

Т.А. НИЗИНА¹, В.П. СЕЛЯЕВ¹, Д.Р. НИЗИН¹, Н.С. КАНАЕВА¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТРУКТУРЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Аннотация. Изложен подход для исследования механизма деформирования композиционных материалов при растяжении, основанный на использовании методов анализа кривых « $\sigma - \varepsilon$ », фиксируемых с помощью современного испытательного оборудования с высокой частотой снятия показаний (0,01 сек.). Проанализировано изменение временных рядов прироста напряжений эпоксидного полимера в зависимости от шага фиксации показаний. Выявлено, что с увеличением шага от 0,01 до 0,16 сек. наблюдается структуризация временной кривой, что позволяет выделить зоны с различным характером накопления дефектов структуры.

Исходя из анализа разрушения твердого тела как дискретно-непрерывного процесса, определены координаты наиболее «критических» точек кривых деформирования, характеризующихся наименьшими отрицательными показателями прироста напряжений на предшествующем временном интервале длиной 0,16 сек., содержащем 2⁴ экспериментальных точек. Предложен алгоритм оценки скорости накопления повреждений в структуре полимерных материалов на основе анализа прироста напряжений при увеличении относительного удлинения при растяжении. Показано, что число отказов, определяемых из анализа кривых деформирования, фиксируемых с высокой частотой, позволяет количественно определить критический уровень дефектов, приводящих к разрушению композитов.

Ключевые слова: накопление повреждений, кривые деформирования, эпоксидные полимеры, временные ряды, прирост напряжений.

T.A. NIZINA¹, V.P. SELYAEV¹, D.R. NIZIN¹, N.S. KANAIEVA¹¹ National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

QUANTITATIVE ANALYSIS OF KINETICS ACCUMULATION OF DAMAGE IN THE STRUCTURE POLYMER MATERIALS AT A STRETCHING

Abstract. An approach to the study of the mechanism of deformation of composite materials in tension, based on the use of methods for analyzing curves " $\sigma - \varepsilon$ ", fixed with modern test equipment with a high frequency of reading (0,01 sec.). The change in time series of stress increase of the epoxy polymer depending on the step of fixing the readings is analyzed. It was found that with an increase in the step from 0,01 to 0,16 seconds, there is a structuring of the time curve, which allows us to identify zones with different patterns of accumulation of structural defects.

Based on the analysis of the destruction of a solid body as a discrete-continuous process, the coordinates of the most "critical" points of the deformation curves are determined, which are characterized by the smallest negative indicators of stress increase over the previous time interval of 0,16 seconds, containing 2⁴ experimental points. An algorithm for estimating the rate of damage accumulation in the structure of polymer materials is proposed based on the analysis of stress increase with an increase in the elongation under tension. It is shown that the number of failures determined from the analysis of deformation curves recorded with high frequency allows us to quantify the critical level of defects that lead to the destruction of composites.

Keywords: damage accumulation, deformation curves, epoxy polymers, time series, stress increase.

1 Введение

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 получению новых данных, недоступных для получения еще 10-15 лет тому назад. Как справедливо отмечал Ю.М. Баженов [1], методы компьютерного управления технологией и качеством материалов с каждым годом все активнее используются как при проведении научных исследований, так и в практике реального производства новых видов строительных композиционных материалов, а также изделий и конструкций на их основе. При этом современные методы исследования структуры и свойств композитов уже просто немыслимы без использования специализированных программных комплексов.

Использование современного программного обеспечения, позволяющего проводить фиксацию исследуемых показателей с высокой частотой в автоматическом режиме, приводит к накоплению больших объемов экспериментальных данных, для обработки и анализа которых требуется применение специально разработанных методик. В частности, при использовании авторским коллективом при испытании композиционных материалов как на сжатие [2, 3], так и на растяжение [4, 5]) 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. Обработка 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.

Известно, что разрушение композиционных строительных материалов представляет собой процесс множественного зарождения, развития и агрегации различного рода дефектов и микротрещин вплоть до появления макротрещин [6-9]. Неоднородность структуры строительных материалов приводит к формированию ослабленных зон, с которых впоследствии и начинается разрыхление и разрушение композитов. Достижение микротрещиной включения (поры или заполнителя) приводит к сбросу критической плотности энергии в устье трещины и переходу системы к нестабильному состоянию (точке бифуркации). В точке бифуркации возможно ветвление, изменение механизма и направления развития трещины разрушения. Установлено [10, 11], что разрушение композитов при нагружении является дискретно-непрерывным (квантовым) процессом, который суммируется из множества отдельных, частных актов разрушения фрактальных кластеров.

Неоднородность структуры, как одного из важнейших показателей строительных композитов, активно исследуется в работах Е.М. Чернышова [12, 13]. При этом предлагается рассматривать строительные композиты с позиции конструируемой и синтезируемой однородно-неоднородной структуры. Отмечается, что обеспечение условий наиболее эффективной работы силовых связей в структуре однородно/неоднородного конгломератного строительного композита в условиях его нагружения в строительной конструкции достигается оптимизацией кинетики процессов аккумуляции, диссипации, локализации, концентрации напряжений по объёму материала. Выявленные принципы и разработанные технологические приемы успешно использованы при разработке составов современных бетонов [14].

Таким образом, разработка алгоритма количественной оценки уровня накопления повреждений в структуре композиционных материалов под действием механических нагрузок, базирующегося на использовании данных, получаемых из анализа кривых деформирования, фиксируемых с высокой частотой снятия показаний, позволит получить ценную информацию об исследуемых объектах. В данной работе разработанный авторский подход для количественной оценки скорости накопления повреждений применен для анализа

поведения образцов эпоксидных полимерных материалов под действием растягивающих нагрузок.

2 Модели и методы

Детализация кривой деформирования (рисунок 1 б), построенной с помощью современного испытательного оборудования с высокой частотой снятия показаний (0,01 сек.), свидетельствует, что процесс нагружения (рисунок 1 а) сопровождается дискретными актами повышения и падения напряжений. Подобные скачки прироста напряжений свидетельствуют, что разрушение полимерных материалов при растяжении является дискретно-непрерывным процессом, который суммируется из множества отдельных, частных актов разрушения отдельных элементов структуры [4, 15].

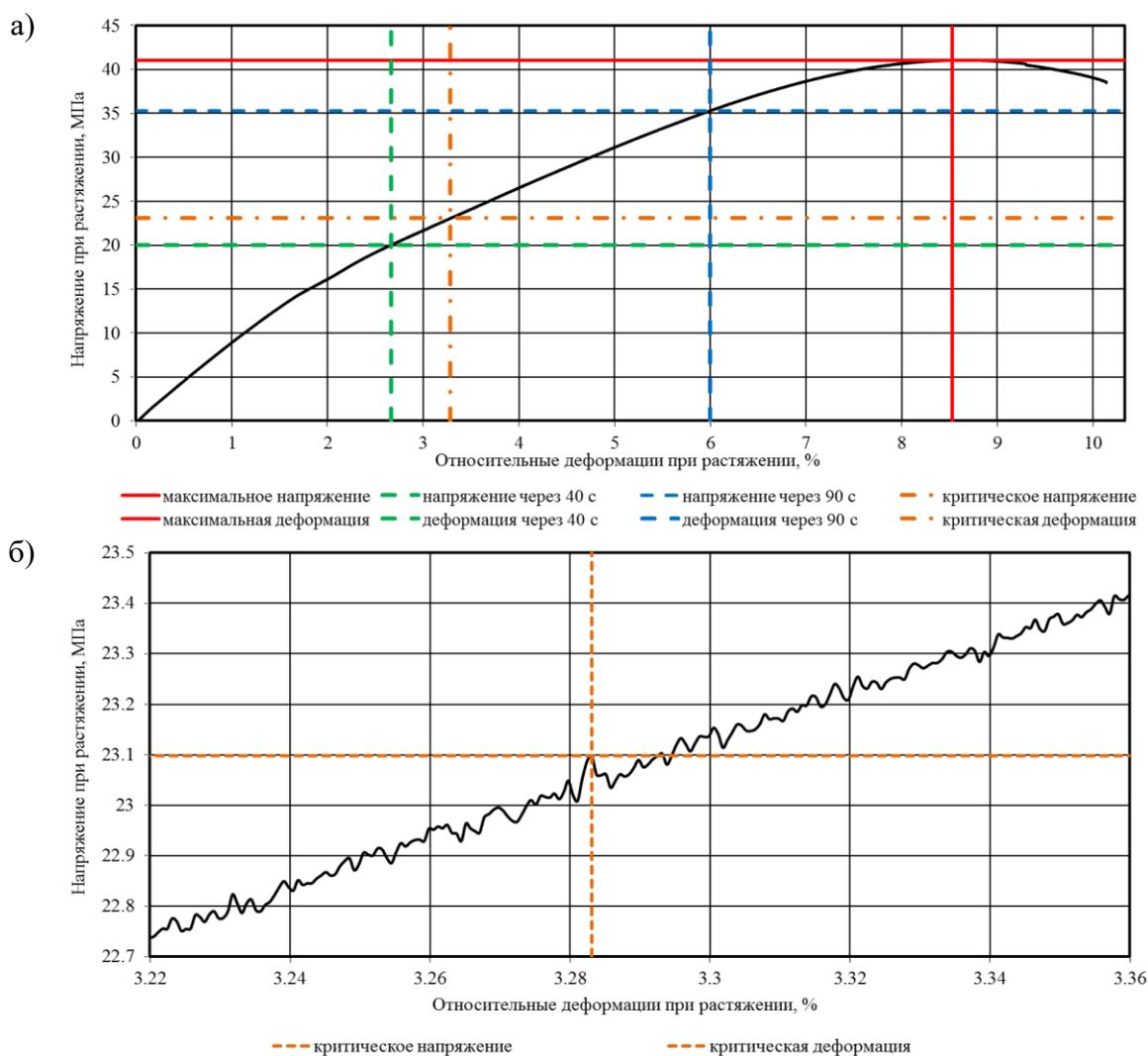


Рисунок 1 – Общий вид (а) и фрагмент (б) кривой деформирования образцов эпоксидных полимеров при растяжении

(сплошной линией красного цвета на рисунке «а» обозначен уровень максимальных напряжений и соответствующих им деформаций; штриховыми линиями зеленого и синего цвета – границы выделяемых зон, красной штриховой – положение «критического» состояния)

В качестве объекта исследования в данной работе использовался полимер, получаемый на основе модифицированной эпоксидной смолы Этал-247 (ТУ 2257-247-18826195-07), отверждаемой отвердителем Этал-1440Н (ТУ 2257-3570-18826195-03), представляющим собой смесь ароматических и алифатических ди- или полиаминов, модифицированную салициловой кислотой. Технические характеристики смолы Этал-247: массовая доля эпоксидных групп – не менее 21,4-22,8%; вязкость по Брукфильду при 25°С – 650-750 СПз.

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 в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» при температуре 23 ± 2 °C и относительной влажности воздуха $50 \pm 5\%$. Скорость перемещения зажимов испытательной разрывной машины составляла 2 мм/мин. Параллельно испытывали не менее 6 образцов, имеющих форму «восьмерок» (тип 2 согласно ГОСТ 11262-2017).

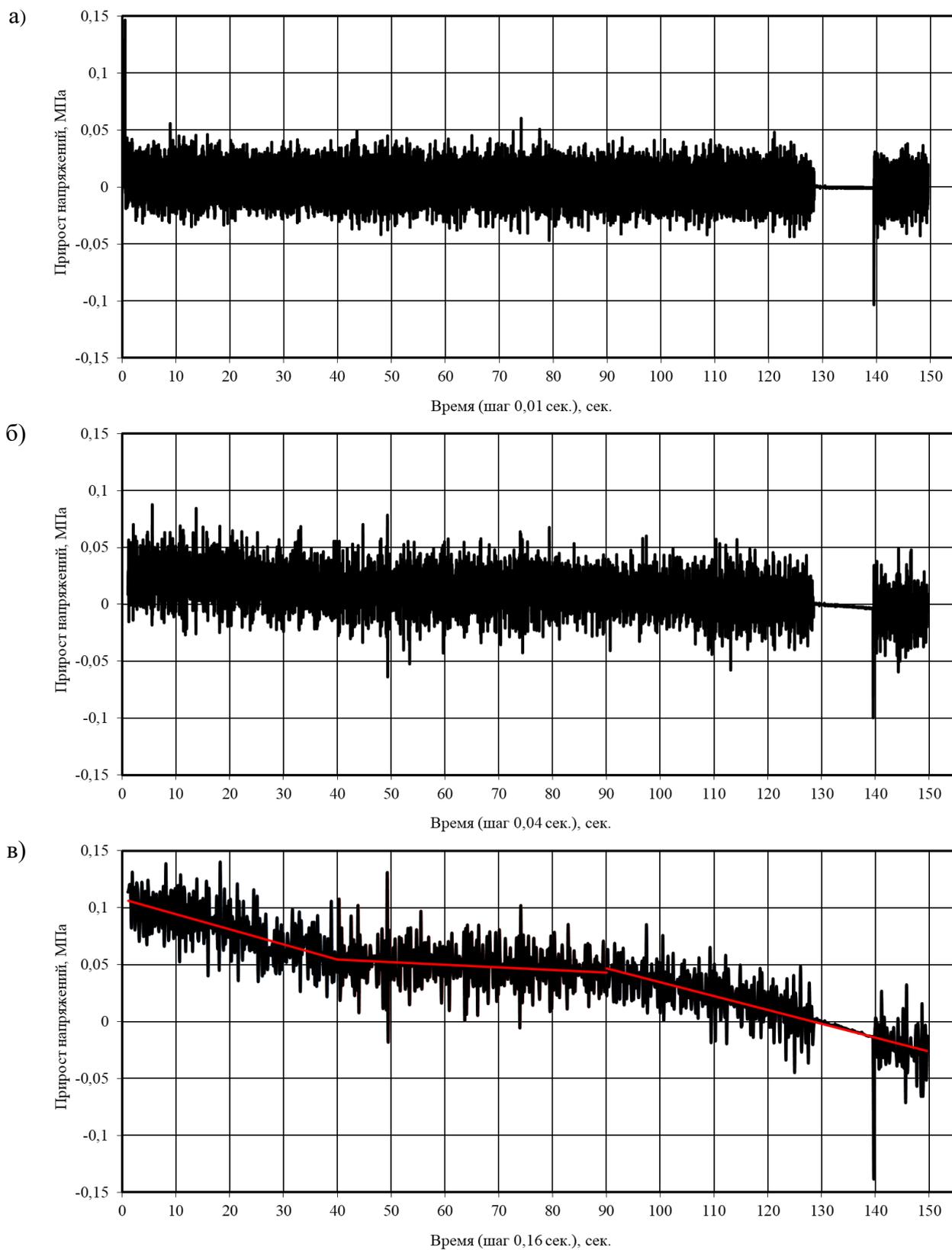
Проведен анализ изменения прироста напряжений в исследуемом полимере при приложении растягивающих усилий в зависимости от шага фиксации показаний (от 0,01 до 0,16 с). Из анализа построенных временных зависимостей видно (рисунок 2), что с увеличением шага наблюдается все большая структуризация кривой. В частности, если при шаге снятия показаний 0,01 с (рисунок 2 а) варьирование прироста напряжений больше напоминает шум без определенной тенденции (за исключением участка, соответствующего максимальным разрушающим нагрузкам), то при шаге 0,16 с (рисунок 2 в) можно наглядно проследить формирование трех зон с различным характером изменения значений, описываемых прямыми линиями (красного цвета) с различными углами наклона.

Очевидно, что подобная структуризация прироста напряжений в образцах при растяжении свидетельствует о различных состояниях его структуры, что, в первую очередь, связано с увеличением числа «отказавших» участков в процессе деформирования и возможностью перераспределения напряжений по «рабочим» зонам. При этом граничные значения формирующихся участков на анализируемых зависимостях можно отнести к характеристическим точкам, фиксирующим уровни «критических» напряжений и деформаций при приложении растягивающих нагрузок.

3 Результаты исследования и их анализ

Анализ представленных на рисунке 2 (в) результатов показал, что для исследуемого состава временной интервал от начала деформирования до 40 секунд нагружения характеризуется снижением среднего прироста напряжений с $0,10 \div 0,11$ до $0,6 \div 0,7$ МПа за каждые 0,16 секунды; при этом варьирование исследуемой характеристики на данном участке происходит от 0,03 до 0,14 МПа. Второй выделяемый временной интервал (от 40 до 90 с) для исследуемого образца характеризуется минимальным изменением средних значений прироста напряжений, составляющим $0,045 \div 0,057$ МПа (рисунок 2 в). При этом на данном временном участке наблюдается значительный перепад исследуемого показателя (от $-0,02$ до $0,13$ МПа), зафиксированный во временном интервале $49,28 \div 44,94$ сек., сопоставимый с падением напряжений в момент достижения максимального растягивающего усилия. Для образца исследуемого полимера (красная штриховая линия на рисунке 1) данный временной интервал соответствует уровню относительных деформаций $3,28 \div 3,29\%$, что составляет $38,5 \div 38,6\%$ от деформации при максимальной нагрузке, и напряжению $23,08 \div 23,10$ МПа ($56,2 \div 56,3\%$ от предела прочности при растяжении). Подобное резкое изменение прироста напряжений, предположительно, может быть объяснено возникновением «критического» состояния, связанного с формированием в структуре полимера под действием растягивающих нагрузок дефектов и трещин.

Третий временной интервал связан со снижением среднего уровня прироста напряжений, принимающего на этапе, близком к достижению предельных нагрузок, отрицательных значений. При этом общая тенденция снижения данного показателя на временном участке с 90 с и далее описывается одной линейной моделью (рисунок 2 в). Момент формирования магистральной трещины, приводящей к разрушению образца под действием растягивающих нагрузок, зафиксирован через $139,56 \div 139,68$ секунд от начала нагружения и соответствует напряжению $40,48 \div 40,52$ МПа и относительной деформации $9,30 \div 9,31\%$.



*Рисунок 2 – Временные ряды прироста напряжений при растяжении в образце эпоксидного полимера в зависимости от шага фиксации показаний:
а – 0,01; б – 0,04; в – 0,16 сек.*

Рассматривая разрушение твердого тела как дискретно-непрерывный процесс, связанный с выходом из рабочего состояния в процессе нагружения части элементов системы и перераспределением нагрузки на элементы, способные воспринимать данный уровень нагрузки, проведем анализ экспериментальных точек кривых деформирования, прирост напряжений в которых имеет минимальные отрицательные значения. Для большей структуризации получаемых зависимостей построим графики типа «японские свечи», которые активно применяются для анализа временных рядов, в том числе для графического отображения колебаний котировок ценных бумаг, валют, энергоносителей, сырьевых и прочих товаров [16]. Каждая свеча соответствует анализируемому временному интервалу, для которого происходит изменение исследуемого показателя. При этом, в отличие от стандартных линейных зависимостей, при использовании подобных графиков появляется возможность проанализировать не один, а сразу четыре исследуемых показателя. Обычно подобные графики применяют для анализа колебания цены, используя 4 вида данных: цена открытия, максимальная и минимальная цены, цена закрытия [16]. Применительно к анализу кривых деформирования эти 4 вида данных будут представлять собой: прирост напряжений в начальной точке исследуемого временного интервала, максимальное и минимальное значения анализируемой величины на исследуемом участке, прирост напряжений в последней точке интервала. Тело свечи, имеющее форму прямоугольника, показывает колебания исследуемой характеристики в течение изучаемого интервала; верхняя точка тени – максимум; нижняя – минимум в изучаемом временном промежутке. Если тело свечи окрашено в черный цвет, то наблюдается снижение характеристики; если в светлое – повышение.

При проведении анализа кривых деформирования исследовался предшествующий временной интервал, соответствующий 16 (2^4) экспериментальных точек, т.е. 0,16 сек. Анализ проводился для участка кривой до достижения образцом максимального уровня растягивающих напряжений. Для более наглядного анализа всего исследуемого участка с целью выявления минимальных отрицательных значений прироста напряжений были дополнительно построены графические зависимости, представленные на рисунке 3 (а).

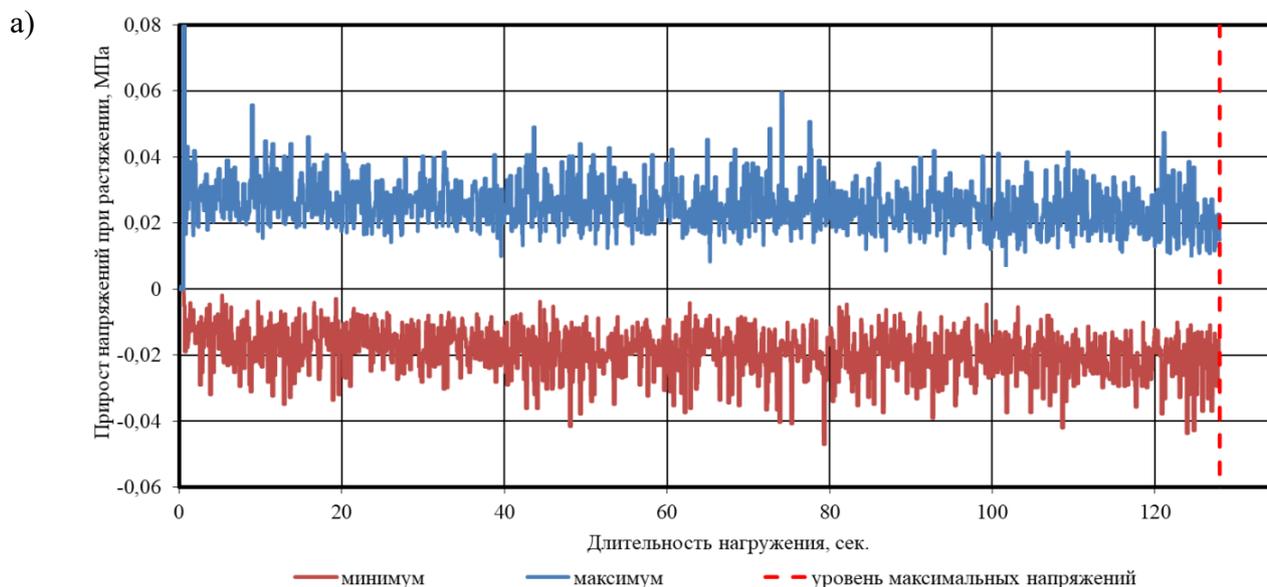
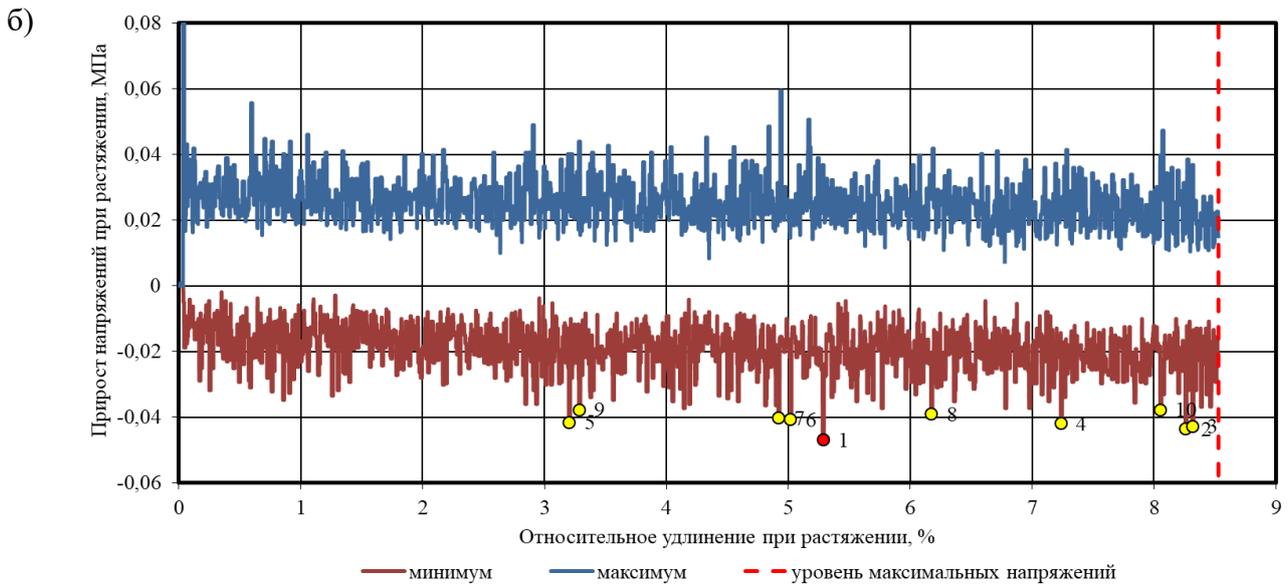


Рисунок 3 – Графические зависимости изменения минимальных и максимальный уровней прироста напряжений при растяжении, рассчитанных для предшествующих временных интервалов длительностью 0,16 сек., в зависимости от:

а) длительности нагружения; б) относительного удлинения при растяжении



Продолжение рисунка 3

Учитывая, что в процессе механических испытаний нагрузка прикладывалась с постоянным шагом (2 мм/мин), для дальнейшего анализа использовались графические зависимости в осях «относительные деформации – прирост напряжений» (рисунок 3 б). Координаты первых десяти «критических» точек, характеризующихся наименьшими отрицательными показателями прироста напряжений при растяжении для исследуемого состава приведены в таблице 1. Данные «критические» точки показаны на рисунке 3 (б) кружочками желтого (№№ 2 – 10) и красного (№ 1) цветов. Дальнейший анализ проводился на основе временных графических зависимостей в виде «японских свечей», построенных отдельно для каждого участка, на котором находилась «критическая» точка (рисунок 4). Протяженность исследуемого участка составляла 1 секунду.

Из анализа представленных на рисунке 4 графических зависимостей видно, что все выявленные на кривой деформирования «критические» точки характеризуются наличием длинной черной свечи, для которой нижний уровень совпадает с минимумом тени (минимальный уровень прироста напряжений). Представим себе, что каждый шаг на кривой деформирования связан с нахождением каждого из множества всех структурных элементов системы в одном из двух состояний – отказ или рабочее состояние. Тогда, задаваясь числом (n) структурных элементов, можно сказать, что система в определенный момент времени может находиться в одном из $N = 2^n$ различных состояниях. При этом в каждый момент времени работоспособность системы может обеспечиваться различным числом работоспособных элементов, число которых будет снижаться по мере увеличения уровня нагружения и деформирования. В данном случае предполагается, что отказавшие структурные элементы не восстанавливаются, а переходы в системе возможны только из предыдущего состояния в последующее (условие необратимости процесса) [10].

Зададимся дискретностью оценки работоспособности исследуемого материала (Δ) с той же частотой, с которой происходила фиксация экспериментальных данных (0,01 сек.). Определим число актов перехода, объединив их для различных уровней относительных деформаций, для которых прирост напряжений принимал одно из трех возможных состояний: 1 – снижался относительно предыдущего значения; 2 – повышался относительно предыдущего значения; 3 – оставался без изменений. Кривые изменения частоты появления трех вышеперечисленных событий (при условии, что сумма частот появления событий для каждого анализируемого участка равна 100%) в зависимости от уровня относительных удлинений при растяжении $\varepsilon_i / \varepsilon_{\sigma_{max}}$, варьирующихся от 0 до 1,0 с шагом 0,1, представлены

на рисунке 5. Из анализа кривых, описывающих изменение 1 и 2 вариантов возможных состояний также хорошо видны три участка, характеризующиеся различным углом наклона. Первый и третий участки характеризуются значительным приростом числа отказов ($\Delta\sigma_i < 0$) с увеличением относительного удлинения полимерного образца при растяжении. При этом на уровне относительных деформаций $\varepsilon_i / \varepsilon_{\sigma_{max}}$ от 0,3 до 0,7 число отказавших элементов практически не меняется (рисунок 5).

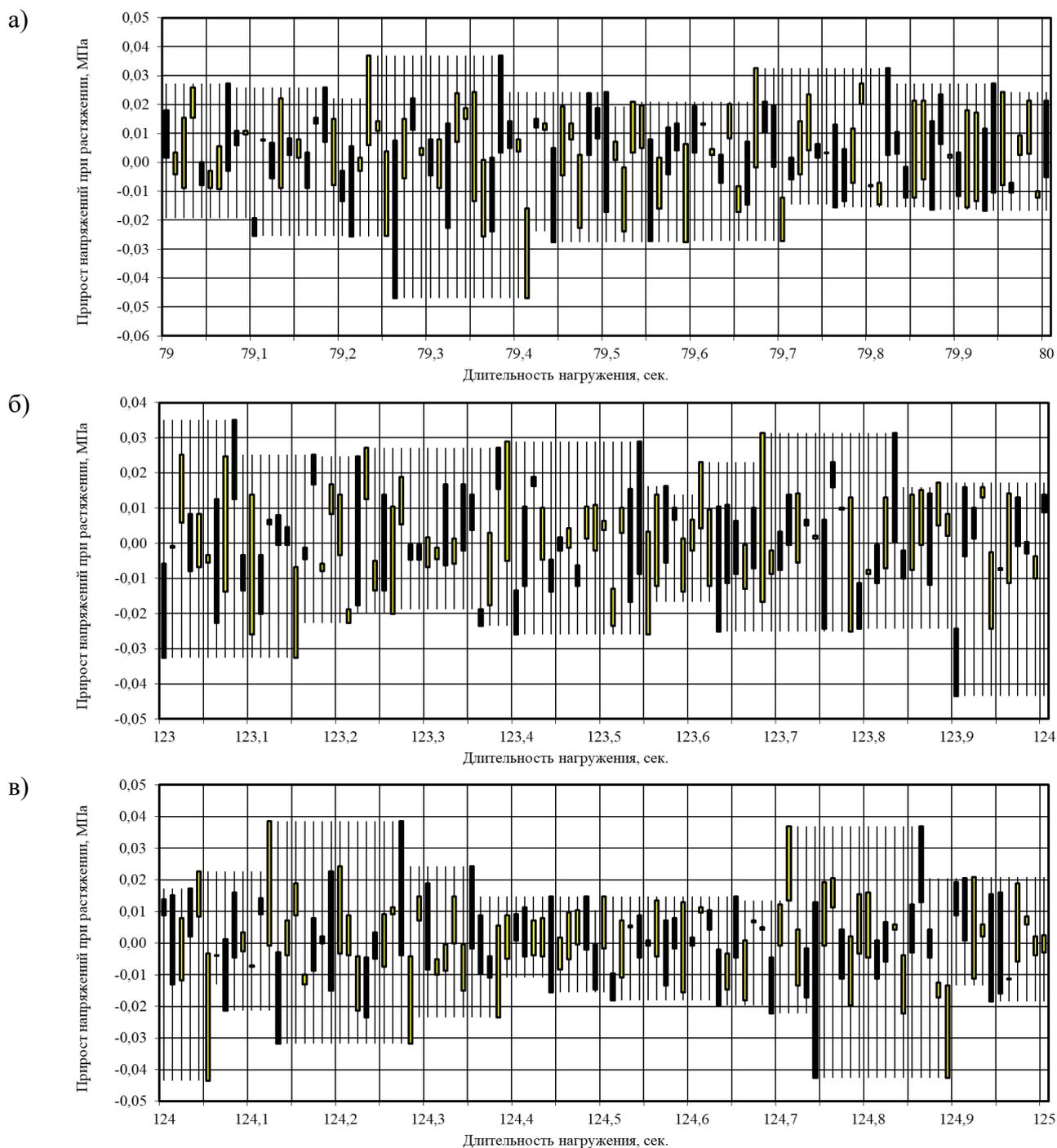


Рисунок 4 – Графические зависимости вида «японские свечи» для «критических» точек кривой деформирования эпоксидного полимера Этал-247+Этал-1440Н: а – точка 1 (79,26 сек.); б – точка 2 (123,90 сек.); в – точка 3 (124,74 сек.)

Таблица 1 – Координаты «критических» точек кривой деформирования образца эпоксидного полимера состава Этал-247+Этал-1440Н, определяемые по минимальным отрицательным значениям прироста напряжений при растяжении

№ точки	Уровень снижения прироста напряжений, МПа	Относительные деформации при растяжении, %	Напряжения при растяжении, МПа	Время от начала испытания, сек.
1	-0,047	5,282	32,333	79,26
2	-0,044	8,258	40,899	123,90
3	-0,043	8,314	40,915	124,74
4	-0,042	7,236	39,254	108,57
5	-0,041	3,200	22,616	48,04
6	-0,041	5,016	31,168	75,27
7	-0,040	4,919	30,725	73,81
8	-0,039	6,172	35,915	92,61
9	-0,038	3,284	23,060	49,29
10	-0,038	8,051	40,729	120,80

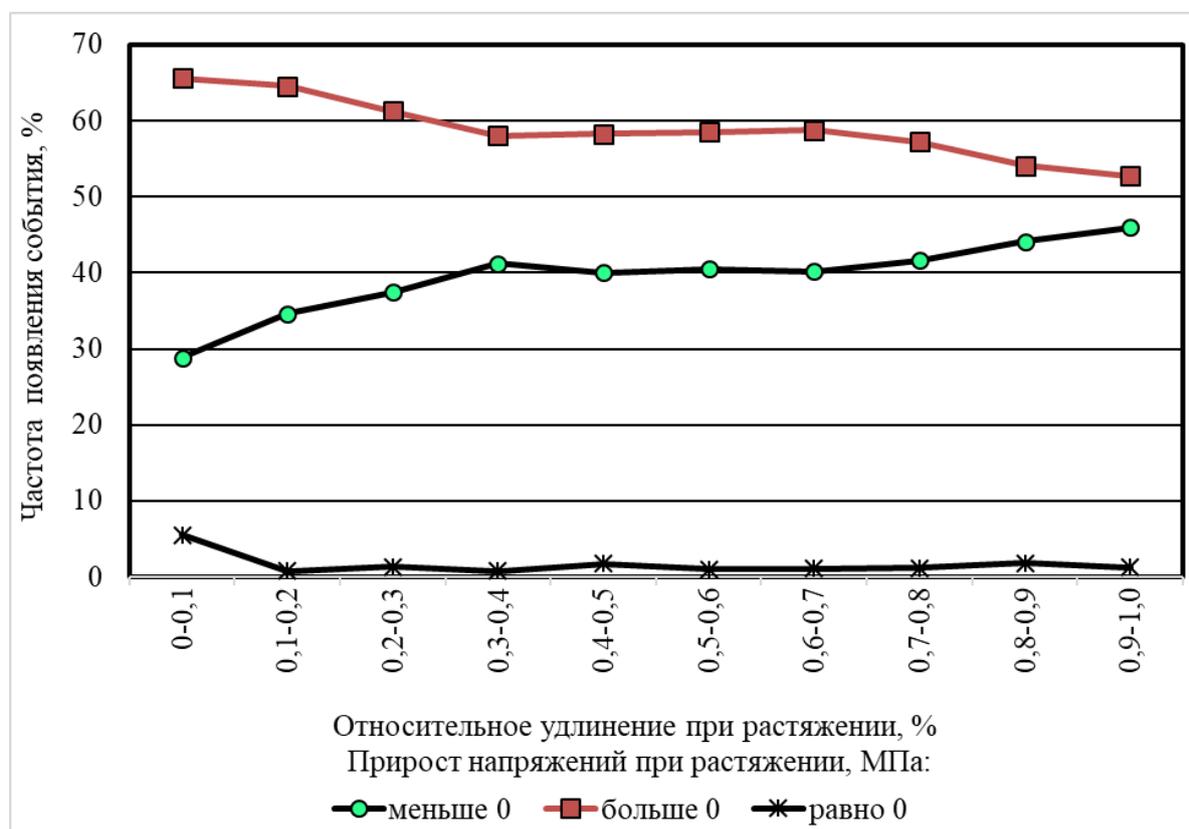


Рисунок 5 – Изменение частоты возникновения событий при оценке изменения прироста напряжений в зависимости от уровня относительного удлинения при растяжении

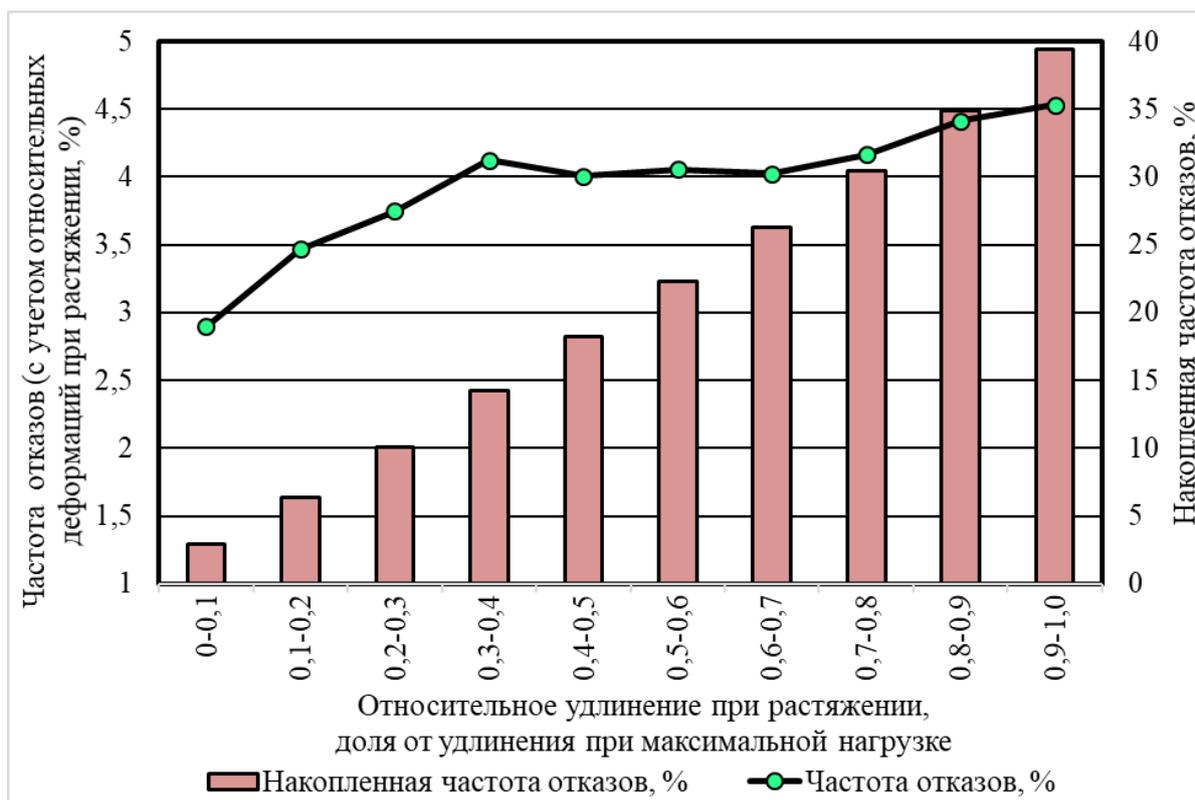


Рисунок 6 – Изменение частоты отказов при оценке изменения прироста напряжений в зависимости от уровня относительного удлинения при растяжении

Анализ графических зависимостей частот отказа в зависимости от общего числа протекающих при нагружении полимерного образца состава Этал-247+Этал-1440Н актов перехода показал (рисунок 6), что данный показатель с ростом интервалов деформирования повышается с 2,9 до 4,5%. Процесс разрушения в данном случае соответствует накоплению отказов, суммарное значение которых достигает 39,4 %.

4 Выводы

Проведенный анализ прироста напряжений при растяжении свидетельствует о дискретном характере накопления повреждений при приложении к полимерным образцам растягивающих нагрузок, что также подтверждает целесообразность использования для анализа кривых деформирования, построенных с высоким шагом снятия показаний, методов анализа временных рядов. Предложен алгоритм оценки скорости накопления повреждений в структуре полимерных материалов на основе анализа прироста напряжений при увеличении относительного удлинения при растяжении, позволяющий количественно определить критический уровень накопленных дефектов, приводящих к разрушению полимерных композитов.

5 Благодарности

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».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Ю.М. Пути развития строительного материаловедения: новые бетоны // Технологии бетонов. 2012. №3-4. С. 39-42.

2. Селяев В.П., Низина Т.А., Бальков А.С., Низин Д.Р., Блабалин А.В. Фрактальный анализ кривых деформирования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов при сжатии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. №1. С. 129-146. doi: 10.15593/perm.mech/2016.1.09.
3. 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. *International journal of nanotechnology*. 2019. Vol. 16. Nos. 6/7/9/10. P. 484-495.
4. 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 mechanisms of deformation and fracture of composite building materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 456 (2018) 012058 doi:10.1088/1757-899X/456/1/012058.
5. Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Kuznetsov N.M., Artamonov D.A. Applying the Fractal Anaysis Methods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses. *Key engineering materials*. 2019. Vol. 799. Pp. 217-223. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.217.
6. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 384 с.
7. Зайцев Ю.В. Моделирование деформации и прочности бетона методами механики разрушения. М.: Стройиздат, 1982. 196 с.
8. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
9. Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Неверов В.А., Селяев П.В. Фрактальные модели разрушения бетона // Региональная архитектура и строительство. 2015. №1. С. 11-22.
10. 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: материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию засл. деятеля науки РФ, 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.
11. Травуш В.И., Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л. О возможном квантовом характере деформации и разрушения композитов // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №9. С. 94-100.
12. Чернышов Е.М., Дьяченко Е.И., Макеев А.И. Неоднородность строения как фундаментальная материаловедческая характеристика строительных композитов // Вестник отделения строительных наук РААСН. Вып. 2. Воронеж, 1999. С. 390-402.
13. Чернышов Е.М., Дьяченко Е.И., Макеев А.И. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов: вопросы материаловедческого обобщения и развития теории. Воронеж, 2012. 98 с.
14. Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // Строительные материалы. 2014. №3. С. 6-15.
15. Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р., Артамонов Д.А., Канаева Н.С. Фрактальный анализ кривых деформирования эпоксидных полимеров при растяжении // Полимеры в строительстве. 2019. №1(7). С. 48-57.
16. Нисон С. Японские свечи: графический анализ финансовых рынков. Перевод с англ. Дозорова Т., Волкова М. М.: Изд-во «Диаграмма», 1998. 336 с.

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. Puti razvitiya stroitel'nogo materialovedeniya: novye betony [Ways of development of building materials science: new concretes] *Tekhnologii betonov*. 2012. Nos. 3-4. Pp. 39-42. (rus)
2. 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 Mechanics Bulletin*. 2016. No. 1. Pp. 129-146. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.09.
3. 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. *International journal of nanotechnology*. 2019. Vol. 16. Nos. 6/7/9/10. Pp. 484-495.
4. 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 mechanisms of deformation and fracture of composite building materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 456 (2018) 012058 doi:10.1088/1757-899X/456/1/012058.
5. Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Kuznetsov N.M., Artamonov D.A. Applying the Fractal Anaysis Methods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses. *Key engineering materials*. 2019. Vol. 799. Pp. 217-223. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.217.
6. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.J., Oksogoev A.A. Синергетика и фракталы в материаловедении [Synergetics and fractals in science of materials]. Moscow: Nauka, 1994. 384 p. (rus)

7. Zaitsev Y.V. Modelirovanie deformatsii i prochnosti betona metodami mekhaniki razrusheniia [Modelling of deformation and strength of the concrete by methods fracture mechanics]. Moscow: Stroizdat, 1982. 196 p. (rus)
8. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of mechanics of reinforced concrete]. Moscow: Stroizdat, 1996. 416 p. (rus)
9. Selyaev V.P., Kupriyashkina L.I., Neverov V.A., Selyaev P.V. Fraktal'nye modeli razrusheniia betonov [Fractal models of destruction of concretes]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*, 2015, No. 1, Pp. 11-22. (rus)
10. Selyaev V.P., Bezrukova E.S., Kechutkina E.L., Selyaev V.V. Statisticheskaya model' diskretno-nepreryvnogo (kvantovogo) mekhanizma razrusheniya fraktal'noy struktury tsementnykh kompozitov [Statistical model of discrete-continuous (quantum) mechanism of fractal structure destruction of cement composites] *Dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, izdeliy i konstruktsiy: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 75-letiyu zasl. deyatelya nauki RF, akad. RAASN, d-ra tekhn. nauk, prof. Selyaeva V.P. (3-5 dek. 2019 g.) [Durability of building materials, products and structures: materials of the all-Russian scientific and technical conference, vol, 75th ann. of the honored scientist of the RF, acad. RAACS, dr. in tech. sc., prof. Selyaev V.P. (3-5 dec. 2019 y.)]. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2019. Pp. 308-317. (rus)*
11. Travush V.I., Selyaev V.P., Selyaev P.V., Kechutkina E.L. O vozmozhnom kvantovom kharaktere deformatsii i razrusheniya kompozitov [On the possible quantum nature of the deformation and fracture of composites]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016. No. 9, Pp. 94–101. (rus)
12. Chernyshov E.M., D'yachenko E.I., Makeev A.I. Neodnorodnost' stroeniya kak fundamental'naya materialovedcheskaya harakteristika stroitel'nykh kompozitov [Heterogeneity of structure as a fundamental material science characteristic of building composites] *Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk RAASN. Vyp. 2. Voronezh*, 1999. Pp. 390–402. (rus)
13. Chernyshov E.M., D'yachenko E.I., Makeev A.I. Neodnorodnost' struktury i soprotivlenie razrusheniyu konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov: voprosy materialo-vedcheskogo obobshheniya i razvitiya teorii [Heterogeneity of structure and resistance to destruction of conglomerate building composites: issues of material science generalization and theory development]. Voronezh, 2012. 98 p. (rus)
14. Bazhenov Yu.M., Chernyshov E.M., Korotkih D.N. Konstruirovaniye struktur sovremennykh betonov: opredelyayushhie printsipy i tehnologicheskie platformy [Designing structures of modern concrete: defining principles and technological platforms]. *Stroitel'nye materialy*. 2014. No. 3. Pp. 6–14. (rus)
15. Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Artamonov D.A., Kanaeva N.S. Fraktal'nyy analiz krivykh deformirovaniya epoksidnykh polimerov pri rastyazhenii [Fractal analysis of deformation curves of epoxy polymers under tension]. *Polimery v stroitel'stve*. 2019. No. 1(7). Pp. 48-57. (rus)
16. Nison S. Iaponskie svechi: graficheskii analiz finansovykh rynkov [Japanese candlesticks: graphical analysis of financial markets]. Moscow: Diagram, 1998. 336 p. (rus)

Информация об авторах

Низина Татьяна Анатольевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций.

E-mail: nizinata@yandex.ru

Селяев Владимир Павлович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,

академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций.

E-mail: ntorm80@mail.ru

Низин Дмитрий Рудольфович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,

кандидат технических наук, инженер лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз.

E-mail: nizindi@yandex.ru

Канаева Надежда Сергеевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,

аспирант кафедры строительных конструкций.

E-mail: aniknadya@yandex.ru

Information about authors

Nizina Tatyana A.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Ogarev Mordovia State University", Saransk, Russia,
doctor in tech. sc., prof., prof. of the dep. of building structures.
E-mail: nizinata@yandex.ru

Selyaev Vladimir P.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Ogarev Mordovia State University", Saransk, Russia,
acad. of the RAACS, doctor in tech. sc., prof., head of the dep. of building structures.
E-mail: ntorm80@mail.ru

Nizin Dmitriy R.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Ogarev Mordovia State University", Saransk, Russia,
candidate in tech. sc., engineer of the laboratory of ecological and meteorological monitoring, construction technologies and expertise.
E-mail: nizindi@yandex.ru

Kanaeva Nadezhda S.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Ogarev Mordovia State University", Saransk, Russia,
postgraduate student of the dep. of building structures.
E-mail: aniknadya@yandex.ru