Научная статья

УДК 678.8:620.193.21
DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-65-80

ВЛИЯНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ЭПОКСИДНОГО ПОЛИМЕРА Этал-247 С РАЗЛИЧНЫМИ ОТВЕРДИТЕЛЯМИ

И.Г. Лукачевская[1], О.В. Старцев[2], Д.Р. Низин[1], А.А. Дьяконов[1], А.Л. Терешкин[1]

[1]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия; presidium@prez.ysn.ru
[2]Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. *Исследовано влияние влагосодержания на прочность ненаполненного эпоксидного полимера Этал-247, полученного с использованием отвердителей Этал-1472, Этал-45М, Этал-45TZ2 и Этал-М7. Установлено, что увеличение содержания воды снижает прочность всех исследованных составов, однако характер и интенсивность зависимости определяются типом отвердителя. Составы с отвердителями Этал-45TZ2 и Этал-М7 наиболее чувствительны к начальному увлажнению. Показано, что морфология поверхности может влиять на начальную стадию поступления воды, тогда как основным механизмом изменения механических свойств является пластификация объема полимерной сетки.*

Ключевые слова: *эпоксидный полимер, Этал-247, отвердитель, влагосодержание, прочность при растяжении, пластификация, температура стеклования, климатическое старение*

Для цитирования: Лукачевская И.Г., Старцев О.В., Низин Д.Р., Дьяконов А.А., Терешкин А.Л. Влияние влагосодержания на прочность эпоксидного полимера Этал-247 с различными отвердителями // Труды ВИАМ. 2026. № 11 (165). С. 65–80. URL: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-65-80.

Scientific article

EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON THE STRENGTH OF Etal-247 EPOXY POLYMER CURED WITH DIFFERENT HARDENERS

I.G. Lukachevskaia[1], O.V. Startsev[2], D.R. Nizin[1], A.A. Dyakonov[1], A.L. Tereshkin[1]

[1]Federal Research Centre «Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Yakutsk, Russia; presidium@prez.ysn.ru
[2]Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. *The effect of moisture content on the tensile strength of unfilled Etal-247 epoxy polymer cured with Etal-1472, Etal-45M, Etal-45TZ2 and Etal-M7 was studied. Increasing water content reduced the strength of all compositions, while the character and intensity of the relationship depended on the hardener. Etal-45TZ2- and Etal-M7-based systems showed the highest sensitivity to initial moisture uptake. Surface morphology may influence the initial stage of water ingress, whereas the principal mechanism governing the change in mechanical properties is plasticization of the bulk polymer network.*

Keywords: *epoxy polymer, Etal-247, hardener, moisture content, tensile strength, plasticization, glass-transition temperature, climatic ageing*

For citation: Lukachevskaia I.G., Startsev O.V., Nizin D.R., Dyakonov A.A., Tereshkin A.L. Effect of moisture content on the strength of Etal-247 epoxy polymer cured with different hardeners. *Trudy VIAM*, 2026, no. 11 (165), pp. 65–80. Available at: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-65-80.

Введение

Эпоксидные полимеры широко применяются в качестве клеевых материалов, защитных покрытий, заливочных компаундов и матриц полимерных композиционных материалов. Такая область применения обусловлена высокой адгезией к различным поверхностям, химической стойкостью, сравнительно низкой усадкой при отверждении и возможностью регулирования механических характеристик посредством изменения состава связующего [1–4].

Для изготовления и ремонта конструкций в условиях сниженной температуры особый интерес представляют эпоксидные системы холодного отверждения [5, 6]. Однако эксплуатация таких материалов в открытой атмосфере сопровождается воздействием влаги, температурных колебаний и солнечной радиации. Результирующее изменение свойств определяется сочетанием обратимых и необратимых процессов [3, 7–9].

По данным работ [10, 11], одним из главных факторов внешней среды, влияющих на свойства полимерных материалов, является атмосферная влага. Присутствие паров воды в атмосфере, выпадение дождей и образование росы создают условия, при которых молекулы воды диффундируют во внутренние слои материалов и существенно изменяют их свойства. Это характерно как для ненаполненных эпоксидных полимеров [3, 12], так и для композиционных материалов на основе углеродных, стеклянных и других армирующих наполнителей [13–15]. Поэтому при оценке свойств полимерных материалов на основе эпоксидных матриц анализ влияния содержащейся влаги имеет определяющее значение.

К необратимым процессам относятся химическая деструкция, термо- и фотоокисление, удаление низкомолекулярных компонентов, физическое старение и дополнительное структурирование полимерной сетки. Обратимые изменения в значительной степени обусловлены сорбцией воды. Молекулы воды взаимодействуют с гидроксильными и другими полярными группами эпоксидной матрицы, изменяют эффективность межмолекулярных взаимодействий и облегчают сегментальную подвижность полимерных цепей [7–9, 16, 17].

При значительном увлажнении вода обычно проявляет пластифицирующее действие, которое выражается в снижении температуры стеклования, модуля упругости и прочности. При малом содержании воды в отдельных эпоксидных системах возможна антипластификация, связанная с образованием дополнительных водородных связей и ограничением локальной подвижности макромолекул [12, 16, 17]. Поэтому зависимость механических характеристик от влагосодержания может быть нелинейной и существенно различаться для систем с разным строением полимерной сетки [3].

Механический отклик увлажненного полимера определяется не только количеством сорбированной воды. Существенное значение имеет уровень температуры стеклования T_g относительно температуры испытаний [3, 12]. Если значение T_g остается существенно выше температуры нагружения, материал сохраняет стеклообразное состояние, а снижение прочности обычно ограничено. При приближении значения T_g к температуре испытания даже небольшое дополнительное влагосодержание может вызвать резкое уменьшение жесткости и сопротивления деформированию.

Перспективной системой холодного отверждения является модифицированная эпоксидная смола Этал-247, применяемая при изготовлении стеклопластиков, антикоррозионных покрытий, клеевых соединений и электротехнических заливочных материалов.

Для ее отверждения используют отвердители Этал-1472, Этал-45М, Этал-45TZ2 и Этал-М7, формирующие сетки с различными механическими и сорбционными характеристиками [17–19].

Сравнение эпоксидных систем только по прочности в высушенном состоянии не позволяет оценить их работоспособность в реальной влажной атмосфере. С другой стороны, испытание только увлажненных образцов не позволяет отделить временную пластификацию от необратимого изменения структуры. Для характеристики влагостойкости необходимо исследовать материал в нескольких контролируемых влажностных состояниях и анализировать зависимости прочности, модулей упругости, температуры стеклования и других показателей от влагосодержания.

Цель работы – установить закономерности изменения предела прочности при растяжении и температуры стеклования эпоксидного полимера Этал-247 при увеличении влагосодержания и определить влияние типа отвердителя на чувствительность материала к пластифицирующему действию воды. Указанные сведения важно учитывать при использовании авиационных эпоксидных полимеров холодного отверждения в различных областях.

Материалы и методы

Объекты исследования – ненаполненные эпоксидные полимеры на основе модифицированной эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителей Этал-1472, Этал-45М, Этал-45TZ2 и Этал-М7 производства АО «ЭНПЦ Эпитал» [17–19]. Исследованные составы обозначены 247-1472, 247-45М, 247-45TZ2 и 247-М7 соответственно.

Компоненты дозировали в соотношениях, рекомендованных изготовителем, и перемешивали до получения визуально однородной композиции в течение 5 мин со скоростью 800–1000 об/мин. Полученные составы заливали в формы для изготовления, готовили образцы толщиной 4,0±0,4 мм и геометрическими размерами для образцов типа 2 по ГОСТ 11262–2017 [20]. Первичное отверждение проводили при температуре 23±2 °С в течение 24 ч. Затем образцы подвергали дополнительной термообработке при 80 °С в течение 6 ч.

Механические характеристики определяли для трех состояний полимеров: высушенном, равновесно увлажненном и влагонасыщенном. Сушку проводили при температуре 60±2 °С до достижения постоянной массы. Равновесное состояние формировали при температуре 23±2 °С и относительной влажности воздуха 50±5 %. Предельное увлажнение выполняли в эксикаторах над водой при температуре 23±2 °С в соответствии с ГОСТ Р 56762–2015 [21]. Состояние считали установившимся при отсутствии статистически значимого изменения массы образца при последовательных взвешиваниях. Взвешивание выполняли на аналитических весах с точностью до 10^{-4} г.

Влагосодержание определяли по формуле

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

где m_w, m_0 – масса образца во влажном состоянии и после полного высушивания соответственно, г.

Испытания на растяжение проводили на универсальной испытательной машине по ГОСТ 11262–2017 [20]. Скорость перемещения подвижного зажима составила 2 мм/мин. Испытания проведены при температуре 23±2 °С и относительной влажности воздуха 50±5 %. Для каждого состава и влажностного состояния использовали не менее восьми образцов. Результаты представляли как среднее арифметическое значение с указанием стандартного отклонения.

В качестве характеристического напряжения принимали значение, соответствующее переходу кривой деформирования к участку, на котором приращение напряжения между смежными точками устойчиво снижалось до околонулевого уровня. При отсутствии выраженного перехода использовали максимальное напряжение, достигнутое при испытании.

Температуру стеклования T_g определяли методом динамического механического анализа (ДМА). Измерения выполняли при изгибных колебаниях образцов размером 15×9×2 мм. Условия проведения испытаний: температурный диапазон от 25 до 120 °С, скорость нагрева 2 °С/мин, частота изгибных колебаний 1 Гц. Испытания проводили в потоке аргона. Определяли температурные зависимости динамического модуля упругости E' и динамического модуля потерь E''. Температуру стеклования принимали равной максимальной температуре зависимости $E''(T)$ в соответствии с ISO 6721-1:2019 [22].

Морфологию исходной поверхности неразрушенных образцов исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) при низком (2 кВ) ускоряющем напряжении в вакууме и рабочем расстоянии 3 мм. Съемку проводили при увеличении ×1000, масштабная линейка на снимках соответствовала 10 мкм.

Относительное изменение предела прочности при растяжении рассчитывали по формуле

$$\Delta\sigma_w = \frac{\sigma_0 - \sigma_w}{\sigma_0} \cdot 100\ \%, \qquad (2)$$

где σ_0, σ_w – предел прочности при растяжении высушенного образца и с влагосодержанием w соответственно, МПа.

Для сравнительной оценки средней чувствительности состава к воде использовали интегральный коэффициент

$$K_w = \frac{\sigma_0 - \sigma_{\text{пред}}}{\sigma_0 w_{\text{пред}}} \cdot 100\ \%, \qquad (3)$$

где $\sigma_{\text{пред}}$ – предел прочности при растяжении влагонасыщенного образца; $w_{\text{пред}}$ – предельное влагосодержание влагонасыщенного образца.

Показатель K_w характеризует среднее относительное уменьшение предела прочности при растяжении, приходящееся на 1 % содержания сорбированной воды. Его следует использовать как сравнительный параметр, поскольку он не отражает локальной нелинейности зависимости $\sigma(w)$.

Результаты и обсуждение

Деформационные кривые исследованных составов имеют типичный для ненаполненных эпоксидных полимеров вид. После начального квазилинейного участка напряжение достигает максимального значения при относительной деформации ~(3–6) %. Дальнейшее деформирование происходит при меньшем напряжении вплоть до разрушения образца. В высушенном состоянии предел прочности σ_t и модуль упругости E_t при растяжении существенно зависят от отвердителя. Значение σ_t снижается с ~70 до ~34 МПа, величина E_t – с 2700 до 1970 МПа в последовательности составов 247-1472 → 247-45TZ2 → 247-45М → 247-М7.

Следовательно, состав с отвердителем Этал-1472 характеризуется наиболее высокими значениями прочности и жесткости. Минимальные показатели получены для состава с отвердителем Этал-М7. Различия механических свойств могут быть связаны с неодинаковой пространственной структурой сетки, степенью превращения функциональных групп, гибкостью фрагментов отвердителя и концентрацией физических межмолекулярных связей [1].

Сорбционные характеристики исследованных составов также существенно различаются (табл. 1). Наименьшее равновесное влагосодержание установлено для состава 247-1472, наибольшее – для состава 247-М7. Состав с отвердителем Этал-М7 превосходит остальные составы и по предельному влагосодержанию.

Таблица 1

Влагосодержание эпоксидного полимера Этал-247 с различными отвердителями

Состав	Влагосодержание, %	
	равновесное $w_{равн}$	предельное $w_{пред}$
247-45М	1,4±0,1	2,2±0,1
247-1472	1,2±0,1	3,3±0,1
247-45TZ2	1,7±0,1	4,1±0,1
247-М7	4,7±0,1	7,4±0,1

Высокая сорбционная емкость состава 247-М7 может быть связана с повышенным свободным объемом сетки и большей доступностью полярных центров для молекул воды. Вместе с тем по результатам только гравиметрических измерений невозможно однозначно разделить вклад свободного объема, химической полярности и морфологических неоднородностей.

Морфология поверхности эпоксидных материалов определяется условиями приготовления и отверждения, тогда как их механические свойства зависят от полноты формирования сетки и природы отвердителя [3, 5, 17–19].

Дополнительная информация о состоянии поверхностного слоя получена с помощью РЭМ. На рис. 1 представлены РЭМ-изображения поверхности неразрушенных образцов эпоксидного полимера Этал-247 с различными отвердителями. Показано, что тип отвердителя влияет на морфологическое состояние поверхностного слоя.

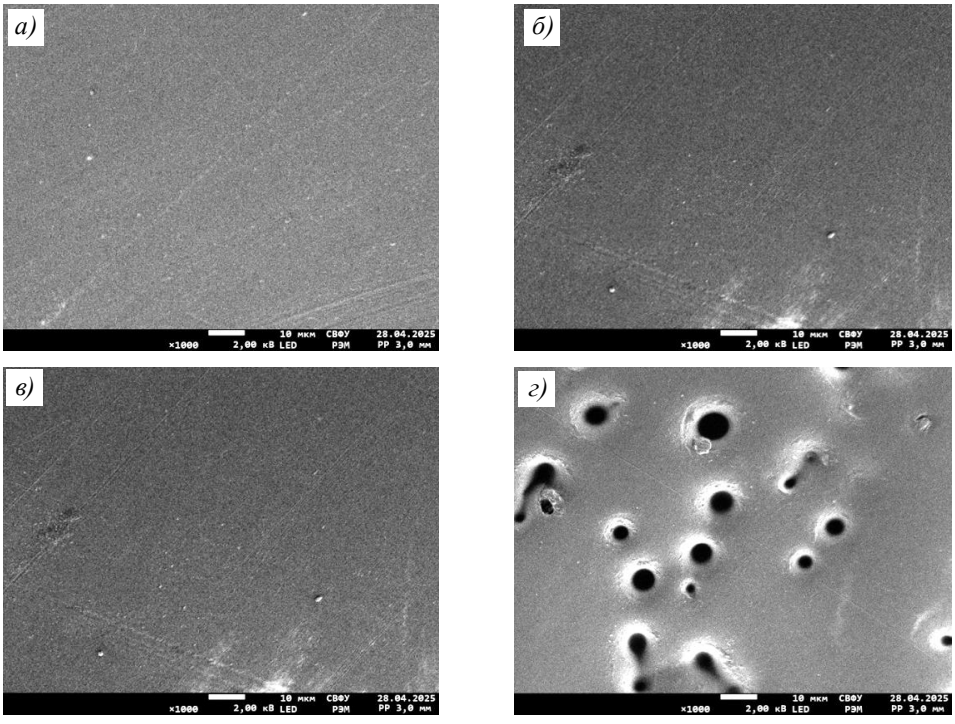


Рис. 1. РЭМ-изображения (увеличение ×1000, масштабная линейка 10 мкм) поверхности неразрушенных образцов эпоксидного полимера Этал-247 с отвердителями Этал-1472 (*а*), Этал-45М (*б*), Этал-45TZ2 (*в*) и Этал-М7 (*г*)

Поверхность образца 247-1472 (рис. 1, *а*) характеризуется наиболее однородным и слабо развитым рельефом. Крупные открытые поры и каверны в исследованном поле отсутствуют. Наблюдаются единичные светлые включения и слабовыраженные линейные следы, которые могут быть связаны с особенностями формования или подготовки поверхности. В целом поверхностный слой данного состава выглядит компактным и сравнительно равномерным.

Для состава 247-45М (рис. 1, *б*) также характерна преимущественно сплошная поверхность, однако ее рельеф отличается большей локальной неоднородностью. На снимке фиксируются отдельные шероховатые участки, неглубокие впадины и пересекающиеся линейные следы. Открытые дефекты немногочисленны и не формируют развитой системы пор. По сравнению с составом 247-1472 поверхность данного образца является менее однородной, но сохраняет относительно компактное строение.

Поверхность образца 247-45TZ2 (рис. 1, *в*) отличается увеличенным количеством дискретных включений и локальных микронеоднородностей. Наблюдаются отдельные углубления и светлые частицы неправильной формы, распределенные по поверхности неравномерно. При этом крупная открытая пористость отсутствует. Такая морфология может свидетельствовать о большей неоднородности формирования поверхностного слоя по сравнению с составами, содержащими отвердители Этал-1472 и Этал-45М.

Наиболее выраженные морфологические отличия выявлены у состава 247-М7 (рис. 1, *г*). Поверхность данного образца содержит многочисленные округлые и овальные полости размером до ~10 мкм. Часть дефектов имеет вытянутую или неправильную форму. Вокруг некоторых углублений наблюдаются светлые периферические участки, соответствующие локальному изменению рельефа. Подобная картина может быть связана с образованием газовых включений, локальной усадкой, неоднородностью отверждения либо особенностями совместимости компонентов состава.

Выявленные морфологические особенности согласуются с результатами определения влагосодержания. Состав 247-М7 характеризуется максимальными значениями равновесного и предельного влагосодержания: 4,7±0,1 и 7,4±0,01 % соответственно. Наличие открытых полостей и развитого поверхностного рельефа может увеличить фактическую площадь контакта материала с влажной средой и облегчить начальное поступление воды в поверхностный слой. В дальнейшем вода распространяется в объеме полимерной сетки, где ее сорбция определяется уже свободным объемом, концентрацией полярных центров и плотностью сшивки [12].

У всех четырех исследованных составов предел прочности при растяжении монотонно снижается с увеличением влагосодержания (рис. 2). Однако форма зависимости $\sigma_t(w)$ заметно различается.

Для составов 247-1472 и 247-45М изменение предела прочности при растяжении в исследованном диапазоне можно приближенно описать линейной зависимостью

$$\sigma_t(w) = \sigma_0 - aw, \tag{4}$$

где a – коэффициент чувствительности прочности к содержанию воды.

Для составов 247-45TZ2 и 247-М7 наблюдается более интенсивное снижение предела прочности при растяжении на начальном участке увлажнения. Такие зависимости целесообразно описывать экспоненциальной функцией

$$\sigma_t(w) = \sigma_0 \exp(-bw), \tag{5}$$

где b – параметр влагочувствительности материала.

Выбранные модели характеризуются высокими коэффициентами детерминации $R^2 = 0{,}95–0{,}99$, что указывает на их удовлетворительное соответствие экспериментальным данным. При этом коэффициенты a и b имеют различный физический смысл и не могут сопоставляться непосредственно: параметр a характеризует абсолютное снижение прочности при увеличении влагосодержания на 1 %, тогда как параметр b отражает относительную интенсивность экспоненциального уменьшения прочности.

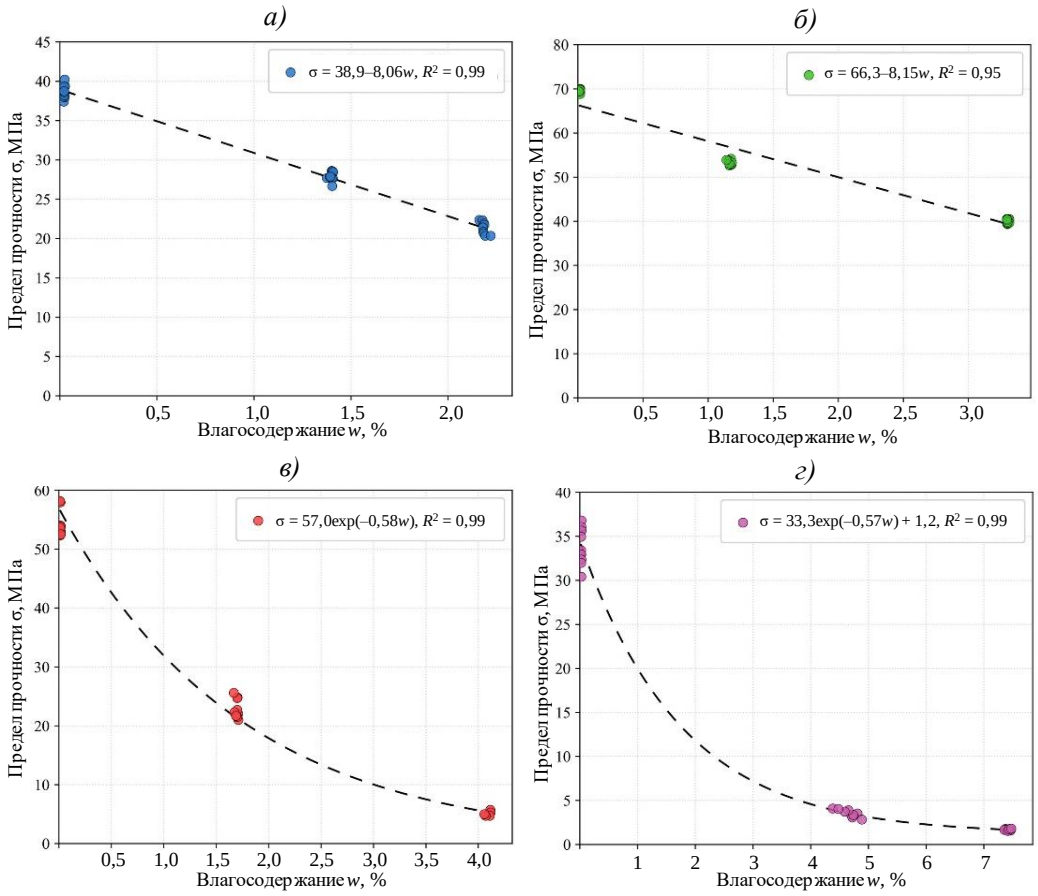


Рис. 2. Зависимости предела прочности при растяжении эпоксидного полимера Этал-247 с отвердителями Этал-45М (*а*), Этал-1472 (*б*), Этал-45TZ2 (*в*) и Этал-М7 (*г*) от влагосодержания

При переходе от высушенного к влагонасыщенному состоянию предел прочности при растяжении состава 247-1472 уменьшается на ~42 %, а состава 247-45М – на ~45 % (табл. 2). Значительно более выраженное влияние воды установлено для составов 247-45TZ2 и 247-М7, для которых снижение прочности достигает ~91 и ~95 % соответственно.

Таблица 2

Относительное снижение прочности при предельном увлажнении

Состав	Снижение предела прочности при растяжении, %	Характер зависимости $\sigma_t(w)$
247-1472	41,7	Линейный
247-45М	44,7	
247-45TZ2	90,9	Экспоненциальный
247-М7	95,3	

Таким образом, с учетом зависимости механических характеристик от влагосодержания исследованные составы можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся составы 247-1472 и 247-45М. Даже при предельном влагонасыщении они сохраняют более половины исходной прочности. Ко второй группе относятся составы 247-45TZ2 и 247-М7. Их прочность в предельно увлажненном состоянии уменьшается более чем на 90 %, что свидетельствует о переходе материала в состояние с высокой сегментальной подвижностью.

Следует учитывать, что величина предельного влагосодержания не является единственным параметром, определяющим механический отклик материала. Состав 247-45TZ2 характеризуется меньшей предельной сорбционной емкостью, чем состав 247-М7. Поэтому сравнительную оценку влагостойкости необходимо проводить не только по суммарному снижению предела прочности при растяжении во влагонасыщенном состоянии, но и по характеру зависимости $\sigma_t(w)$, особенно на начальном участке сорбции.

Наиболее существенные различия между составами проявляются при небольшом и умеренном влагосодержании. Для состава 247-45TZ2 половина общего уменьшения прочности реализована на первой четверти полного диапазона влагосодержания от нуля до $w_{\text{пред}}$. Для состава 247-М7 половина общего снижения прочности наблюдается уже на первых ~16 % полного диапазона влагосодержания.

Следовательно, начальная стадия сорбции наиболее опасна для данных составов. Небольшое количество воды вызывает непропорционально сильное изменение механического состояния, тогда как дальнейшее увлажнение происходит уже в значительно пластифицированном материале. Для составов 247-1472 и 247-45М снижение предела прочности при растяжении распределено по диапазону влагосодержания более равномерно.

Сорбция воды сопровождается уменьшением не только предела прочности при растяжении, но и модуля упругости. Масштаб изменения определяется составом и достигнутым влагосодержанием. Особенно выраженный эффект наблюдается для состава 247-М7. При содержании воды ~4,5 % модуль упругости уменьшается приблизительно на порядок по сравнению с высушенным состоянием. После удаления воды механические показатели в основном восстанавливаются, что указывает на преимущественно обратимый характер начальных изменений и подтверждает определяющее влияние влагопластификации.

В эпоксидных полимерах после завершения стадии холодного отверждения в молекулах смолы и отвердителя остается большое количество активных групп, способных образовать новые поперечные связи. Закономерным следствием такого доотверждения является повышение степени поперечного сшивания (плотности сшивки), которую обычно определяют методом ДМА [23] по формуле

$$\nu = \frac{E_h'}{3RT}, \tag{6}$$

где E_h' – динамический модуль упругости, измеренный в высокоэластичном состоянии полимера методом динамического механического анализа, Па; R = 8,31 Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, К.

Доотверждение активируется при повышении температуры окружающей среды [3], а также при пластификации влагой, которая снижает температуру стеклования, увеличивает молекулярную подвижность и тем самым повышает вероятность образования новых сшивок [24]. Для корректного определения значения ν динамические механические измерения должны проводиться в высушенных образцах, чтобы исключить эффект

пластификации. Например, в работе [25] исследована эпоксидиановая смола DER-330, отвержденная диаминодифенилсульфоном. После увлажнения и повторной сушки плотность сшивки эпоксидного полимера изменилась с $3{,}8 \cdot 10^{-3}$ до $4{,}8 \cdot 10^{-3}$ моль/см^3.

При малых концентрациях вода может оказаться антипластификатором эпоксидных полимеров, повышая их прочность и модуль упругости. По данным работы [26], в эпоксидах доминирующими центрами водородных связей являются гидроксильные группы. Они характеризуются более высокой прочностью связи по сравнению с другими полярными группами. Молекулы воды способны образовывать стабильные водородные связи с гидроксильными группами, укрепляя полимерную сетку и способствуя антипластификации.

Для выяснения причин изменения деформационно-прочностных показателей полимера проведены исследования методом ДМА. Во всех изученных составах переход эпоксидного полимера из стеклообразного в высокоэластическое состояние сопровождается отчетливо выраженным снижением динамического модуля упругости E'. Типичный пример представлен на рис. 3. Для состава 247-1472 в исходном состоянии без сушки показатель E' в интервале температур от 60 до 110 °С уменьшается с 1380 до 25 МПа. Значение E' существенно не изменяется при повышении температуры до 120 °С и определяет величину динамического модуля упругости полимера для его области высокоэластического состояния. Этой области снижения значений E' соответствует пик модуля потерь E'' при 84 °С. Положение вершины максимума значений E'' определяет температуру стеклования T_g = 84 °С при влагосодержании w = 0,93 % (рис. 3, *а*).

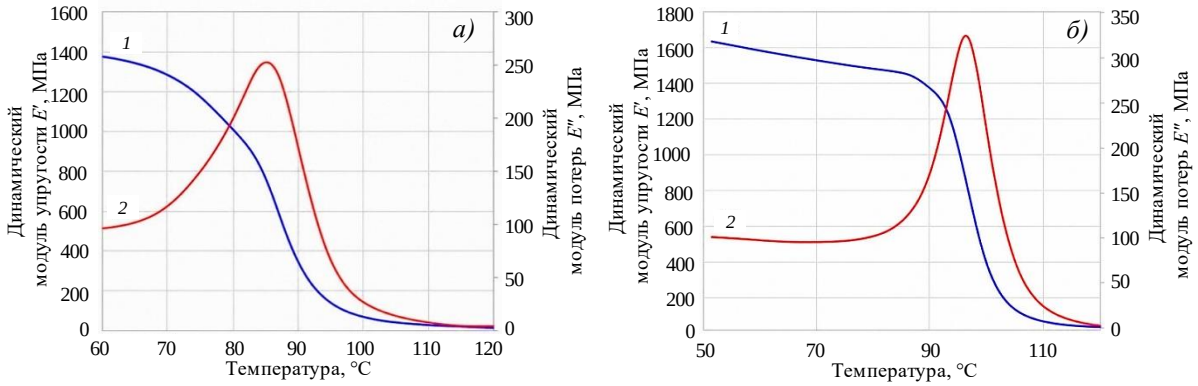


Рис. 3. Температурные зависимости динамического модуля упругости (*1*) и динамического модуля потерь (*2*) состава 247-1472 в исходном состоянии (*а*) и после сушки (*б*)

После сушки показатели E'_h и T_g полимера 247-1472 увеличиваются из-за прекращения пластифицирующего действия влаги: E'_h = 31 МПа, T_g = 96 °С (рис. 3, *б*). Степень сшивки состава 247-1472 после сушки также повышается с $2{,}4 \cdot 10^{-3}$ до $3{,}3 \cdot 10^{-3}$ моль/см^3. Аналогичные результаты ДМА для всей серии составов представлены в табл. 3.

Общей закономерностью выполненных измерений является повышение температуры стеклования полимеров на 15±5 °С после сушки и удаления воды из объема образцов. Эта закономерность подтверждает результаты работ [12, 18] и доказывает, что в умеренно гидрофильном эпоксидном полимере Этал-247 влага вызывает отчетливо выраженное пластифицирующее действие вне зависимости от использованного отвердителя.

Вторая закономерность, выявленная методом ДМА, заключается в увеличении степени сшивки ν в высушенных составах 247-45TZ2, 247-45М и 247-М7 (табл. 3). Наиболее вероятной причиной этого явления является ослабление пластифицирующего

действия влаги в высокоэластическом состоянии высушенных образцов, которое стало возможным из-за уменьшения свободного объема и приближения друг к другу реакционно активных групп полимерной матрицы Этал-247 и отвердителей.

Таблица 3

Динамические механические показатели составов на основе полимера Этал-247 в исходном состоянии и после 3 мес. старения

Показатель	Значения показателей для составов			
	247-1472	247-45TZ2	247-45М	247-М7
Содержание влаги в равновесом состоянии, %	0,93	1,4	1,3	2,4
Температура стеклования, °С	84 / 96	48 / 60	62 / 72	29 / 49
Модуль упругости в высокоэластическом состоянии, МПа	22 / 31	16 / 19	26 / 30	17 / 21
Степень сшивки $\nu \cdot 10^3$, моль/см^3	2,4 / 3,3	1,7 / 2,0	2,8 / 3,2	1,8 / 2,3

Примечание. В числителе указаны значения показателей для образцов в равновесом состоянии, в знаменателе – после сушки.

Для составов 247-1472 и 247-45М температура стеклования даже после значительного увлажнения преимущественно превышает температуру испытаний. Поэтому материал сохраняет стеклообразное состояние и демонстрирует умеренное снижение прочности. Для составов 247-45TZ2 и 247-М7 сорбция воды приводит к приближению значения T_g к комнатной температуре либо к переходу части материала в высокоэластическое состояние. Этим объясняется резкое нелинейное снижение прочности.

Таким образом, чувствительность полимера Этал-247 к присутствию влаги определяется совместным действием сорбционной емкости, свободного объема, концентрации полярных групп, исходной температуры стеклования, уровня T_g относительно температуры испытаний и структурной однородности материала. После проникновения в полимер молекулы воды взаимодействуют с гидроксильными, эфирными и другими полярными группами. При малом влагосодержании отдельные молекулы воды могут участвовать в формировании дополнительных водородных связей, однако по мере дальнейшей сорбции преобладают увеличение сегментальной подвижности и ослабление межмолекулярных взаимодействий. Макроскопически это проявляется в уменьшении значений T_g, E_t и σ_t.

Сравнение морфологических и механических свойств показывает, что состояние поверхности может влиять на начальную стадию поступления воды, но не определяет чувствительность к влаге самостоятельно. Состав 247-М7 сочетает выраженную поверхностную неоднородность, максимальные влагосодержание и снижение прочности. Вместе с тем состав 247-45TZ2 при отсутствии многочисленных крупных открытых полостей также демонстрирует снижение прочности более чем на 90 %. Следовательно, в наибольшей степени на влагочувствительность влияют объемное строение полимерной сетки и вызываемое водой изменение ее релаксационного состояния.

Высокая прочность состава 247-1472 в высушенном состоянии согласуется с формированием сравнительно жесткой полимерной сетки. Низкое равновесное влагосодержание дополнительно ограничивает эксплуатационную пластификацию. Состав 247-45М также сохраняет более половины исходной прочности при предельном увлажнении, чему способствуют низкое предельное влагосодержание и сохранение температуры стеклования выше температуры испытаний. Состав 247-45TZ2 характеризуется

сочетанием повышенной сорбционной емкости и высокой чувствительности к начальному поступлению воды.

Зависимость $\sigma_t(w)$ имеет практическое значение. С эксплуатационной точки зрения прочность эпоксидного материала нельзя характеризовать одним значением, поскольку влагосодержание изменяется во времени под действием температуры, дождей, росы и относительной влажности воздуха. После климатического старения прочность высушенного материала не всегда является максимальной: при наличии участка антипластификации или вследствие структурных изменений она может совпадать с минимальным значением либо находиться внутри эксплуатационного диапазона. Поэтому прочность следует описывать неравенством

$$\sigma_{\min}(t) \le \sigma_{эксп}(t, w) \le \sigma_{\max}(t), \quad (7)$$

где $\sigma_{min}(t)$, $\sigma_{max}(t)$ – соответственно минимальное и максимальное значения прочности материала после заданного срока старения t в реально достигаемом диапазоне влагосодержания; $\sigma_{эксп}(t, w)$ – эксплуатационная прочность материала при влагосодержании w.

Для составов 247-45TZ2 и 247-M7 необходимо учитывать выраженную нелинейность зависимости уже при начальном увлажнении, поскольку линейная интерполяция может завышать прогнозируемую прочность при промежуточном влагосодержании. Для составов 247-1472 и 247-45M линейная аппроксимация является более приемлемой. При длительном климатическом старении коэффициенты аппроксимации могут изменяться, однако в пределах реально достигаемого влагосодержания общий вид зависимостей сохраняется.

Для корректной оценки климатической стойкости механические характеристики материала целесообразно определять в двух состояниях: непосредственно после экспозиции и после полного удаления сорбированной влаги. Такое сопоставление позволяет разделить обратимые изменения, обусловленные текущим влагосодержанием, и необратимые структурные изменения материала.

Общее изменение прочности можно представить выражением

$$\Delta\sigma_{общ}(t, w) = \Delta\sigma_{необр}(t) + \Delta\sigma_{пл}(t, w), \quad (8)$$

где $\Delta\sigma_{необр}$ характеризует необратимое изменение прочности вследствие старения полимерной сетки, а $\Delta\sigma_{пл}$ – обратимую составляющую, связанную с текущим влагосодержанием.

При монотонном снижении прочности с увеличением влагосодержания обратимую составляющую можно оценить следующим образом:

$$\Delta\sigma_{пл} = \sigma_{сух}(t) - \sigma_{влаж}(t, w), \quad (9)$$

где $\sigma_{сух}(t)$ − прочность материала после заданного срока старения и последующего высушивания; $\sigma_{влаж}(t, w)$ − прочность материала при влагосодержании w.

Однако выражение (9) применимо только в области устойчивого пластифицирующего снижения прочности. При наличии участка антипластификации, на котором прочность при малом влагосодержании может возрастать относительно высушенного состояния, зависимость $\sigma_t(w)$ следует описывать по отдельным участкам либо исключать область антипластификации из количественной оценки пластифицирующего эффекта. С учетом сезонного чередования процессов сорбции и десорбции область антипластификации в натурных условиях, как правило, не формируется как устойчивое эксплуатационное состояние.

Такой подход позволяет избежать завышенной оценки необратимой деградации в случаях, когда снижение механических характеристик обусловлено преимущественно

присутствием сорбированной воды и в значительной степени устраняется после сушки. Этот подход применим для оценки свойств эпоксидных материалов после пребывания в самых разнообразных условиях [3, 27], в том числе в условиях космического пространства [28].

Заключения

В высушенном состоянии предел прочности при растяжении эпоксидного полимера Этал-247 снижается с ~70 до ~34 МПа, а модуль упругости – с 2700 до 1970 МПа в ряду отвердителей Этал-1472, Этал-45TZ2, Этал-45М и Этал-М7.

Исследование исходных неразрушенных образцов методом РЭМ выявило различия морфологии поверхностного слоя. Наиболее однородная поверхность характерна для состава 247-1472, тогда как образец 247-М7 содержит многочисленные открытые полости размером несколько микрометров.

Морфологическая неоднородность состава 247-М7 согласуется с повышенной сорбционной емкостью, однако данные РЭМ не позволяют непосредственно установить объемную пористость или плотность сшивки. Состояние поверхности следует рассматривать как дополнительный фактор начального поступления воды.

Увеличение влагосодержания приводит к снижению прочности всех исследованных составов. Характер и интенсивность зависимости $\sigma_t(w)$ определяются типом отвердителя. При предельном влагонасыщении прочность уменьшается на ~42, ~45, ~91 и ~95 % для составов с отвердителями Этал-1472, Этал-45М, Этал-45TZ2 и Этал-М7 соответственно.

Составы с отвердителями Этал-45TZ2 и Этал-М7 наиболее чувствительны к начальному поступлению воды. Половина общего снижения прочности достигается на первых ~25 и ~16 % полного диапазона влагосодержания соответственно.

Наибольшее равновесное и предельное влагосодержание установлено для состава 247-М7: 4,7±0,1 и 7,4±0,1 % соответственно.

Снижение прочности и модуля упругости связано преимущественно с пластифицирующим действием воды. Исследования методом ДМА показали уменьшение температуры стеклования увлажненных образцов на 10–20°С в зависимости от отвердителя.

Резкое снижение прочности составов с отвердителями Этал-45TZ2 и Этал-М7 объясняется приближением температуры стеклования увлажненного материала к температуре механических испытаний и увеличением сегментальной подвижности полимерной сетки.

Для оценки работоспособности полимера Этал-247 в атмосферных условиях прочность следует определять в нескольких влажностных состояниях. Результаты испытаний без сушки необходимо рассматривать как сочетание обратимого пластифицирующего эффекта и необратимого изменения структуры.

Наиболее стабильный уровень прочности при увлажнении выявлен для составов с отвердителями Этал-1472 и Этал-45М. Применение отвердителей Этал-45TZ2 и Этал-М7 требует учета фактического влагосодержания и возможного снижения температуры стеклования.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124103100044-8 «Разработка принципов и технологий создания перспективных для Севера и Арктики полимерных конструкционных материалов на основе комплексного исследования структуры, свойств, технологических переделов и деструкции в экстремальных условиях холодного климата»).

Список источников

1. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
2. 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). С. 122–144. URL: https://www.journal.viam.ru (дата обращения: 31.07.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
4. Abiodun M.-I.B., Oluwole O.I., Damilola A.A. et al. Applications of epoxy resin: adhesives, coatings, and composites // Epoxy: Materials, Applications and Advanced Technologies. London: IntechOpen, 2025. P. 1–15. DOI: 10.5772/intechopen.1012261.
5. Corcione C.E., Freuli F., Frigione M. Cold-curing structural epoxy resins: analysis of the curing reaction as a function of curing time and thickness // Materials. 2014. Vol. 7. P. 6832–6842. DOI: 10.3390/ma7096832.
6. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Судьин Ю.И., Чертищев В.Ю. К вопросу о ремонте лопастей несущего винта вертолетной техники из полимерных композиционных материалов в полевых условиях // Труды ВИАМ. 2024. № 4 (134). С. 83–97. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 31.07.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-83-97.
7. Lettieri M., Frigione M. Natural and artificial weathering effects on cold-cured epoxy resins // Journal of Applied Polymer Science. 2011. Vol. 119. P. 1635–1645.
8. He W., Jiang X., He R. et al. A review on the aging behavior of BADGE-based epoxy resin // Buildings. 2025. Vol. 15. Art. 2450. DOI: 10.3390/buildings15142450.
9. Singh K.K., Singh A.K., Singh A. Environmental degradation of carbon/epoxy advanced polymer matrix composites // Journal of Materials Science: Composites. 2025. Vol. 6. Art. 13. DOI: 10.1186/s42252-025-00078-6.
10. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 2. Новые подходы к оценке коррозивности приморских атмосфер // Коррозия: материалы, защита. 2016. № 1. С. 1–15.
11. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. 1. Оценка влияния значимых факторов воздействия // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 12. С. 7–16.
12. Startsev V.O., Lebedev M.P., Khrulev K.A. et al. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers // Polymer Testing. 2018. Vol. 65. P. 281–296.
13. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Панин С.В. Влагоперенос в углепластике с деструктированной поверхностью // Доклады Академии наук. 2015. Т. 461. № 4. С. 433–436.
14. Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Кан А.Ч., Старцев В.О. Исследование климатической стойкости гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминия и арамидного органопластика // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). С. 34–44. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 31.07.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-34-44.
15. Николаев Е.В., Славин А.В., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы (к 120-летию Г.В. Акимова) // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). С. 117–130. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 31.07.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-117-130.
16. Joo J.-H., Jeong J.-R., Yim Y.-J. et al. Recent advances in epoxy resin applications // COJ Technical & Scientific Research. 2025. Vol. 5. Art. 000612. DOI: 10.31031/COJTS.2025.05.000612.
17. Блазнов А.Н., Журковский М.Е., Фирсов В.В. и др. Исследование физико-механических свойств связующего на основе отвердителя Этал-45М // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 3 (27). С. 100–107.
18. Канаева Н.С. Прогнозирование динамической усталости эпоксидных полимеров с учетом климатического воздействия: дис. … канд. техн. наук. Саранск, 2023. 275 с.

19. Блазнов А.Н., Самойленко В.В., Фирсов В.В. и др. Исследование потери упругих свойств стеклопластиков на основе эпоксидных связующих с отвердителями Этал в результате химического старения в растворе NaOH // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 6. С. 91–94. DOI: 10.25699/p7780-1227-2890-v.
20. ГОСТ 11262–2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2018. 28 с.
21. ГОСТ Р 56762–2015. Композиты полимерные. Метод определения влагопоглощения и равновесного состояния. М.: Стандартинформ, 2016. 36 с.
22. ISO 6721-1:2019. Plastics – Determination of dynamic mechanical properties – Part 1: General principles. Geneva: International Organization for Standardization, 2019. 23 p.
23. Huang J., Fu P., Li W. et al. Influence of crosslinking density on the mechanical and thermal properties of plant oil-based epoxy resin // RSC Advances. 2022. Vol. 12. P. 23048–23056. DOI: 10.1039/d2ra04206a.
24. Startsev O.V., Startsev V.O., Kogan A.M., Vardanyan A.M. Changes in the plasticizing effect of moisture during climatic aging of polymer composite materials // Russian Metallurgy (Metally). 2024. Vol. 2024. No. 2. P. 413–422. DOI: 10.31044/1814-4632-2024-1-16-26.
25. Startsev V.O., Molokov M.V., Grebeneva T.A., Tkachuk A.I. Dynamic mechanical and thermomechanical analysis of reversible plasticization of epoxy-diane resin-diaminodiphenylsulfon system by moisture // Polymer Science. Series A. 2017. Vol. 59. No. 5. P. 640–648. DOI: 10.1134/S0965545X17050157.
26. Taysun M.B., Dam-Johansen K., Bi H. Hydrogen bonding and anti-plasticization in epoxy coatings: Molecular insights into water uptake and network stability // Progress in Organic Coatings. 2025. Vol. 209. Art. 109602. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2025.109602.
27. Корниенко Г.В., Старцев О.В., Кротов А.С., Коваль Т.В. Моделирование зависимости модуля сдвига углепластика от времени увлажнения и влагосодержания // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 3 (80). С. 161–178. URL: https://www.journal.viam.ru (дата обращения: 31.07.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-161-178.
28. Startsev O.V., Nikishin E.F. Ageing of polymeric composite materials in outer space // Mehanika kompozitnyh materialov. 1993. T. 29. № 4. C. 457–467.

References

1. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
2. 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), pp. 122–144. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: July 31, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of Polymer Composite Materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
4. Abiodun M.-I.B., Oluwole O.I., Damilola A.A. et al. Applications of epoxy resin: adhesives, coatings, and composites. *Epoxy: Materials, Applications and Advanced Technologies*. London: IntechOpen, 2025, pp. 1–15. DOI: 10.5772/intechopen.1012261.
5. Corcione C.E., Freuli F., Frigione M. Cold-curing structural epoxy resins: analysis of the curing reaction as a function of curing time and thickness. *Materials*, 2014, vol. 7, pp. 6832–6842. DOI: 10.3390/ma7096832.
6. Barannikov A.A., Veshkin E.A., Sudin Yu.I., Chertischev V.Yu. To the issue of helicopter rotor blades repair from polymer composite materials in field conditions. *Trudy VIAM*, 2024, no. 4 (134), p. 83–97. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: July 31, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-83-97.
7. Lettieri M., Frigione M. Natural and artificial weathering effects on cold-cured epoxy resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, vol. 119, pp. 1635–1645.

8. He W., Jiang X., He R. et al. A review on the aging behavior of BADGE-based epoxy resin. *Buildings*, 2025, vol. 15, art. 2450. DOI: 10.3390/buildings15142450.
9. Singh K.K., Singh A.K., Singh A. Environmental degradation of carbon/epoxy advanced polymer matrix composites. *Journal of Materials Science: Composites*, 2025, vol. 6, art. 13. DOI: 10.1186/s42252-025-00078-6.
10. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Corrosivity of a Marine Atmosphere. Part 2. New Approaches to Assessing the Corrosivity of Marine Atmospheres. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2016, no. 1, pp. 1–15.
11. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic Aging of Polymer Composite Materials for Aviation Applications. 1. Assessment of the Influence of Significant Exposure Factors. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2019, no. 12, pp. 7–16.
12. Startsev V.O., Lebedev M.P., Khrulev K.A. et al. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers. *Polymer Testing*, 2018, vol. 65, pp. 281–296.
13. Kablov E.N., Startsev O.V., Panin S.V. Moisture Transport in Carbon-Fiber-Reinforced Plastic with a Degraded Surface. *Doklady Akademii nauk*, 2015, vol. 461, no. 4, pp. 433–436.
14. Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Kan A.Ch., Startsev V.O. Research of the climate stability of hybrid layered metal polymer materials based on aluminium and aramid organoplastics. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), pp. 34–44. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: July 31, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-34-44.
15. Nikolaev E.V., Slavin A.V., Startsev V.O., Laptev A.B. Modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems (to the 120th anniversary of G.V. Akimov). *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), pp. 117–130. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: July 31, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-117-130.
16. Joo J.-H., Jeong J.-R., Yim Y.-J. et al. Recent advances in epoxy resin applications. *COJ Technical & Scientific Research*, 2025, vol. 5, art. 000612. DOI: 10.31031/COJTS.2025.05.000612.
17. Blaznov A.N., Zhurkovsky M.E., Firsov V.V. et al. Investigation of the Physico-Mechanical Properties of a Binder Based on the Etal-45M Hardener. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik*, 2019, no. 3 (27), pp. 100–107.
18. Kanaeva N.S. *Prediction of Dynamic Fatigue in Epoxy Polymers Subjected to Climatic Exposure*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Saransk, 2023, 275 p.
19. Blaznov A.N., Samoilenko V.V., Firsov V.V. et al. Investigation of the Loss of Elastic Properties in Fiberglass-Reinforced Plastics Based on Epoxy Binders with Etal Hardeners Due to Chemical Aging in an NaOH Solution. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik*, 2020, no. 6, pp. 91–94. DOI: 10.25699/p7780-1227-2890-v.
20. State Standard 11262–2017. *Plastics. Tensile Test Method*. Moscow: Standartinform, 2018, 28 p.
21. State Standard R 56762–2015. *Polymer Composites. Method for Determining Moisture Absorption and Equilibrium State*. Moscow: Standartinform, 2016, 36 p.
22. ISO 6721-1:2019. *Plastics – Determination of dynamic mechanical properties – Part 1: General principles.* Geneva: International Organization for Standardization, 2019, 23 p.
23. Huang J., Fu P., Li W. et al. Influence of crosslinking density on the mechanical and thermal properties of plant oil-based epoxy resin. *RSC Advances*, 2022, vol. 12, pp. 23048–23056. DOI: 10.1039/d2ra04206a.
24. Startsev O.V., Startsev V.O., Kogan A.M., Vardanyan A.M. Changes in the plasticizing effect of moisture during climatic aging of polymer composite materials. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2024, vol. 2024, no. 2, pp. 413–422. DOI: 10.31044/1814-4632-2024-1-16-26.
25. Startsev V.O., Molokov M.V., Grebeneva T.A., Tkachuk A.I. Dynamic mechanical and thermomechanical analysis of reversible plasticization of epoxy-diane resin-diaminodiphenylsulfon system by moisture. *Polymer Science. Series A*, 2017, vol. 59, no. 5, pp. 640–648. DOI: 10.1134/S0965545X17050157.
26. Taysun M.B., Dam-Johansen K., Bi H. Hydrogen bonding and anti-plasticization in epoxy coatings: Molecular insights into water uptake and network stability. *Progress in Organic Coatings*, 2025, vol. 209, art. 109602. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2025.109602.

27. Kornienko G.V., Startsev O.V., Krotov A.S., Koval T.V. Dependence modeling of the CFRP shear modulus on moisture content. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 161–178. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: July 31, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-161-178.
28. Startsev O.V., Nikishin E.F. Ageing of polymeric composite materials in outer space. *Mehanika kompozitnyh materialov*, 1993, vol. 29, no. 4, pp. 457–467.

Информация об авторах

Лукачевская Ирина Геннадьевна, заведующая лабораторией, к.т.н., ЯНЦ СО РАН, presidium@prez.ysn.ru
Старцев Олег Владимирович, старший научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Низин Дмитрий Рудольфович, старший научный сотрудник, к.т.н., ЯНЦ СО РАН, presidium@prez.ysn.ru
Дьяконов Афанасий Афанасьевич, старший научный сотрудник, к.т.н., ЯНЦ СО РАН, presidium@prez.ysn.ru
Терешкин Айсен Леонидович, младший научный сотрудник, ЯНЦ СО РАН, presidium@prez.ysn.ru

Information about the authors

Irina G. Lukachevskaia, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), Yakut Scientific Centre SB RAS, presidium@prez.ysn.ru
Oleg V. Startsev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Dmitriy R. Nizin, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), Yakut Scientific Centre SB RAS, presidium@prez.ysn.ru
Afanasiy A. Dyakonov, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), Yakut Scientific Centre SB RAS, presidium@prez.ysn.ru
Aisen L. Tereshkin, Junior Researcher, Yakut Scientific Centre SB RAS, presidium@prez.ysn.ru

Статья поступила в редакцию 21.08.2026; получена после доработки 25.08.2026;
одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.08.2026.
The article was submitted 21.08.2026; received in revised from 25.08.2026;
approved and accepted for publication after reviewing 27.08.2026.