8075-5.
28. Yu Z., Li J., Yang L. et al. Synthesis and properties of nano carboxylic acrylonitrile butadiene rubber latex toughened phenolic resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, no. 123, pp. 1079–1084. DOI: 10.1002/app.34573.

29. Rutnakornpituk M. Modification of epoxy–novolac resins with polysiloxane containing nitrile functional groups: synthesis and characterization. *European Polymer Journal*, 2005, no. 41, pp. 1043–1052. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2004.11.013.
30. Ebrahimi H., Roghani-Mamaqani H., Salami-Kalajahi M. et al. Chemical incorporation of epoxymodified graphene oxide into epoxy/novolac matrix for the improvement of thermal characteristics. *Carbon Letters*, 2020, no. 30, pp. 13–22. DOI: 10.1007/s42823-019-00065-5.
31. Patel M., Yadav M., Raj M. Development in the Modification of Phenolic Resin by Renewable Resources: (A-Review). *Oriental Journal of Chemistry*, 2023, no. 39, pp. 867–880. DOI: 10.13005/ojc/390407.
32. Lei Z., Ji J., Wu Q. et al. Curing behavior and microstructure of epoxy-POSS modified novolac phenolic resin with different substitution degree. *Polymer*, 2019, vol. 178, art. 121587. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386119305713> (accessed: May 17, 2026). DOI: 10.1016/j.polymer.2019.121587.
33. Munoz J.-C., Ku H., Cardona F., Rogers D. Effects of catalysts and post-curing conditions in the polymer network of epoxy and phenolic resins: Preliminary results. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 202, pp. 486–492. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.025.
34. Manfredi L.B., Fraga A.N., Vázquez A. Influence of the network structure and void content on hygrothermal stability of resol resin modified with epoxy–amine. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, vol. 102, pp. 588–597. DOI: 10.1002/app.24323.
35. Tyberg C.S., Sankarapandian M., Bears K. et al. Tough, void-free, flame retardant phenolic matrix materials. *Construction and Building Materials*, 1999, vol. 13, pp. 343–353. DOI: 10.1016/S0950-0618(99)00022-7.
36. Auad M.L., Zhao L., Shen H., Nutt S.R., Sorathia U. Flammability properties and mechanical performance of epoxy modified phenolic foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, vol. 104, pp. 1399–1407. DOI: 10.1002/app.24405.
37. Yang W., Rallini M., Natali M. et al. Preparation and properties of adhesives based on phenolic resin containing lignin micro and nanoparticles: A comparative study. *Materials & Design*, 2019, vol. 161, pp. 55–63. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.032.
38. Chen J., Zhang W., Liu J. et al. Improved thermal stability of phenolic resin by graphene-encapsulated nano-SiO₂ hybrids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, vol. 135, pp. 2377–2387. DOI: 10.1007/s10973-018-7325-5.
39. Deev I.S., Zastrogina O.B., Shvets N.I. Influence of nanomodifiers on the microstructure and mechanical strength of fiberglass based on phenol-formaldehyde binder. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2012, no. 5, pp. 55–60.
40. Bakhshi B., Heydarian M. Study of mechanical, flame, and water stability of phenolic resin/carbon fiber/nanosilica composites. *Polymer Composites*, 2021, no. 42 (8), pp. 3892–3898. DOI: 10.1002/pc.26101.
41. Santhosh M.S., Thangavel T., Sasikumar R. et al. Mechanical and Fire Performance of Aluminium Hydroxide Filled E-Glass/Phenolic Hybrid Composites. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45, pp. 6662–6668. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.649.
42. Zhang J., Chaisombat K., He S., Wang C. Hybrid Composite Laminates Reinforced with Glass/Carbon Woven Fabrics for Lightweight Load Bearing Structures. *Materials and Design*, 2012, vol. 36, pp. 75–80. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.11.006.
43. Morii T., Ivens J., Verpoest I. Interfacial Effects on the Mechanical Properties of Glass/Phenolic Composites. *Advanced Composites Letters*, 1999, vol. 8, no. 6, pp. 295–302. DOI: 10.1177/096369359900800604.
44. Hu X., Zeng J., Dai W. et al. EPDM/vinyl triethoxysilane modified phenol formaldehyde resin composite. *Polymer Bulletin*, 2011, no. 66 (5), pp. 703–710. DOI: 10.1007/s00289-010-0374-y.
45. Wu Q., Zhang C., Liang W. Effect of Silane Coupling Agent on Interfacial Adhesion of Glass Fiber/Phenolic Resin Composites. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 320, pp. 696–701. DOI: 10.1006/jcis.2001.7788.
46. Sarychev I.A., Serkova E.A., Khmelnskiy V.V., Zastrogina O.B. Thermosetting binders for aircraft floor panel materials (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), pp. 26–33. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33.

47. Barannikov A.A., Veshkin E.A., Shershak P.V., Galiullin An.R. Floor panels of the cabin and baggage and cargo compartment from polymer composite materials for modern domestic aircraft. Part 1. Diversity of requirements of domestic aircraft developers for cabin and baggage and cargo compartment floor panels from polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2026, no. 12 (154), pp. 25–36. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-25-36.
48. Muhametov R.R., Petrova A.P., Ponomarenko S.A., Dolgova E.V., Pavlyuk B.F. Properties of binder EDT-69N and polymer composites on its basis. *Trudy VIAM*, 2018, no. 4 (64), pp. 28–37. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-28-37.
49. Kolpachkov E.D., Vavilova M.I., Serkova E.A., Dolgov E.Yu., Antipov V.V. New generation PCM based on glass fillers for the manufacturing of interior elements of helicopter equipment. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), pp. 63–73. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-63-73.
50. Zastrogina O.B., Shvets N.I., Postnov V.I., Serkova E.A. Phenolformaldehyde binding new generation for interior materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 265–272.

Информация об авторах

Серкова Евгения Алексеевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Застрогина Ольга Борисовна, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сарычев Игорь Анатольевич, научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скурихина Дарья Николаевна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Долгов Эдуард Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куршев Евгений Васильевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лонский Станислав Леонардович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Evgenia A. Serkova, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga B. Zastrogina, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Igor A. Sarychev, Research Associate, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Daria N. Skurikhina, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Eduard Yu. Dolgov, Engineer, «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeniy V. Kurshev, Leading Engineer, «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav L. Lonskii, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.06.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.06.2026.

The article was submitted 24.06.2026; approved and accepted for publication after reviewing 30.06.2026.