

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691:620.17

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_18

Обратимое и необратимое изменение свойств полимерных материалов в процессе натурного климатического старения

Д.Р. Низин, Т.А. Низина, В.П. Селяев, Н.С. Канаева

Дмитрий Рудольфович Низин

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
Саранск, Российская Федерация; Научно-исследовательский институт строительной физики
РААСН, Москва, Российская Федерация

nizindi@yandex.ru

Татьяна Анатольевна Низина

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
Саранск, Российская Федерация; Научно-исследовательский институт строительной физики
РААСН, Москва, Российская Федерация

nizinata@yandex.ru

Владимир Павлович Селяев

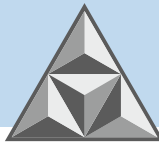
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
Саранск, Российская Федерация; Научно-исследовательский институт строительной физики
РААСН, Москва, Российская Федерация

ntorm80@mail.ru

Надежда Сергеевна Канаева

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
Саранск, Российская Федерация; Научно-исследовательский институт строительной физики
РААСН, Москва, Российская Федерация

aniknadya@yandex.ru



Представлены результаты исследования влияния влажностного состояния эпоксидных полимеров на изменение их упруго-прочностных характеристик в процессе натурального климатического старения в умеренно-континентальном климате. В качестве объекта исследования выбран полимерный материал, полученный на основе модифицированной эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителя Этал-45М. По результатам проведенных исследований установлено подобие кривых изменения предела прочности образцов при растяжении в предельных равновесно-влажностных состояниях – высушенном и влагонасыщенном. В зависимости от длительности натурального климатического старения, диапазон варьирования предела прочности образцов при растяжении в предельных влажностных состояниях составляет от 14 до 33% от значения предела прочности в высушенном состоянии. Выявлен и количественно оценен синергетический эффект между необратимыми структурными изменениями полимерной матрицы, происходящими под действием факторов окружающей среды, и сорбированной влагой, выражающийся как в расширении, так и сужении диапазона обратимого влияния влаги. Установлено, что для поздних этапов натурального климатического старения образцов эпоксидных полимеров на основе эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителя Этал-45М характерно возникновение точки максимума относительных удлинений при растяжении, не совпадающей при этом с точкой, соответствующей высушенному состоянию.

Ключевые слова: полимерные материалы, эпоксидные полимеры, влагосодержание, предел прочности при растяжении, относительное удлинение, обратимые изменения, необратимые изменения, синергетические изменения

Для цитирования:

Низин Д.Р., Низина Т.А., Селяев В.П., Канаева Н.С. Обратимое и необратимое изменение свойств полимерных материалов в процессе натурального климатического старения // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 1. С. 18-29. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N1_2022

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_18



RESEARCH PAPER

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_18

Reversible and irreversible changes in the properties of polymer materials during full-scale climatic aging

D.R. Nizin, T.A. Nizina, V.P. Selyaev, N.S. Kanaeva

Dmitry R. Nizin

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

nizindi@yandex.ru

Tatyana A. Nizina

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

nizinata@yandex.ru

Vladimir P. Selyaev

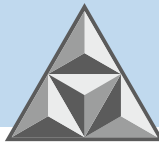
National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

ntorm80@mail.ru

Nadezhda S. Kanaeva

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

aniknadya@yandex.ru



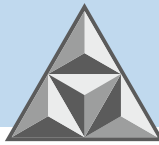
The paper provides the results of studying the effect of the moisture state of epoxy polymers on the change in their elastic-strength parameters during natural climatic aging in a temperate continental climate. The object of the study was a polymer material based on Etal-247 modified epoxy resin and Etal-45M hardener. Based on the results of the studies, we determined the similarity of the curves of the change in the tensile strength of the samples under tension in the limiting equilibrium-moisture states (dried and moisture-saturated). Depending on the duration of natural climatic aging, the range of variation in the tensile strength of samples in extreme moisture conditions is from 14 to 33% of the tensile strength in the dried state. The synergistic effect between irreversible structural changes in the polymer matrix under the effect of environmental factors and adsorbed moisture has been identified and quantified, which is expressed both in the expansion and contraction of the reversible moisture range effect. It has been established that for the late stages of natural climatic aging of epoxy polymer samples based on Etal-247 epoxy resin and Etal-45M hardener, a point of maximum elongation under tension does not coincide with the point corresponding to the dried state.

Key words: polymer materials, epoxy polymers, deformation curves, damage accumulation, fractal analysis, minimal coverage method

For citation:

Nizin, D.R., Nizina, T.A., Selyaev, V.P. & Kanaeva N.S. (2022) Reversible and irreversible changes in the properties of polymer materials during full-scale climatic aging, *Smart Composite in Construction*, 3(1), pp. 18-29 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N1_2022 (In Russian)

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_18



ВВЕДЕНИЕ

Полимерные материалы нашли практически повсеместное применение во всех существующих областях промышленности. По аналогии с другими материалами, основное требование, предъявляемое к изделиям и конструкциям на полимерной основе, заключается в обеспечении эксплуатационной надежности на протяжении всего срока эксплуатации. Однако решение поставленной задачи крайне осложнено в условиях действия природных климатических факторов, влиянию которых подвержены практически все изделия и конструкции вне зависимости от своего функционального назначения и природы. Это обусловлено высокой сложностью климатического воздействия как для анализа, так и для воспроизведения в лабораторных условиях с достаточной точностью и полнотой. Результаты исследования климатической стойкости полимерных материалов, полученные в лабораторных условиях, характеризуются крайне слабой корреляцией с изменениями, протекающими в структуре полимеров при натурном климатическом старении [1-3]. Это не позволяет рассматривать современные лабораторные методы оценки климатической стойкости полимерных материалов в качестве источника получения достоверной информации о реальных процессах климатического старения, что неоднократно отмечалось в научных источниках [4-12].

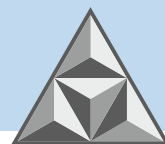
Поскольку полное воспроизведение действия окружающей среды в искусственных условиях на данный момент не представляется возможным вследствие недостаточного уровня инструментально-технического развития, то исследование и понимание феноменов, возникающих в структуре полимеров в процессе эксплуатации, позволит существенно расширить возможности прогнозирования изменения их свойств. Один из таких феноменов заключается в обратимости изменения физико-механических свойств эпоксидных полимеров в зависимости от содержания сорбированной влаги. Согласно авторским исследованиям и данным, представленным в научной литературе [13-17], разброс прочностных показателей в предельных равновесно-влажностных состояниях (влажноссыщенном и высушенном) достигает 30% для авиационных композитов и 50% для ненаполненных эпоксидных полимеров. Как следствие, в процессе эксплуатации полимерных композитов необходимо учитывать не только необратимые изменения свойств, вызванные деградацией поверхностных слоёв изделия, разупорядочиванием волокон наполнителя, фотодеструкции и химических превращений полимерной матрицы, но и обратимые изменения, обусловленные процессами сорбции и десорбции атмосферной влаги.

Цель работы заключается в оценке обратимого и необратимого изменения упруго-прочностных характеристик образцов эпоксидных полимеров в процессе натурального климатического старения в зависимости от их влагосодержания.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования были выбраны образцы полимерного материала на основе эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителя Этал-45М производства АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ». Этал-247 представляет собой модифицированную эпоксидную смолу с массовой долей эпоксидных групп не менее 21,4–22,8 % и вязкостью по Брукфильду при 25 оС в диапазоне 650–750 СПз. Отвердитель Этал-45М – смесь ароматических и алифатических ди- или полиаминов, модифицированная салициловой кислотой.

Механические испытания образцов (тип 2 согласно ГОСТ 11262-2017) на растяжение



проводились с помощью разрывной машины серии AGS-X с программным обеспечением TRAPEZIUM X при температуре (23 ± 2) оС и относительной влажности воздуха $(50\pm 5)\%$. Скорость перемещения зажимов испытательной разрывной машины составляла 2 мм/мин.

Экспонирование образцов проводилось на испытательных стендах научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (г. Саранск, умеренно-континентальный климат). Определение физико-механических показателей осуществлялось для контрольных образцов и через 2, 5, 10 и 18 месяцев натурального экспонирования.

Для установления влияния влажностного состояния на изменение физико-механических показателей эпоксидных полимеров под действием натуральных климатических факторов, серия из 36 параллельно экспонированных образцов делилась на три равные партии, которые испытывались:

- сразу после снятия с испытательной площадки (серия «без кондиционирования»);
- после сушки при 60 оС до постоянной массы в соответствии с ГОСТ Р 56762-2015. Композиты полимерные. Метод определения влагопоглощения и равновесного состояния» (серия «высушенные»);
- после увлажнения при относительной влажности $(98\pm 2)\%$ до постоянной массы в соответствии с ГОСТ Р 56762-2015 (серия «влагонасыщенные»).

Кондиционирование образцов осуществлялось в соответствии с ГОСТ 12423-2013. Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов. Изменение массы образцов осуществлялось с помощью электронных весов марки GR-200 с точностью измерения 0,0001 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

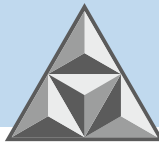
Изменение массы образцов после сушки и увлажнения по вышеуказанным режимам представлено в таблице 1. В зависимости от влажностного состояния образцов после снятия с испытательных стендов в процессе сушки и увлажнения до постоянной массы наблюдается снижение и прирост массы образцов на $0,67\div 1,09\%$ и $1,09\div 1,94\%$ соответственно. В зависимости от длительности натурального климатического старения размах изменения массы образцов составил от 2,09 до 2,72%, причем наибольшее значение было зафиксировано для образцов в контрольном состоянии.

Таблица 1. Изменение массы образцов полимера Этал-247/Этал-45М в процессе их сушки и увлажнения до постоянной массы

Table 1. Change in the mass of polymer samples Etal-247/Etal-45M during their drying and humidification to a constant mass

| Влажностное состояние образцов | Длительность натурального экспонирования, мес. | | | | |
|--------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 2 | 5 | 10 | 18 |
| Влагонасыщенное | 1,94 | 1,42 | 1,75 | 1,09 | 1,39 |
| Высушенное | -0,79 | -0,67 | -0,69 | -1,09 | -0,79 |

Снижение прочностных показателей исследуемых полимеров при повышении влажности образцов в контрольном состоянии до их равновесного влагонасыщения (по сравнению с высушенными) достигает 28,6% (рис. 1). Пределы прочности при растяжении



серий образцов состава Этал-45М/Этал-247 в равновесно-влажностном и высушенном состоянии близки и составляют около 37 МПа.

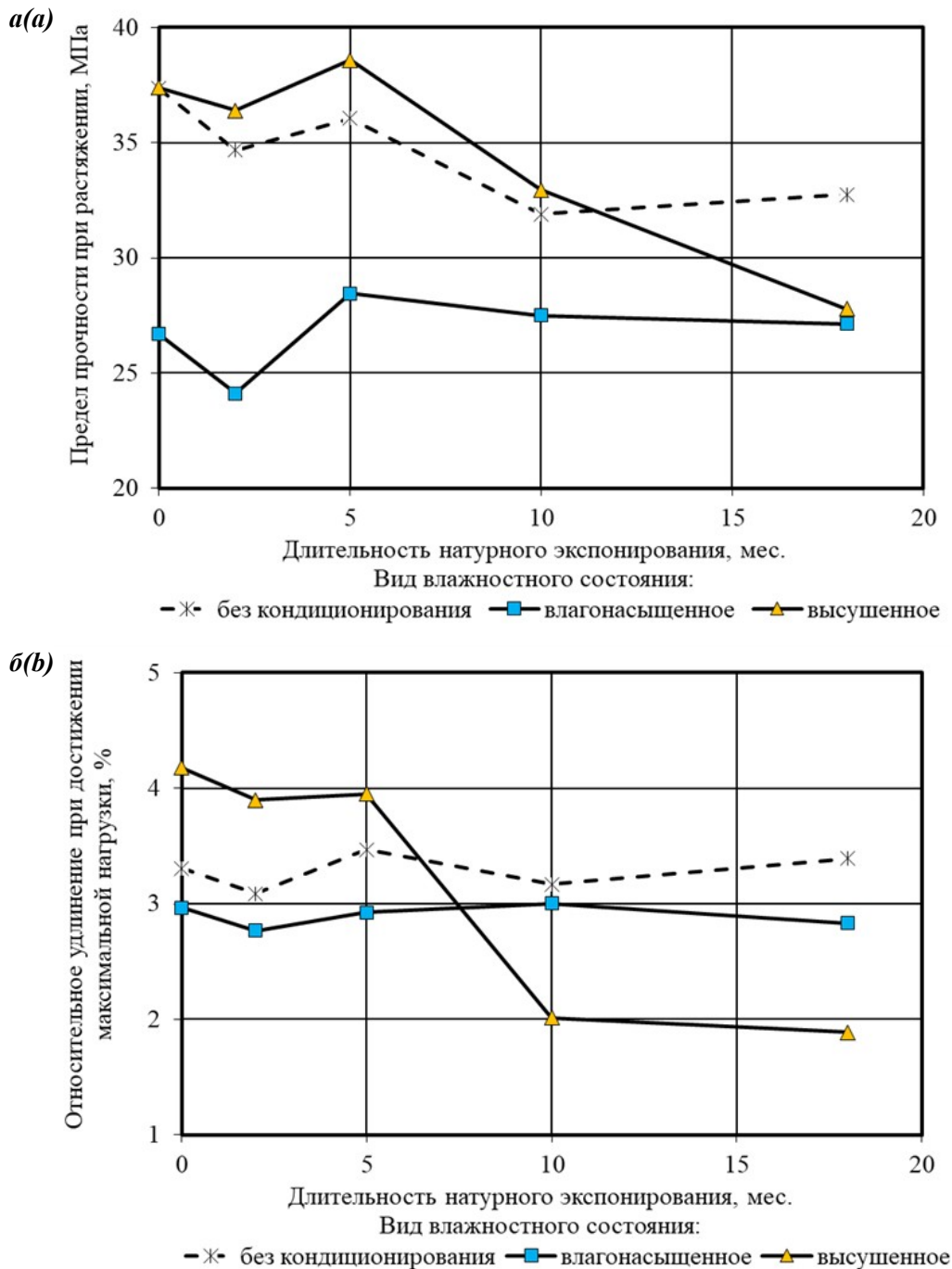


Рис. 1. Изменение предела прочности при растяжении (а) и относительного удлинения (б) при достижении образцами эпоксидного полимера Этал-247/Этал-45М максимальной нагрузки от длительности натурального экспонирования в условиях умеренно-континентального климата с учетом их влажностного состояния

Fig. 1. The change in the tensile strength (a) and elongation (b) when the samples of the epoxy polymer Etal-247/Etal-45M reach the maximum load from the duration of full-scale exposure in a temperate continental climate, taking into account their humidity state

Изменение средних значений предела прочности при растяжении и относительного удлинения образцов эпоксидного полимера при достижении максимальной нагрузки в

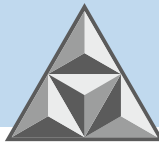


различном влажностном состоянии в зависимости от длительности климатического воздействия представлено на рис. 1. Установлено, что натурное экспонирование полимерных образцов исследуемого состава без дополнительной сушки и увлажнения сопровождается снижением прочностных показателей за весь период натурального времени экспонирования (1,5 года) не более чем на 15% (рис. 1, а). При этом влагонасыщение образцов способствует дополнительному уменьшению предела прочности при растяжении, достигающему 24–35% от исходного значения (до начала натурального экспонирования).

Прочностные показатели высушенных образцов, длительность натурального климатического воздействия которых не превышает 10 месяцев, выше аналогичных показателей для образцов, не подвергнутых дополнительному высушиванию (см. рис. 1, а). Подобное восстановление свойств относят к обратимому изменению прочностных показателей вследствие удаления свободной влаги. Помимо этого, с увеличением длительности натурального экспонирования наблюдается постепенное сужение диапазона варьирования прочностных показателей полимерных образцов во влагонасыщенном и высушенном состояниях. Через 18 месяцев натурального климатического воздействия различие прочностных показателей составляет всего 0,7 МПа. При этом предел прочности при растяжении для образцов, не подвергнутых дополнительному кондиционированию, выше аналогичного показателя в предельных влажностных состояниях на 15–18%. Очевидно для данной длительности натурального климатического воздействия наличие в структуре полимерной матрицы сорбированной влаги выступает в качестве механизма, компенсирующего необратимые изменения. При этом для состояния образцов в возрасте более 18 месяцев очевидно наличие некоторой точки оптимума влагосодержания, которой соответствует наибольшее значение предела прочности при растяжении. По аналогии с пластифицирующим действием влаги, можно предположить постепенное снижение вклада синергетического эффекта, проанализированного в работе [15], от максимального значения в точке, соответствующей влагонасыщенному состоянию, до нуля в точке, соответствующей высушенному состоянию.

Анализ изменения деформативных показателей полимера Этал-247/Этал-45М показал (см. рис. 1, б), что до 5 месяцев натурального экспонирования снижение влагосодержания приводит к уменьшению относительного удлинения при достижении образцами максимальных растягивающих нагрузок. Однако при дальнейшем повышении длительности климатического воздействия до 10 и 18 месяцев характер взаимного расположения средних значений относительного удлинения при растяжении в различных влажностных состояниях существенно меняется. В частности, сериям образцов в высушенном состоянии соответствуют наименьшие значения данного показателя, влагонасыщенным – промежуточные, а сериям «до кондиционирования» – наибольшие. Резкое снижение относительного удлинения при растяжении свидетельствует об изменении характера разрушения полимера при удалении из его структуры физически связанной воды на хрупкое разрушение, что также подтверждается и отсутствием на соответствующих кривых деформирования участка высокоэластических деформаций.

Проведем анализ различий в изменении предела прочности при растяжении в высушенном и влагонасыщенном состоянии для различного времени экспонирования (таблица 2). Он позволяет установить существование синергетического эффекта $\Delta R_{\text{синерг.}}$ между необратимыми структурными изменениями полимерной матрицы $\Delta R_{\text{необр.}}$, протекающими под действием факторов окружающей среды, и сорбированной влаги, а также количественно оценить его вклад в результирующее значение прочности. При этом, предполагая существование различия в изменении структуры полимерной матрицы после 2,



5, 10 и 18 месяцев натурального экспонирования, возникающий синергетический эффект может проявляться как в расширении (рис. 2, а), так и сужении (рис. 2, б) диапазона обратимого изменения механической прочности образцов $\Delta R_{обр}$.

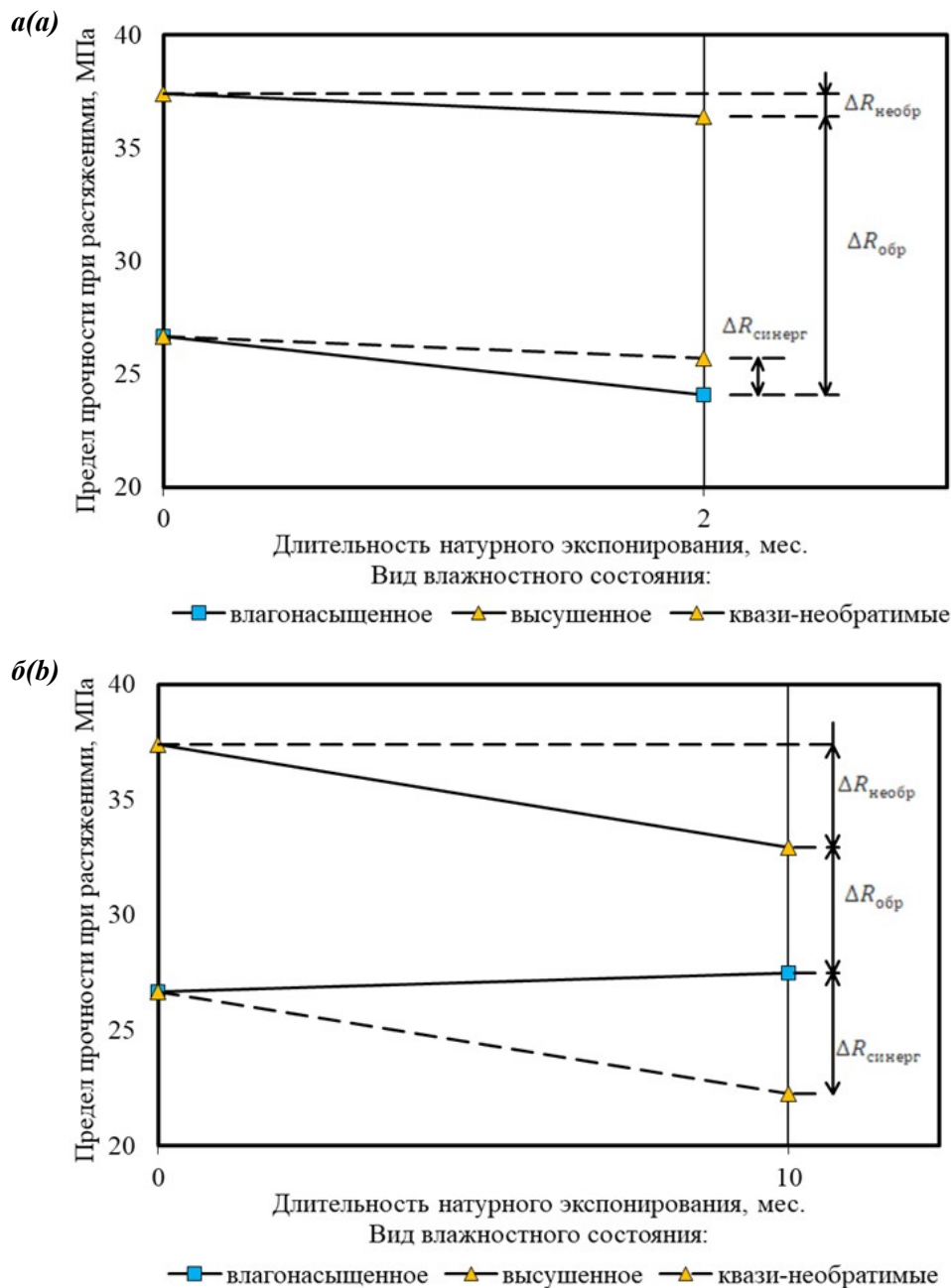
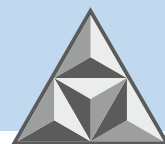


Рис. 2. Соотношение обратимых, необратимых и синергетических изменений механической прочности образцов эпоксидных полимеров после 2 (а) и 10 (б) месяцев натурального экспонирования в условиях умеренно-континентального климата

Fig. 2. The ratio of reversible, irreversible and synergetic changes in the mechanical strength of epoxy polymer samples after 2 (a) and 10 (b) months of full-scale exposure in a temperate continental climate

Числовые значения обратимых, необратимых и синергетических изменений прочностных показателей эпоксидного полимера состава Этал-247/Этал-45М относительно исходного состояния образцов в высушенном состоянии после натурального воздействия различной длительности представлены в таблице 2. Выявлено существенное снижение обратимых изменений прочностных показателей исследуемого полимера с увеличением



длительности натурального воздействия, составляющее к 18 месяцам климатического воздействия всего 0,6 МПа. Необратимое изменение свойств к этому же временному интервалу по сравнению с прочностью полимера в высушенном состоянии составляет 25,7%, синергетические изменения достигают 10,1 МПа.

Таблица 2. Абсолютные значения необратимых, обратимых и синергетических изменений механической прочности образцов после натурального экспонирования в условиях умеренно-континентального климата

Table 2. Absolute values of irreversible, reversible and synergetic changes in the mechanical strength of samples after full-scale exposure in a temperate continental climate

| $\Delta R_{\text{необр}}$ $\Delta R_{\text{обр}}$ $\Delta R_{\text{синерг}}$ Длительность натурного экспонирования, мес. | Необратимые изменения, МПа | Обратимые изменения, МПа | Синергетические изменения, МПа |
|---|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 0 | - | 10,7 | - |
| 2 | -1 | 12,3 | -1,6 |
| 5 | 1,2 | 10,1 | 0,6 |
| 10 | -4,4 | 5,5 | 5,2 |
| 18 | -9,6 | 0,6 | 10,1 |

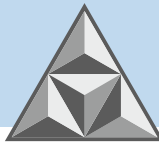
ВЫВОДЫ

Анализ результатов проведенных исследований показал, что содержание сорбированной влаги представляет собой значимый источник обратимых изменений упруго-прочностных показателей полимеров на основе эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителя Этал-45М. Выявлен и количественно оценен синергетический эффект между необратимыми структурными изменениями полимерной матрицы, возникающими в процессе натурального климатического старения, и сорбированной влагой. В зависимости от длительности натурального климатического старения, диапазон варьирования предела прочности образцов при растяжении в различных влажностных состояниях составляет от 14 до 33% от значения предела прочности в высушенном состоянии.

Наличие в структуре полимерной матрицы сорбированной влаги на поздних этапах климатического старения может выступать в качестве механизма, компенсирующего необратимые изменения, произошедшие в структуре полимерной матрицы в процессе натурального климатического старения. По аналогии с пластифицирующим действием влаги, можно предположить постепенное снижение вклада рассматриваемого синергетического эффекта от максимального значения в точке, соответствующей влагонасыщенному состоянию, до нуля в точке, соответствующей высушенному состоянию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Abdelkader Dehbi, Abdel-Hamid I. Mourad, Amar Bouaza** Degradation assessment of LDPE multilayer films used as a greenhouse cover: Natural and artificial aging impacts // *Journal of Applied Polymer Science*. 2011. Vol. 124, no. 4. P. 2702-2716.
2. **Ефимов В.А., Кириллов В.Н., Добрянская О.А., Николаев Е.В., Шведкова А.К.** Методические вопросы проведения натуральных климатических испытаний полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. № 4(17). С. 25-31.
3. **Lettieri M., Frigione M.** Natural and artificial weathering effects on cold-cured epoxy resins // *Journal*



of Applied Polymer Science. 2011. Vol. 119, no. 3. P. 1635-1645.

4. **Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н.** Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. № 11. С. 19–27.
5. **Startsev O.V., Krotov A.S., Golub P.D.** Effect of climatic and radiation ageing on properties of glass fiber reinforced plastic VPS-7 // *International journal of polymeric materials*. 1998. Vol. 41, no. 3–4. P. 26-273.
6. **Kablov E.N., Startsev V.O.** Climatic aging of aviation polymer composite materials: I. influence of significant factors // *Russian metallurgy (Metally)*. 2020. No. 4. P. 364-372.
7. **Старцев В.О.** Методы исследования старения полимерных связующих // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2020. №9. С. 16-26.
8. **Бабенко Ф.И., Герасимов А.А.** Механизмы разрушения и прочность конструкционных пластмасс в холодном климате с учетом старения // *Наука и образование*. 2006. № 1. С. 84–87.
9. **Реутов А.И.** Прогнозирование климатической стойкости полимерных материалов, применяемых в строительстве // *Вестник ТГАСУ*. 2009. № 2. С. 127–141.
10. **Nizin D.R., Nizina T.A., Selyaev V.P., Chernov A.N., Gorenkova A.I.** Natural Climatic Aging of Epoxy Polymers Tasking into Account the Seasonality Impact // *Key engineering materials*. 2019. Vol. 799. P. 159-165.
11. Климатические испытания строительных материалов / под общ. ред. О.В. Старцева, В.Т. Ерофеева, В.П. Селяева. М.: Изд-во АСВ, 2017. 558 с.
12. **Павлов Н.Н.** Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. М.: Химия, 1982. 224 с.
13. **Старцев В.О., Низина Т.А.** Обратимое воздействие влаги на механические свойства эпоксидных полимеров при климатическом старении // *Фундаментальные исследования и последние достижения в области защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов и сложных технических систем в различных климатических условиях: материалы конф.* / ФГУП ВИАМ. 14-15 июля 1916 г., г. Геленджик. URL: <https://conf.viam.ru/conf/194/proceedings>.
14. **Startsev V.O., Lebedev M.P., Khrulev K.A., Molokov M.V., Frolov A.S., Nizina T.A.** Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers // *Polymer testing*. 2018. T. 65. P. 281-296.
15. **Старцев В.О., Плотников В.И., Антипов Ю.В.** Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях // *Труды ВИАМ*. 2018. № 5. С. 110-118.
16. **Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р.** Климатическая стойкость эпоксидных полимеров в умеренно континентальном климате: монография. Саранск: Изд-во Мордов. гос. Ун-та, 2020. 188 с.
17. **Низина Т.А., Низин Д.Р., Канаева Н.С., Климентьева Д.А., Порватова А.А.** Влияние влажностного состояния на кинетику накопления повреждений в структуре образцов эпоксидных полимеров под действием растягивающих напряжений // *Эксперт: теория и практика*. 2022. № 1. С. 37-45.

Поступила в редакцию 09.03.2022

Одобрена после рецензирования 16.03.2022

Принята к опубликованию 22.03.22



REFERENCES

1. **Dehbi Abdelkader, Abdel-Hamid I. Mourad & Amar Bouaza** (2011) Degradation assessment of LDPE multilayer films used as a greenhouse cover: Natural and artificial aging impacts, *Journal of Applied Polymer Science*, 124(4), pp. 2702-2716.
2. **Efimov, V.A., Kirillov, V.N., Dobryanskaya, O.A., Nikolaev, E.V. & Shvedkova A.K.** (2010) Methodological issues of conducting full-scale climatic tests of polymer composite materials, *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, (4), pp. 25–31 (in Russian).
3. **Lettieri, M. & Frigione, M.** (2011) Natural and artificial weathering effects on cold-cured epoxy resins, *Journal of Applied Polymer Science*, 119(3), pp. 1635-1645.
4. **Kablov, E.N., Startsev, O.V., Krotov, A.S. & Kirillov, V.N.** (2010) Climatic aging of composite materials for aviation purposes. I. Mechanisms of aging, *Deformaciya i razrushenie materialov*, (11), pp.19–27(in Russian).
5. **Startsev, O.V., Krotov, A.S. & Golub, P.D.** (1998) Effect of climatic and radiation ageing on properties of glass fiber reinforced plastic VPS-7, *International journal of polymeric materials*, 41(3–4), pp. 263–273.
6. **Kablov, E.N. & Startsev, V.O.** (2020) Climatic aging of aviation polymer composite materials: I influence of significant factors. *Russian metallurgy (Metally)*, (4), pp. 364-372.
7. **Startsev, V.O.** (2020) Methods of studying the aging of polymer binders, *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, (9), pp.16-26 (in Russian).
8. **Babenko, F.I.** (2006) Fracture mechanisms and strength of engineering plastics in cold climates with aging taken into account, *Nauka i obrazovanie*, (1), pp. 84–87 (in Russian).
9. **Reutov, A.I.** (2009) Prediction of the climatic resistance of polymer materials used in construction, *Vestnik TGASU*, (2), pp. 127–141 (in Russian).
10. **Nizin, D.R., Nizina, T.A., Selyaev, V.P., Chernov, A.N. & Gorenkova, A.I.** (2019) Natural Climatic Aging of Epoxy Polymers Taking into Account the Seasonality Impact, *Key engineering materials*, 799, pp. 159-165.
11. **Startseva, O.V., Erofeeva, V.T. & Selyaeva, V.P.** (eds.). (2017) *Climatic tests of building materials*. M.: ASV Publishing House (in Russian).
12. **Pavlov, N.N.** (1982) *Aging of plastics in natural and artificial conditions*. M.: Chemistry (in Russian).
13. **Startsev, V.O. & Nizina, T.A.** (2016) Reversible effect of moisture on the mechanical properties of epoxy polymers during climatic aging, *Fundamental'nye issledovaniya i poslednie dostizheniya v oblasti zashchity ot korrozii, stareniya i biopovrezhdenij materialov i slozhnykh tekhnicheskikh sistem v razlichnykh klimaticheskikh usloviyah: materialy konf. / FGUP VIAM. 14-15 iyulya 1916 g., g. Gelendzhik* [online]. Available at: <https://conf.viam.ru/conf/194/proceedings> (in Russian).
14. **Startsev, V.O., Lebedev, M.P., Khrulev, K.A., Molokov, M.V., Frolov, A.S. & Nizina, T.A.** (2018) Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers, *Polymer testing*, 65, pp. 281-296.
15. **Startsev, V.O., Plotnikov, V.I. & Antipov, Yu.V.** (2018) Reversible effects of moisture in determining the mechanical properties of PCM under climatic influences, *Trudy VIAM*, (5), pp. 110–118 (in Russian).
16. **Nizina, T.A., Selyaev, V.P. & Nizin, D.R.** (2020) *Climatic resistance of epoxy polymers in a temperate continental climate*. Saransk: Publishing House MRSU (in Russian).
17. **Nizina, T.A., Nizin, D.R., Kanaeva, N.S., Klimenteva, D.A. & Porvatova, A.A.** (2022) Influence of moisture state on the kinetics of damage accumulation in the structure of epoxy polymer samples under the action of tensile stresses, *Ekspert: teoriya i praktika*, (1), pp. 37-45 (in Russian).

Received 09.03.2022

Approved after reviewing 16.03.2022

Accepted 22.03.22