



УДК 691:620.17

АНАЛИЗ КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТРУКТУРЕ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ, ЭКСПОНИРОВАННЫХ В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННО- КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА

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

Татьяна Анатольевна Низина

E-mail: nizinata@yandex.ru

Владимир Павлович Селяев

E-mail: ntorm80@mail.ru

Дмитрий Рудольфович Низин

E-mail: nizindi@yandex.ru

Надежда Сергеевна Канаева

E-mail: aniknadya@yandex.ru

Денис Александрович Артамонов

E-mail: denartam@gmail.com

*Кафедра строительных конструкций, Национальный
исследовательский Мордовский государственный университет им.
Н.П. Огарёва, ул. Большевистская, 68, Саранск, Российская
Федерация, 430005*



В работе на примере двух видов полимерных композитов, значительно различающихся климатической стойкостью, проанализирована кинетика накопления повреждений при экспонировании в условиях умеренно-континентального климата. Сущность предложенной методики заключается в анализе изменения индекса фрактальности, определяемого с помощью метода наименьшего покрытия по кривым деформирования при растяжении, фиксируемым с высокой частотой снятия показаний (0,01 сек.). Числовые значения индексов фрактальности определялись из анализа предшествующего временного участка, соответствующего 16 (2^4) экспериментальным точкам, т.е. 0,16 сек. Уровни «критических» состояний соответствовали минимальным значениям индексов фрактальности, ранжированных для исследуемых кривых деформирования от начала нагружения до уровня достижения образцами максимальных растягивающих напряжений. Натурное климатическое старение исследуемых полимеров проводилось в течение одного календарного года. Фиксация изменения упруго-прочностных характеристик образцов проводилась через 45, 90, 180, 270 и 360 суток.

На основе проведенного исследования выявлены существенные различия в кинетике накопления повреждений эпоксидных полимеров под действием растягивающих напряжений, в том числе в зависимости от вида эпоксидной смолы и отвердителя, а также длительности натурального экспонирования. Установлено, что для климатически нестойких составов уже после 180 суток климатического воздействия наблюдается группирование «критических» точек в ансамбли, близкие по времени, уровню напряжений и относительных удлинений при растяжении. Для климатически стойких полимеров, напротив, наблюдается более равномерное распределение «критических» точек по кривым деформирования, что, очевидно, позволяет им успешно перераспределять возникающие перенапряжения на работоспособные структурные элементы и, как следствие, воспринимать значительно большие уровни растягивающих нагрузок и относительных деформаций.

Ключевые слова: эпоксидные полимеры, кривые деформации, накопление повреждений, фрактальный анализ, метод минимального покрытия

Для цитирования:

Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р., Канаева Н.С., Артамонов Д.А. Анализ кинетики накопления повреждений в структуре эпоксидных полимеров, экспонированных в условиях умеренно-континентального климата. Умные композиты в строительстве. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 27-35 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020

DOI: 10.52957/27821919_2020_1_27



UDC 691:620.17

KINETICS OF DAMAGE ACCUMULATION IN THE STRUCTURE OF EPOXY POLYMERS EXPOSED IN A TEMPERATE CONTINENTAL CLIMATE

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

Tatyana A. Nizina

E-mail: nizinata@yandex.ru

Vladimir P. Selyaev

E-mail: ntorm80@mail.ru

Dmitry R. Nizin

E-mail: nizindi@yandex.ru

*Department of Building structures, National Research Mordovia State
University, 68, Bolshhevistskaya St., Saransk, 430005, Russia*

Nadezhda S. Kanaeva

E-mail: aniknadya@yandex.ru

Denis A. Artamonov

E-mail: denartam@gmail.com



The study deals with the kinetics of damage accumulation during exposure in a temperate climate. The research uses two types of polymer composites of significantly different climatic resistance as an example. The proposed method is the analysis of changes in the fractality index determined by the least-coverage method by tensile strain curves recorded with a high reading frequency (0.01 sec.). The fractality indices were calculated by analyzing the preceding time section that corresponds to 16 (24) experimental points, i.e., 0.16 sec. The levels of "critical" states corresponded to the minimum values of fractality indices ranged for the studied deformation curves from the beginning of loading to the level of reaching maximum tensile stresses by the specimens. The study included a field experiment on climatic aging of the studied polymers for one calendar year. We have recorded the changes in the elastic-strength characteristics of the samples after 45, 90, 180, 270 and 360 days.

The results of the study showed significant differences in the damage accumulation kinetics of epoxy polymers impacted by tensile stresses, including those depending on the type of epoxy res-in and hardener, as well as the duration of full-scale exposure. It was found that for climatically unstable compositions after just 180 days of climatic there is a grouping of "critical" points into ensembles similar in time, stress level, and relative elongation after stretching. At the same time, the climatic resistant polymers have a more uniform distribution of "critical" points along the deformation curves, which obviously allows them to successfully redistribute the occurring overstresses onto the workable structural elements and, consequently, to accept significantly higher levels of tensile loads and relative deformations.

Key words: epoxy polymers, strain curves, damage accumulation, fractal analysis, minimum coverage method

For citation:

Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Artamonov D.A. Kinetics of damage accumulation in the structure of epoxy polymers exposed in a temperate continental climate. Smart Composite in Construction. 2020. V. 1. N 1. P. 27-35 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020

DOI: 10.52957/27821919_2020_1_27



ВВЕДЕНИЕ

Задача обеспечения надежной эксплуатации строительных изделий и конструкций, подвергаемых натурному климатическому воздействию, становится все более актуальной год от года. Рост негативного влияния факторов окружающей среды (солнечная радиация, загрязняющие вещества, перепады температуры и влажности, ветровые нагрузки и т.д.) приводит к необходимости защиты элементов зданий и сооружений с целью повышения их долговечности.

Применительно к бетонным и железобетонным изделиям и конструкциям наиболее эффективным способом защиты является использование покрытий на основе полимерных материалов. Однако, в процессе натурной эксплуатации в условиях комплексного воздействия климатических факторов происходит старение полимерных композитов, сопровождаемое накоплением в структуре покрытий микрорезультатов и повреждений, приводящих со временем к разрушению. Поэтому при разработке составов защитных полимерных покрытий необходимо учитывать их климатическую стойкость, оценку которой целесообразно проводить на основе результатов натурных испытаний.

Активное внедрение в последние годы в практику научных исследований современного испытательного оборудования, оснащенного программным обеспечением, представляющим собой высокоточную систему сбора и регистрации результатов, приводит к накоплению больших объемов экспериментальных данных, для обработки и анализа которых требуется применение специально разработанных методик. В частности, при испытании композиционных материалов как на сжатие [1, 2], так и на растяжение [3, 4] идет фиксация данных с частотой в 0,01 сек., что позволяет получать для каждого образца, в зависимости от скорости нагружения и его прочностных показателей, объемы данных, содержащих, в среднем, от 1,5 до 150 тыс. строк [5]. Разработка полученных массивов данных, в том числе с привлечением методов фрактального исчисления, позволяет получить новую ценную информацию о процессе деформирования, а также разработать методики оценки количественных значений «критических» точек процесса нагружения композиционных материалов под действием механических нагрузок, что, без сомнения, является важной материаловедческой задачей.

Характерной особенностью полимерных композиционных материалов является наличие сложной многоуровневой структуры, приводящей к существенным различиям в характере разрушения различных видов полимеров [6]. В научной литературе приводятся исследования влияния степени структурной неоднородности композиционных материалов на их поведение под действием статических и ударных нагрузок. Показано [7], что именно высокая степень структурной неоднородности полимеров, заложенная на этапе формирования, является ключевым фактором, влияющим на его физико-механические свойства. В частности, при динамическом деформировании в материале возникает развитая иерархия структурных уровней деформации, которая обуславливает самосогласованное деформирование и разрушение всего объема материала. В работе [8] доказано, что при изучении процессов деформирования и разрушения полимеров в рамках методологии физической

мезомеханики необходимо учитывать иерархию структурных уровней и связанную с ней иерархию масштабных уровней концентраторов напряжений, возникающих при их нагружении.

Именно структурная неоднородность композиционных строительных материалов даже при относительно небольших уровнях механических напряжений может приводить к разрыхлению ослабленных зон, с которых впоследствии и начинается разрушение композитов. При этом процесс разрушения имеет дискретно-непрерывный характер, развивающийся во времени, характеризующийся протеканием множественного зарождения, развития и агрегации различного рода дефектов вплоть до появления макротрещин, приводящих к разрушению образца [9-13].

В авторских исследованиях [1-5, 14] для анализа процесса нагружения различных композитов под действием механических нагрузок предложен алгоритм, основанный на использовании метода фрактального анализа временных рядов, получаемых с высокой частотой фиксации показаний, позволяющий количественно определять координаты «критических» точек кривых деформирования, свидетельствующих о возникновении в структуре композитов определенных «трудностей» (точек бифуркации). Для определения изменения значений индексов фрактальности, позволяющих выявлять «критические» уровни напряжений и деформаций в процессе нагружения строительных композитов, предложено использовать метод наименьшего покрытия, изложенный в работах [15, 16], являющийся наиболее легко реализуемым даже для временных рядов больших объемов.

В данной работе на примере двух видов полимерных композитов, значительно отличающихся по уровню климатической стойкости в условиях умеренно-континентального климата, будут проанализированы различия в кинетике накопления повреждений, оцениваемой по изменению индексов фрактальности временных рядов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методика определения координат «критических» точек кривых деформирования полимерных образцов в процессе нагружения изложена в работах [5, 14]. Для определения индекса фрактальности μ при анализе участка кривой деформирования полимерных композитов использовалась последовательность m вложенных разбиений, где $m = 2^n$, где $n = 0, 1, 2, 3, 4$. При этом для каждой точки кривой деформирования исследовался предшествующий временной интервал, соответствующий 16 (2^4) экспериментальным точкам, т.е. 0,16 с. После завершения анализа первого участка обработки осуществлялся переход к следующему, смещенному относительно предыдущего на 0,01 с. Каждое разбиение состояло из 2^n интервалов, содержащих 2^{4-n} экспериментальных точек. Для каждого разбиения

$$\omega_m = [a = t_0 < t_1 < \dots < t_m = b],$$

в зависимости от шага δ ($\delta = (b - a)/m$) вычисляли амплитудную вариацию $V_f(\delta)$ по формуле [15, 16]:

$$V_f(\delta) = \sum_{i=1}^m K_i(\delta), \quad (1)$$



где $K_f(\delta)$ определяли как разницу между максимальным и минимальным приростом напряжения при растяжении на временном интервале $[t_{i-1}, t_i]$. В данном случае точка "а" характеризует начало исследуемого участка длиной 0,16 с, точка "б" – его окончание.

По коэффициенту β уравнения регрессии $\log(V_f(\delta)) = \alpha_0 + \beta \times \log(\delta)$, определенному с помощью метода наименьших квадратов, определяли индекс фрактальности и размерность минимального покрытия для каждого исследуемого участка:

$$\mu = -\beta; D_\mu = 1 + \mu. \quad (2)$$

Расчет индексов фрактальности кривых деформирования производился с помощью авторского программного продукта, реализованного на языке Python.

В качестве объектов исследования были выбраны полимеры, получаемые на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), отверждаемой отвердителем Этал-1460 (ТУ 2257-010-18826195-99), а также модифицированной эпоксидной смолы Этал-247 (ТУ 2257-247-18826195-07), отверждаемой Этал-1472 (ТУ 2257-1472-18826195-05). Используемые отвердители представляют собой смесь ароматических и алифатических ди- или полиаминов. Массовые доли эпоксидных групп для смол ЭД-20 и Этал-247 близки и составляют, соответственно, 20,0-22,5 % и 21,4-22,8 %. При этом вязкость модифицированной эпоксидной смолы Этал-247 в 20-22 раза ниже, чем у ЭД-20, что является положительным фактом при использовании данных составов в качестве защитных покрытий бетонных и железобетонных строительно-технических конструкций.

Разработанная методика по определению количественных характеристик диаграмм деформирования полимерных композитов при растяжении, основанная на использовании метода фрактального анализа временных рядов, была применена для исследования процесса нагружения эпоксидных полимеров растягивающей нагрузкой как в контрольном состоянии, так и после 45, 90, 180, 270 и 360 суток климатического старения.

Натурное экспонирование образцов проводилось на испытательных стендах научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева (Саранск) с 1 декабря в течение одного календарного года. Для проведения механических испытаний составов полимерных композитов на растяжение использовалась разрывная машина серии AGS-X с программным обеспечением TRAPEZIUM X. Частота фиксации значений напряжений и деформаций составляла 0,01 сек. Испытания проводились на образцах «восьмерках» (тип 2) в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» при температуре 23 ± 2 °C и относительной влажности воздуха 50 ± 5 %. Скорость перемещения зажимов испытательной разрывной машины составляла 2 мм/мин.

На основе экспериментальных исследований установлено (см. табл.), что прочностные характеристики полимера ЭД-20 + Этал-1460 характеризуются резким снижением прочностных и деформативных показателей уже к 180 суткам натурального экспонирования.

Таблица. Изменение упруго-прочностных показателей эпоксидных полимеров в процессе натурального климатического старения в условиях умеренно-континентального климата

Table. Changes in the elastic-strength parameters of epoxy polymers in the process of natural climate aging in a temperate continental climate

| Длительность натурального экспонирования, сутки | Упруго-прочностные показатели эпоксидных полимеров | | | |
|---|--|--|--------------------------------------|--|
| | ЭД-20 + Этал-1460 | | Этал-247 + Этал-1472 | |
| | Предел прочности при растяжении, МПа | Относительное удлинение при максимальной нагрузке, % | Предел прочности при растяжении, МПа | Относительное удлинение при максимальной нагрузке, % |
| 0 | <u>47,16</u> 1,00 | <u>8,18</u> 1,00 | <u>50,92</u> 1,00 | <u>10,76</u> 1,00 |
| 45 | <u>42,67</u> 0,90 | <u>6,43</u> 0,79 | <u>50,80</u> 1,00 | <u>8,76</u> 0,81 |
| 90 | <u>34,98</u> 0,74 | <u>4,23</u> 0,52 | <u>51,28</u> 1,01 | <u>8,55</u> 0,79 |
| 180 | <u>16,37</u> 0,35 | <u>1,40</u> 0,17 | <u>53,36</u> 1,05 | <u>8,39</u> 0,78 |
| 270 | <u>12,56</u> 0,27 | <u>1,07</u> 0,13 | <u>49,00</u> 0,96 | <u>7,63</u> 0,71 |
| 360 | <u>14,52</u> 0,31 | <u>1,22</u> 0,15 | <u>50,83</u> 1,00 | <u>8,50</u> 0,79 |

Примечание * в числителе приведены абсолютные значения, в знаменателе – относительные.

При этом полимер на основе модифицированной эпоксидной смолы Этал-247, отверждаемый Этал-1472, практически не меняет своих прочностных показателей даже через год натурального экспонирования. Представленные в таблице данные получены по результатам статистической обработки 12 параллельно-испытанных образцов исследуемых полимеров.

Типичный пример получаемых по авторской методике графических зависимостей изменения индекса фрактальности кривой деформирования образца эпоксидного полимера (ЭД-20 + Этал-1460, 0 сут.) представлен на рис. 1. Координаты «критических» точек, соответствующих наименьшим уровням индексов фрактальности, выделены кружочками красного (№ 1, 2) и желтого цветов (№ 3-15). В данном исследовании область анализа ограничивалась точкой на кривой деформирования, соответствующей уровню достижения образцом максимальных растягивающих напряжений.

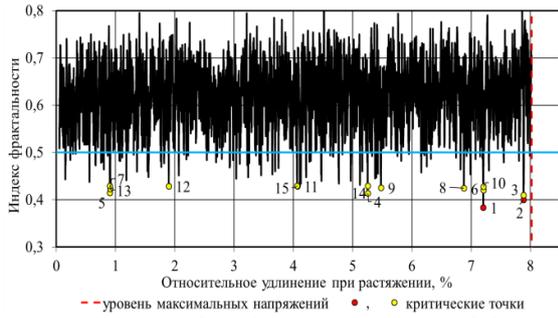
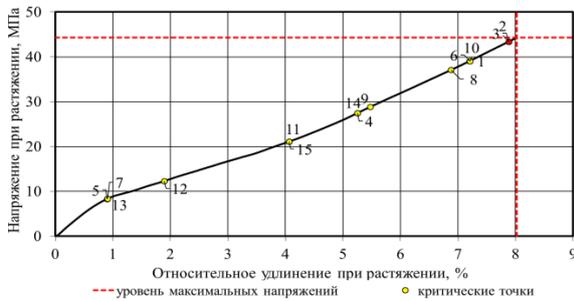


Рис. 1. Изменение индекса фрактальности кривой деформирования образца эпоксидного полимера ЭД-20+Этал-1460 при растяжении в зависимости от относительного удлинения при растяжении с нанесенными «критическими» точками, определенными методом фрактального анализа
Fig. 1. Change in the fractal index of the deformation curve sample of Ed-20+Etal-1460 epoxy polymer under tension depending on the relative elongation at tension with the applied critical points defined by fractal analysis

a



б

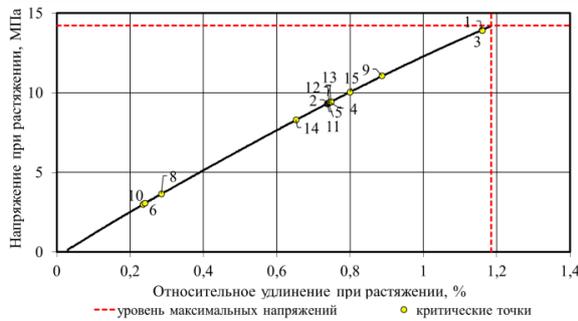
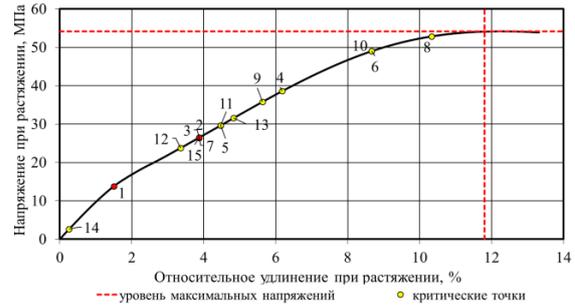


Рис. 2. Кривые деформирования полимера состава ЭД-20 + Этал-1460 при растяжении с нанесенными «критическими» точками, определенными методом фрактального анализа: а – 0; б – 360 сут. натурального экспонирования
Fig. 2. The curves of deformation of a polymer composition Ed-20 + Etal-1460 when stretched with «critical» points applied, defined by the fractal analysis method: а – 0; б – 360 days of full-scale exposure

a



б

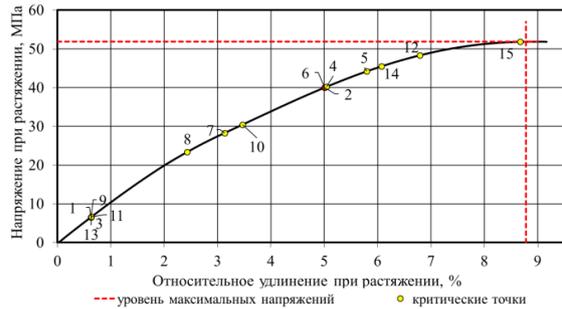


Рис. 3. Кривые деформирования полимера состава Этал-247 + Этал-1472 при растяжении с нанесенными «критическими» точками, определенными методом фрактального анализа: а – 0; б – 360 сут. натурального экспонирования
Fig. 3. The curves of deformation of a polymer composition Etal-247 + Etal-1472 when stretched with «critical» points applied, defined by the fractal analysis method: а – 0; б – 360 days of full-scale exposure

Кривые деформирования с нанесенными на них «критическими» точками для двух вышеперечисленных составов в исходном состоянии и через 360 сут. натурального экспонирования приведены на рис. 2, 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из анализа представленных данных наглядно видно, что экспонирование образцов эпоксидных полимеров в условиях воздействия природных факторов приводит к охрупчиванию, выражаемому в данном случае в снижении относительного удлинения при растяжении (см. табл., рис. 2, 3). При этом, если для полимера состава Этал-247 + Этал-1472 через 360 суток натурального экспонирования наблюдается (рис. 3) снижение деформативности на 21 %, то для полимера ЭД-20 + Этал-1460 – от 8,18 до 1,22 %, т.е. более, чем в 6,5 раз (рис. 2), причем уменьшение относительного удлинения почти на 50 % наблюдается уже к 90 суткам натурального экспонирования (см. табл.).

Перенос критических точек, определенных с помощью разработанного метода фрактального анализа, на кривые « $\sigma - \epsilon$ » позволил наглядно проследить наиболее критические уровни напряжений и деформаций (рис. 2, 3). Комплексный анализ полученных на всех временных интервалах климатического старения данных свидетельствует о более равномерном распределении «критических» точек в процессе нагружения образцов, обладающих более высоким



комплексом свойств. Данный процесс накопления повреждений наиболее характерен для контрольных образцов (до климатического воздействия), а также климатически стойких полимеров, в частности, Этал-247 + Этал-1472 (рис. 2,а, 3). При этом концентрация нескольких точек бифуркации на близких временных участках приводит к лавинообразному разрушению образцов при малых деформациях и уровнях разрушающих нагрузок. Типичным примером таких процессов служат кривые деформирования для состава ЭД-20 + Этал-1460, определенные на образцах не только после года натурального экспонирования (рис. 2,б), а уже через 180 и 270 суток. Кроме того, для ряда исследуемых партий образцов выявлена вариативность «критических» уровней напряжений и деформаций в зависимости от исследуемого образца, что, предположительно, связано с существованием в структуре «особых» образцов пор и первичных дефектов.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показали, что для получения наиболее объективной картины о процессе накопления повреждений в структуре полимерных композитов различных составов, в том числе и в ходе климатического старения, необходимо проводить статистическую обработку результатов всех исследуемых образцов одной серии. При этом наибольшая частота фиксации минимальных значений индекса фрактальности для определенных уровней относительного удлинения и напряжений при растяжении будет свидетельствовать о достижении критических состояний полимеров. Предложенный подход для исследования механизма деформирования композиционных материалов при растяжении, осуществляемый на основе метода фрактального анализа кривых деформирования, регистрируемых с помощью современного испытательного оборудования с высокой частотой, позволяет получить ценную информацию о процессе накопления в его структуре микро- и макродефектов, приводящих к разрушению композитов.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-01050 А «Исследование влияния интенсивности воздействия климатических факторов на характер разрушения полимерных композитов и прогнозирование их долговечности в условиях натурального воздействия».

* This work was supported by the RFBR grant No. 18-08-01050.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селяев В.П., Низина Т.А., Бальков А.С., Низин Д.Р., Балбалин А.В. Фрактальный анализ кривых деформирования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов при сжатии. Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. 2016. №1. С. 129-146. DOI: 10.15593/permt.mech/2016.1.09.
2. Nizina T.A., Balykov A.S., Nizin D.R., Korovkin D.I. Using fractal analysis methods in studying mechanisms of deformation and destruction of nano-modified cement concretes. Int. J. Nanotechn. 2019. 16 (6/7/9/10). P. 484-495. DOI: 10.1504/IJNT. 2019. 106620.
3. Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Balykov A.S., Korovkin D.I., Kanaeva N.S. Application of fractal analysis methods in the study of deformation mechanisms and composite building materials fracture. IOP Conf. Series: Mat. Sci. Eng. 2018. V 456 (1): 012058. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012058.
4. Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Kuznetsov N.M., Artyamonov D.A. Applying the Fractal Analysis Methods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses. Key Eng. Mat. 2019. N 799. P. 217-223. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.217.
5. Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р., Канаева Н.С. Количественный анализ кинетики накопления повреждений в структуре полимерных материалов при растяжении. Стр-во и реконструкция. 2020. №2. С. 77-89. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-77-89.
6. Аскадский А.А., Матвеев Ю. И. Химическое строение и физические свойства полимеров. М.: Химия. 1983. 248 с
7. Стужляк П.Д., Букетов А.В., Панин С.В., Марущак П.О., Мороз К.М., Полтаранин М.А., Вухерер Т., Корниенко Л.А., Люшкин Б.А. Структурные уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении. Физ. мезомеханика. 2014. Т. 17. № 2. С. 65-83.
8. Клошниченко А.Б., Панин С.В., Старцев О.В. Исследование деформации и разрушения на мезо- и макромасштабном уровнях армированных пластиков при статическом и циклическом растяжении. Физ. мезомеханика. 2002. Т. 5. № 3. С. 101-116.
9. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука. 1994. 384 с.
10. Зайцев Ю.В. Моделирование деформации и прочности бетона методами механики разрушения. М.: Стройиздат. 1982. 196 с.
11. Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Неверов В.А., Селяев П.В. Фрактальные модели разрушения бетона. Регион. архитектура и стр-во. 2015. № 1. С. 11-22.
12. Селяев В.П., Безрукова Е.С., Кечуткина Е.Л., Селяев В.В. Статистическая модель дискретно-непрерывного (квантового) механизма разрушения фрактальной структуры цементных композитов. Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: мат. Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Селяева В.П. (3-5 дек. 2019 г.). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2019. С. 308-317.
13. Травуш В.И., Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л. О возможном квантовом характере деформации и разрушения композитов. Пром. и граждан. стр-во. 2016. № 9. С. 94-100.
14. Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р., Артымонов Д.А., Канаева Н.С. Фрактальный анализ кривых деформирования эпоксидных полимеров при растяжении. Полимеры в стр-ве. 2019. № 1 (7). С. 48-57.
15. Dubovikov M.M., Starchenko N.S. Variation index and its applications to analysis of fractal structures. Sci. Alm. Gordon. 2003. N 1. P. 1-30.



16. **Dubovikov M.M., Starchenko N.S., Dubovikov M.S.** Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series. *Phys. A.* 2004. N 339. P. 591-608. DOI:10.1016/j.physa.2004.03.025.

Поступила в редакцию 11.09.2020

Принята к опубликованию 12.10.2020

REFERENCES

- Selyaev V.P., Nizina T.A., Balykov A.S., Nizin D.R., Balbalin A.V.** Fractal analysis of deformation curves of fiberreinforced fine-grained concretes under compression. *PNRPU Mech. Bulletin.* 2016. N 1. P. 129-146. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.09 (in Russian).
- Nizina T.A., Balykov A.S., Nizin D.R., Korovkin D.I.** Using fractal analysis methods in studying mechanisms of deformation and destruction of nano-modified cement concretes. *Int. J. Nanotechn.* 2019. 16 (6/7/9/10). P. 484-495. DOI: 10.1504/IJNT.2019.106620
- Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Balykov A.S., Korovkin D.I., Kanaeva N.S.** Application of fractal analysis methods in the study of deformation mechanisms and composite building materials fracture. *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.* 2018. V 456 (1):012058. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012058.
- Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Kuznetsov N.M., Artamonov D.A.** Applying the FractalAnalysisMethods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses. *Key engineering materials.* 2019. N 799. P. 217-223. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.217.
- Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Kanaeva N.S.** Quantitative analysis of the kinetics of damage accumulation in the structure of polymer materials under tension. *Construction and reconstruction.* 2020. N 2. P. 77-89. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-77-89 (in Russian).
- Askadsky A.A., Matveev Yu.I.** Chemical structure and physical properties of polymers. Moscow: Chemistry. 1983. 248 p. (in Russian).
- Stukhlyak P.D., Buketov A.V., Panin S.V., Marushchak P.O., Moroz K.M., Poltaranin M.A., Vukherer T., Kornienko L.A., Lyukshin B.A.** Structural levels of destruction of epoxy composite materials under impact loading. *Fiz. mezomekhanika.* 2014. N 2. P. 65-83 (in Russian).
- Klyushnichenko A.B., Panin S.V., Startsev O.V.** Investigation of deformation and fracture at meso-and macroscale levels of reinforced plastics under static and cyclic tension. *Fiz. mezomekhanika.* 2002. V. 5. N 3. P.101-116 (in Russian).
- Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oksogoev A.A.** *Synergetics and fractals in science of materials.* Moscow: Nauka. 1994. 384 p. (in Russian).
- Zaitsev Yu.V.** Modelling of deformation and strength of the concrete by methods fracture mechanics. Moscow: Stroyizdat.1982. 196 p. (in Russian).
- Selyaev V.P., Kupriyashkina L.I., Neverov V.A., Selyaev P.V.** Fractal models of destruction of concretes. *Reg. architecture and construction.* 2015. N 1. P. 11-22 (in Russian).
- Selyaev V.P., Bezrukova E.S., Kechutkina E.L., Selyaev V.V.** Statistical model of discrete-continuous (quantum) mechanism of fractal structure destruction of cement composites. *Durability of building materials, products and structures: mat. Rus. sci. techn. conf. Saransk: Izd-vo Mord. un-ta.* 2019. P. 308-317 (in Russian).
- Travush V.I., Selyaev V.P., Selyaev P.V., Kechutkina E.L.** On the possible quantum nature of the deformation and fracture of composites. *Industr.and civil construction.* 2016. N 9. P. 94-101 (in Russian).
- Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Artamonov D.A., Kanaeva N.S.** Fractal analysis of deformation curves of epoxy polymers under tension. *Polymers in construction.* 2019. N 1. P. 48-57 (in Russian).
- Dubovikov M.M., Starchenko N.S.** Variation index and its applications to analysis of fractal structures. *Sci. Alm. Gordon.* 2003. N 1. P. 1-30.
- Dubovikov M.M., Starchenko N.S., Dubovikov M.S.** Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series. *Physica A.* 2004. N 339. P. 591-608. DOI:10.1016/j.physa.2004.03.025.

Received 11.09.2020

Accepted 12.10.2020