

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2021, №1, Том 13 / 2021, No 1, Vol 13 <https://esj.today/issue-1-2021.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/51SAVN121.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Бондарев Б.А., Комаров П.В., Коста А.А., Корнеев О.О., Бондарев А.Б., Корнеева А.О. Исследование выносливости эпоксидных композиционных материалов при циклическом сжатии // Вестник Евразийской науки, 2021 №1, <https://esj.today/PDF/51SAVN121.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Bondarev B.A., Komarov P.V., Kosta A.A., Korneev O.O., Bondarev A.B., Korneeva A.O. (2021). Research of the endurance of epoxy composite materials under cyclic compression. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 1(13). Available at: <https://esj.today/PDF/51SAVN121.pdf> (in Russian)

**Бондарев Борис Александрович**

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, Россия  
Профессор кафедры «Строительное материаловедение и дорожные технологии»

Доктор технических наук, профессор

E-mail: [lnsp-48@mail.ru](mailto:lnsp-48@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7194-9270>

**Комаров Павел Валерьевич**

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, Россия

Доцент кафедры «Строительное материаловедение и дорожные технологии»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [kpv@stu.lipetsk.ru](mailto:kpv@stu.lipetsk.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6684-587X>

**Коста Антон Андреевич**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,

Москва, Россия

Доцент кафедры «Архитектура»

Кандидат архитектуры

E-mail: [KostaAA@mgsu.ru](mailto:KostaAA@mgsu.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4548-8359>

**Корнеев Олег Олегович**

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, Россия

Аспирант кафедры «Строительное материаловедение и дорожные технологии»

E-mail: [pao2010@rambler.ru](mailto:pao2010@rambler.ru)

**Бондарев Александр Борисович**

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, Россия

Доцент кафедры «Строительное материаловедение и дорожные технологии»

Кандидат технических наук

E-mail: [lnsp-48@mail.ru](mailto:lnsp-48@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2902-7528>

**Корнеева Анастасия Олеговна**

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, Россия

Доцент кафедры «Металлургических технологий»

Кандидат технических наук

E-mail: [lnsp-48@mail.ru](mailto:lnsp-48@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2434-9536>

## Исследование выносливости эпоксидных композиционных материалов при циклическом сжатии

**Аннотация.** Широкое применение полимерных композиционных материалов в значительной степени сдерживается сложностью прогнозирования характеристик их напряженно-деформированного состояния при циклических видах нагружения. Из-за малой изученности поведения полимерных композиционных материалов при такого рода нагружениях. В настоящее время достаточно трудно прогнозировать долговечность полимерных композиционных материалов при статических видах нагружения, а имеющиеся методы для материалов кристаллического строения и полимеров не всегда применимы к ним. Недостаточен теоретический и экспериментальный материал по оценке напряженно-деформированного состояния полимербетонов при длительном нагружении. При длительном действии циклических нагрузок изменения структуры полимерных композиционных материалов происходят за счет локального саморазогрева в вершинах растущих субмикротрещин и связанных с этим изменением упругогистерезистных свойств материала. При этом проявляется энергия усталости, когда одновременное многофакторное циклическое воздействие собственных и силовых напряжений приводит к эффекту, превышающему суммарное действие отдельных видов напряжений. И, если такие процессы достаточно изучены для древесины – природного полимерного материала, то для искусственных конгломератов, каким являются полимерные композиты, эти вопросы нуждаются в тщательном изучении.

Исследования выносливости эпоксидных полимербетонов велись на образцах призмах 100x100x400 мм по разработанной авторами методике. По формуле определялось минимальное количество образцов, необходимых для построения линий выносливости. Величина коэффициента асимметрии цикла была принята равной 0,6. Значение максимального напряжения цикла принималось от 0,62  $R_b$  с постепенным понижением.

Получены значения величины предела выносливости эпоксидного композиционного материала при циклическом нагружении  $R_{b,pul} = 0,43 R_b$  или 93,72 МПа, что позволяет судить о достаточной долговечности данного материала.

**Ключевые слова:** предел выносливости; эпоксидный композиционный материал; циклическое нагружение; циклическая долговечность; температура саморазогрева; структурообразующие факторы

В настоящее время строительная индустрия ориентирована на повышение качества строительных материалов для возведения зданий и сооружений с целью снижения трудозатрат и обеспечения экономической эффективности. Применение составов стойких агрессивной среде позволяет значительно увеличить срок службы конструкций.

Одними из наиболее эффективных строительных материалов можно считать полимерные композиционные материалы (ПКМ). Они обладают высокими прочностными характеристиками, менее подвержены воздействию агрессивных сред, чем бетоны на минеральных вяжущих. Кроме того, такие материалы хорошо воспринимают действие циклических нагрузок благодаря способности к большим обратимым деформациям.

Область применения полимерных композиционных материалов довольно обширна, от опор и полов трамвайных агрегатов до дорожных и аэродромных покрытий. ПКМ успешно зарекомендовали себя в строительстве мостовых сооружений. Также к неоспоримым достоинствам полимерных материалов можно отнести сравнительно небольшое время процесса отверждения.

Сдерживающим фактором более широкого применения ПКМ является относительная сложность прогнозирования поведения их при воздействии циклических нагрузок, трудности в описании напряженно-деформированного состояния при малоцикловых нагружениях.

В процессе эксплуатации конструкции из полимерных композиционных материалов подвергаются длительному воздействию различных факторов, которые приводят к одновременному развитию деформаций сжатия и растяжения, что неизбежно снижает долговечность материала. Если в области скопления дислокаций напряжения превысят предел текучести полимерного композиционного материала, образуются усталостные микротрещины вследствие разрыва связей, что в конечном итоге становится причиной разрушения ПКМ.

Влияние частоты приложения нагрузки на величину предела выносливости исследовали А.Ю. Педдер, А.Е. Омелянов, К.К. Пичахчи-Арсеньев и др. Экспериментально было доказано, что изменение частоты нагружения в пределах от 50 до 3000 циклов в минуту не оказывает влияния на величину предела выносливости. При частоте более 7000 циклов в минуту пределы выносливости увеличиваются на 7...10 % [1–3].

Исследованиям работ полимербетонов и армополимербетонов под действием многократно приложенных нагрузок посвящены работы А.Б. Марцинчика, П.К. Чуйко, П.Г. Левченко, А.Е. Меднова, А.И. Чебаненко, В.Д. Черкасова, Б.А. Бондарева, Д.Л. Богдановского и др.

П.Г. Левченко предложил методику исследований на выносливость полимербетона ФАМ, подвергаемого циклическому сжатию. При этом определялась экспериментально зависимость предела выносливости от коэффициента асимметрии цикла приложения нагрузки. Испытания на выносливость проводились на образцах-призмах сечением 4×4×16 см, 7×7×28 см. Определение предела выносливости для каждой серии испытанных образцов производилось по кривой зависимости максимальной продольной деформации от числа циклов приложения нагрузки. Испытания велись при коэффициентах асимметрии циклов  $\rho = 0,1; 0,3; 0,6; 1,0$ . Пределы выносливости при этом составили: при  $\rho = 0,1$ ,  $\sigma_{\infty} = 0,33R_b$ ;  $\rho = 0,3$ ,  $\sigma_{\infty} = 0,43R_b$ ;  $\rho = 0,6$ ,  $\sigma_{\infty} = 0,50R_b$ ;  $\rho = 1,0$ ,  $\sigma_{\infty} = 0,5R_b$  [4; 5].

А.Е. Меднов исследовал вопросы сопротивляемости тяжелого и легкого полимербетона воздействию многократно приложенных нагрузок при коэффициентах асимметрии циклов  $\rho = 0,1; 0,3; 0,6$ . В результате проведенных испытаний были получены следующие значения относительного предела выносливости: при  $\rho = 0,1$ ,  $\sigma_n = 0,415R_b$ ; при  $\rho = 0,3$ ,  $\sigma_n = 0,542R_b$ ; при  $\rho = 0,6$ ,  $\sigma_n = 0,650R_b$ . Ускоренным методом определен абсолютный предел выносливости тяжелого полимербетона: при  $\rho = 0,1$ ,  $\sigma_n = 0,33R_b$ ;  $\rho = 0,3$ ,  $\sigma_n = 0,37R_b$ ;  $\rho = 0,6$ ,  $\sigma_n = 0,42R_b$  и получена зависимость абсолютного предела выносливости от коэффициента асимметрии цикла<sup>1</sup>:

$$\sigma_{\infty} = 0,314 + 0,178\rho \quad (1.12)$$

В работе А.И. Чебаненко приведена методика определения предела выносливости полимербетонов. Для представления характера изменения напряженно-деформированного состояния полимербетона под воздействием пульсирующей нагрузки, автор предлагает использовать энерго-энтропийный контур структурной диаграммы, который соответствует материалу с заранее «отжатой», выбранной максимальной необратимой деформацией " $\epsilon_k$ " на уровне длительной его прочности [6].

---

<sup>1</sup> Меднов, А.Е. Исследование армополимербетонных элементов на действие многократно приложенной нагрузки: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. / А.Е. Меднов – Москва: МИИТ, 1979. – 209 с.

Он рассматривал замкнутые структурные диаграммы в осях  $\sigma - \epsilon$ , для их построения требуется также проведение длительных испытаний [7–9].

Богатый экспериментальный материал по вопросу анализа напряженно-деформированного состояния полимербетонов содержится в работах В.Е. Беляева и В.М. Яковлева<sup>2,3,4</sup> [10–15]. С помощью метода температурной аналогии в предлагаемой форме получен ряд существенных результатов при решении неизотермических задач вязкоупругости. При анализе напряженно-деформированного состояния полиэфирных и фурфуролацетоновых полимербетонов этот метод применялся В.Е. Беляевым, однако, существенных результатов для практики в связи со сложностью исследуемого материала он не дал [10; 11].

В.Д. Черкасовым исследованы выносливость композиционных балок из железобетона и полимербетона. Им установлено благоприятное влияние полимерного покрытия на выносливость железобетонных балок при изгибе. Предел выносливости бетона с полимерным покрытием увеличился в 1,35–1,9 раза, получена аналитическая зависимость, позволяющая предсказать величину эффекта повышения предела выносливости бетона с полимерным покрытием при известных отношениях модулей упругости и толщины полимербетонного слоя и бетона<sup>5</sup>.

В работах Б.А. Бондарева приведены результаты исследования выносливости полимербетона ПН-609-21м, а также элементы конструкции на его основе, армированные стеклопластиковой арматурой (СПА). Им было установлено, что с увеличением коэффициента асимметрии цикла нагружений от 0,1 до 0,6 предел выносливости возрастает от 0,34 до 0,45  $R_b$  на 24 %. Изучен эффект увеличения предела выносливости изгибаемых стеклопластопolyмербетонных элементов в зависимости от предварительного напряжения СПА и коэффициента армирования. В исследуемых пределах усталостная прочность элементов возрастает с увеличением процента армирования: на 14,8 %. При одинаковом проценте армирования большему предварительному напряжению соответствует больший предел выносливости. Так, при увеличении степени предварительного напряжения СПА от 0,3 $R_{q1}$  до 0,5  $R_{q1}$  предел выносливости возрастает на 10 % по сравнению с обычным<sup>6</sup> [16–22].

## Методы

Испытания на выносливость полимербетонов при сжатии проводились на образцах в виде призм размерами 100x100x400 мм на испытательной машине ГРМ-2А с частотой приложения нагрузки 670 циклов в минуту и коэффициентами асимметрии цикла  $\rho = 0,6$ . Для измерения продольных и поперечных деформаций на призмы с двух противоположных сторон

---

<sup>2</sup> Беляев, В.Е. Разработка основ расчета армополимербетонных конструкций на совместные силовые и температурные воздействия с учетом влияния длительных процессов: дис. докт. техн. наук. / Беляев В.Е. – Москва: 1990. – 512 с.

<sup>3</sup> Беляев, В.Е. Расчет элементов конструкций из композиционных материалов с учетом длительности воздействия нагрузки в условиях изменяющихся температур и влажности среды: автореф. дис. докт. тех. наук. / Беляев В.Е. – Липецк: ЛипПИ, 1989. – 44 с.

<sup>4</sup> Яковлев, В.М. Исследование полимербетонных и сталепolyмербетонных конструкций с учетом температурных воздействий: дис. канд. техн. наук. / Яковлев В.М. – Воронеж: ВИСИ. 1979. – 461 с.

<sup>5</sup> Черкасов, В.Д. Исследование выносливости и демпфирующих свойств композиционных балок из железобетона и полимербетона: автореферат дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. / Черкасов В.Д. – Воронеж: ВИСИ, 1980. – 22 с.

<sup>6</sup> Бондарев, Б.А. Сопrotивляемость полимербетонных строительных элементов, армированных стеклопластиковой арматурой циклическим нагрузкам: автореф. дис. канд. техн. наук. / Бондарев Б.А. – Воронеж, 1990. – 26 с.

наклеивались тензодатчики сопротивления. Для снятия отсчетов использовался цифровой тензометрический мост ЦТМ-5 с печатающим устройством. Для контроля за показаниями тензодатчиков использовались механические индикаторы деформаций часового типа с ценой деления 0,001 мм<sup>7</sup>.

Перед испытанием многократно приложенной нагрузкой производилось центрирование образцов по их физической оси. Для этого образец устанавливался между опорными плитами машины и к нему прикладывалась нагрузка, составляющая 0,15–0,2 от разрушающей. Деформации регистрировались по двум противоположным граням; центрирование считалось законченным, если разница в показаниях тензодатчиков не превышала 10 %. Испытание образцов в каждой серии производилось при разных уровнях нагрузки, составляющей определенную долю от разрушающей, при постоянном для всей серии образцов коэффициента асимметрии цикла.

Подбор составов эпоксидных полимербетонов проводился с помощью ортогонального центрального композиционного планирования. Все коэффициенты определялись независимо друг от друга.

Критерий оптимальности плана устанавливался по следующим формулам.

Для ортогонализации столбцов  $x_0$  и  $x_i^2$  проводились преобразования

$$\tilde{x}_i^2 = x_i^2 - \frac{\sum_{g=1}^N x_{g,i}^2}{N} = x_i^2 - \bar{x}_i^2, \quad (1)$$

где  $N$  – общее число экспериментов.

При этом выполнялись условия ортогональности, оценивающиеся по формуле

$$\sum_{g=1}^N x_{g,0} \cdot \tilde{x}_{g,i}^2 = \sum_{g=1}^N x_{g,i}^2 - N \cdot \frac{\sum_{g=1}^N x_{g,i}^2}{N} = 0. \quad (2)$$

В матрице ортогонального планирования для трех независимых переменных соответствуют значения:

$$\tilde{x}_i^2 = x_i^2 - 0,73. \quad (3)$$

Для удобства переходим к линейной форме записи уравнения регрессии, при  $n = 3$  оно имеет вид:

$$\tilde{y} = \sum_{i=0}^3 \beta_i \cdot \tau_i. \quad (4)$$

Из-за случайного характера изменения выходной величины  $y$  каждой точке  $\vec{X}_g$  приходится проделать  $m$  параллельных опытов и результаты наблюдений усреднить

<sup>7</sup> Комаров, П.В. Эпоксидный композиционный материал и его циклическая долговечность: дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Комаров П.В. – Липецк, 2003. – 155 с.

$$\bar{y}_g = \frac{\sum_{i=1}^m y_{g,i}}{m} \quad (5)$$

Проверка воспроизводимости эксперимента проведена по критерию Кохрена. Оценка генеральной дисперсии воспроизводимости  $s^2\{y\}$  определялась по формуле

$$s^2\{y\} = s^2 = \frac{\sum_{g=1}^N s_g^2}{N} \quad (6)$$

Оценка коэффициентов уравнения регрессии определялась по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{g=1}^N z_{g,i} \cdot \bar{y}_g}{\sum_{g=1}^N z_{g,i}^2} \quad (7)$$

Проверка значимости коэффициента регрессии проводится по  $t$ -критерию Стьюдента

$$t = \frac{|b_i|}{s\{b_i\}} \quad (8)$$

Проверка адекватности математической модели проводилась с помощью критерия Фишера.

Для получения корреляционного уравнения в зоне выносливости использовалась методика, предложенная Н.С. Карпухиным [23]. Точность построения линии выносливости зависит от объёма испытаний  $n$ , который находят, задаваясь максимальной ошибкой в определении предела выносливости  $\Delta$  и доверительной вероятностью  $P = 1 - \alpha$ .

Тогда

$$n = k \cdot z_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{\gamma^2}{\Delta^2} \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент, значение которого определяется числом параметров уравнения;  $z_{1-\alpha/2}$  – квантиль нормированного нормального распределения;  $\gamma$  – коэффициент вариации предела выносливости;  $\Delta$  – относительная максимальная ошибка в определении предела выносливости.

Так как уровень максимальных напряжений цикла задается соотношением  $\sigma_{\max}/R_b$ , а величина  $R_b$  является случайной, то и соотношение  $\sigma_{\max}/R_b$  – случайная величина. Так как число циклов также случайная величина, то обычно регрессионному анализу предшествует корреляционный, на основании которого производят оценку средних значений дисперсии и коэффициента корреляции.

Уравнение теоретической линии выносливости запишется в виде:

$$M\left(\frac{y}{x}\right) = Q_y = \alpha + \rho \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \cdot (x - \bar{x}) \quad (10)$$



Корреляционный анализ производят по следующей схеме:

- выборочное среднее значение величины «x»

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (11)$$

- выборочное среднее значение величины «y»

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}; \quad (12)$$

- выборочная дисперсия  $S_y^2, S_x^2$

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; \quad S_y^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2; \quad (13)$$

- выборочное среднее квадратичное отклонение

$$S_x = \sqrt{S_x^2}; \quad S_y = \sqrt{S_y^2}; \quad (14)$$

- выборочный центральный момент второго порядка

$$m_{1/1} = \frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^m \sum_{j=1}^k n \cdot j \cdot i \cdot (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y}); \quad (15)$$

- выборочный коэффициент корреляции

$$r = \frac{m_{1/1}}{S_x \cdot S_y}. \quad (16)$$

Для оценки значимости коэффициента корреляции, то есть проверки гипотезы о равенстве нулю генерального коэффициента вариации используется преобразование Фишера. Распределение случайной величины  $z$  хорошо аппроксимируется нормальным законом с математическим ожиданием  $a_z$  и средним квадратичным отклонением

$$z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r}; \quad (17)$$

$$a_z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\rho}{1-\rho} + \frac{\rho}{2(n-1)}. \quad (18)$$

Проверка нулевой гипотезы о равенстве генерального коэффициента корреляции заключается в вычислении по формулам (9) и (11) значений  $z$  и  $\sigma_z$ , сопоставление значения  $z$  с теоретическим для доверительной вероятности  $P = 1 - \alpha$ . Если выполняется условие,  $z \leq z_{1-\alpha/2} \sigma_z$ , то нулевую гипотезу принимают, в противном случае, когда  $z > z_{1-\alpha/2} \sigma_z$  нулевую гипотезу отвергают. Границы доверительного интервала для коэффициента корреляции при

ограниченном объеме выборки определяются с помощью преобразования (12). Вначале строятся доверительные интервалы для  $\alpha_z$ .

$$Z - Z_{1-\alpha/2} \sigma_z < \alpha_z < Z + Z_{1-\alpha/2} \sigma_z \quad (19)$$

или  $Z_1 < \alpha_z < Z_2$ .

Далее для значений  $Z_1$  и  $Z_2$  по формуле

$$r = \frac{e^{2z} - 1}{e^{2z} + 1} \quad (20)$$

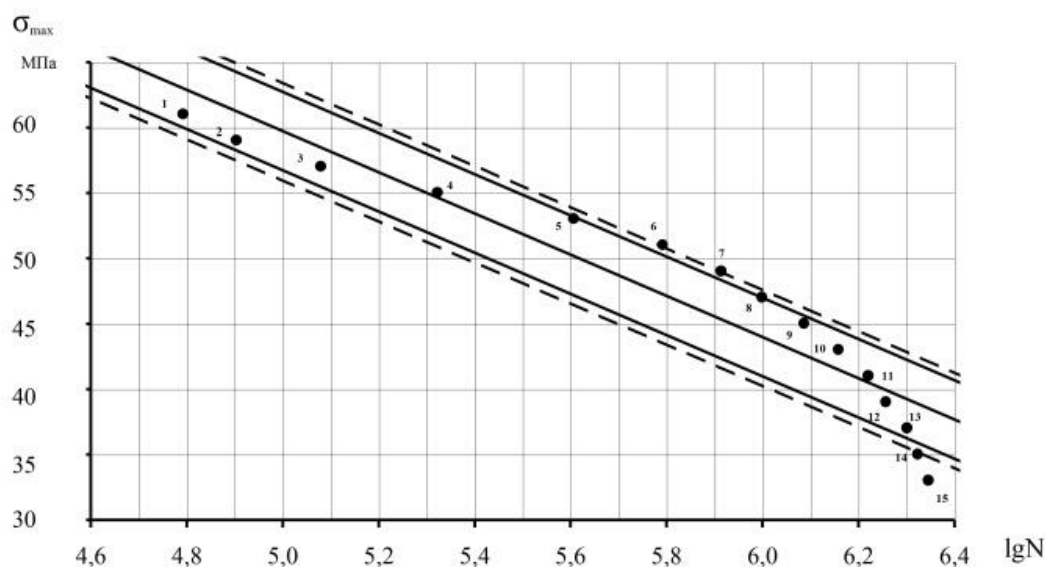
определяются соответствующие значения границ доверительных интервалов для генерального коэффициента корреляции:

$$r_1 < \rho < r_2. \quad (21)$$

Частота приложения нагрузки составляла 150 циклов в минуту с коэффициентом асимметрии цикла  $\rho = 0,8$ , нагрузка прикладывалась в третях пролета. Уровень загрузки балок регулировался путем изменения амплитуды импульсов, подаваемых с тиристорного регулятора напряжения на обмотку электромагнита, и принимался в долях от разрушающей статической нагрузки. Для измерения деформации полимербетонов и арматуры использовался тензометрический мост ЦТМ-5, связанный с печатающим устройством. Тензодатчики сопротивления наклеивались по всей высоте сечения посередине балки и в растянутых зонах балки, причем в растянутой зоне тензодатчики наклеивались цепочкой.

Испытания на выносливость изгибаемых полимербетонных элементов производились с нагрузками, абсолютное значение которых составляли определенную долю от разрушающей кратковременной нагрузки, изменяющиеся от балки к балке при неизменном для всей серии коэффициенте асимметрии цикла равного 0,8.

**Результаты** эксперимента приведены в табл. 1. По результатам эксперимента получена линия выносливости, которая приведена на рис. 1. На базе  $2 \cdot 10^6$  цикла была получена величина предела выносливости эпоксидного композита на основе смолы ЭД-20, равная 40,3 МПа, что составляет 0,43  $R_B$ .



**Рисунок 1.** Линия выносливости эпоксидных композитов при циклическом сжатии (составлено авторами)



Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований  
эпоксидных композиционных материалов на выносливость

№ состава	Максимальное напряжение цикла, $\sigma_{\max}$ МПа	Отклонение от среднего значения	Квадратичное отклонение	Случайная величина, $\sigma \cdot R_b$	Количество циклов до нагружения, N	lg N	Отклонен. от среднего значения	Квадратичное отклонение	Произведение отклонений
1	60,4626	12,8254	164,4910	0,66	62100	4,7931	-1,0144	1,0290	-13,0101
2	58,6304	10,9932	120,8500	0,64	80200	4,9042	-0,9033	0,8159	-9,9302
3	56,7982	9,1610	83,9420	0,62	120210	5,0799	-0,7276	0,5294	-6,6655
4	54,9660	7,3288	53,7110	0,60	210520	5,3233	-0,4842	0,2344	-3,5486
5	53,1338	5,4966	30,2130	0,58	404700	5,6071	-0,2004	0,0401	-1,1015
6	51,3016	3,6644	13,4280	0,56	620510	5,7927	-0,0148	0,0002	-0,0542
7	49,4694	1,8322	3,3570	0,54	820910	5,9143	0,1068	0,0114	0,1957
8	47,6372	0,0000	0,0000	0,52	1000300	6,0001	0,1926	0,0371	0,0000
9	45,8050	-1,8322	3,3570	0,50	1222400	6,0872	0,2797	0,0782	-0,5125
10	43,9728	-3,6644	13,4280	0,48	1442300	6,1591	0,3516	0,1236	-1,2884
11	42,1406	-5,4966	30,2130	0,46	1662400	6,2207	0,4132	0,1707	-2,2712
12	40,3084	-7,3288	53,7110	0,44	1810410	6,2578	0,4503	0,2027	-3,3002
13	38,4762	-9,1620	83,9420	0,42	2003500	6,3018	0,4943	0,2443	-4,5288
14	36,6440	-10,9932	120,8500	0,40	2111310	6,3246	0,5171	0,2674	-5,6846
15	34,8118	-12,8254	164,4910	0,38	2221520	6,3467	0,5392	0,2907	-6,9155
	$\sigma_{\max}^{cp} = 47,6372$		939,9840			$\lg N^{cp} = 5,8075$		4,0751	-58,6155

Составлено авторами

Выводы

Проведен анализ современных теоретических методов прогнозирования полимерных композиционных материалов и установлено, что прогнозирование долговечности наиболее эффективно производить по циклической выносливости. Проведены испытания на выносливость полимербетонов при сжатии на образцах в виде призм размерами 100x100x400 мм на испытательной машине ГРМ-2А с частотой приложения нагрузки 670 циклов в минуту и коэффициентами асимметрии цикла  $\rho = 0,6$  с использованием стандартной методики. Осуществлена проверка адекватности математической модели с помощью критерия Фишера. Получены результаты экспериментальных исследований эпоксидных композиционных материалов на выносливость. Построена Линия выносливости эпоксидных композитов при циклическом сжатии. Установлены значения величины предела выносливости эпоксидного композиционного материала при циклическом нагружении при  $\rho = 0,6$ ,  $R_{b,pu1} = 0,43 R_b$  или 93,72 МПа, что позволяет судить о достаточной долговечности данного материала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Педдер, А.Ю. Усталость древесины / А.Ю. Педдер – Сыктывкар: КомиГИЗ, 1935. – 35 с.
2. Омелянов, А.Е. Результаты испытаний древесины дуба, липы, березы, ясеня и клена на усталость / А.Е. Омелянов // Механическая обработка древесины. – 1935. – № 2. – С. 34–41.
3. Пихачи-Арсеньев К.К. Усталость древесины / К.К. Пихачи-Арсеньев // Лесная промышленность. – 1938. – № 3. – С. 59–63.
4. Левченко П.Г. Исследование изгиба сталеполимербетонных балок под длительным действием пульсирующей и постоянной нагрузок / П.Г. Левченко // Армированный полимербетон в строительных конструкциях. Труды ВИСИ. – Воронеж: ВГУ. – Вып.6. – С. 14–27.
5. Левченко П.Г. Воздействие периодического нагружения пластиков на примере фурфуролацетонного полимербетона / П.Г. Левченко // Третья межвузовская конференция по применению пластмасс в строительстве. – Казань: 1972. – С. 45–52.
6. Чебаненко, А.И. Сопротивление полимербетона воздействиям динамических нагрузок / А.И. Чебаненко // Исследование строительных конструкций железнодорожного транспорта. – М.: Труды МИИТ. Вып. 653. – 1981. – С. 3–18.
7. Чебаненко, А.И. Исследование напряженно-деформируемых состояний несущих пластбетонных конструкций при помощи объемлющих диаграмм / А.И. Чебаненко // Конструктивные и химически стойкие полимербетоны. – Москва: Стройиздат, 1967. – С. 54–69.
8. Чебаненко, А.И. Основы расчета сталеполимербетонных конструкций. Сталеполимербетонные строительные конструкции / А.И. Чебаненко – М.: Стройиздат, 1972. – С. 121–149.
9. Чебаненко, А.И. Формирование контура объемлющей (структурной) диаграммы матрицы композиционного материала на феноменологической основе / А.И. Чебаненко, И.А. Чебаненко // В кн. Коррозионно-стойкие строительные конструкции из полимербетонов и армополимербетонов. Воронеж: ВорОТ, 1984. – С. 28–36.
10. Беляев, В.Е. Расчет армополимербетонных конструкций с учетом повышенных температур / В.Е. Беляев – В.: ВПИ, 1980. – 80 с.
11. Беляев, В.Е. Влияние повышенной температуры на прочность и деформативность полимербетонов при сжатии / В.Е. Беляев, В.М. Яковлев // Сборник «Исследования строительных конструкций с применением полимерных материалов». – Воронеж: изд. ВГУ, Вып. 3, 1976. – 130 с.
12. Яковлев, В.М. Влияние повышенной температуры на прочность и деформативность полимербетонов при растяжении / В.М. Яковлев // В сб.: Исследования строительных конструкций с применением полимерных материалов. – Воронеж: ВГУ, 1976. – Вып. 3. – с. 42.
13. Яковлев, В.М. Расчет полимербетонных конструкций на сжатие и растяжение с учетом температурно-временной аналогии / В.М. Яковлев – Липецк: ЛГТУ. 1998. – 150 с.
14. Яковлев, В.М. Кусочно-линейный метод термодинамического анализа процессов деформирования полимербетонов / В.М. Яковлев, Р.В. Бадулин // Научн.-техн. конф.: тез. докл. – Самара: СИТА, 1997. – С. 56.
15. Яковлев, В.М. Матричная форма расчета одномерного напряженно-деформированного состояния конструкций из полимербетона / В.М. Яковлев, Р.В. Бадулин // Научн.-техн. конф.: тез. докл. – Ростов: РГСУ, 1998. – с. 72.

16. Бондарев, Б.А. Коррозиестойкие полимерные материалы в элементах конструкций, воспринимающих динамические нагрузки / Б.А. Бондарев, А.И. Бураков и др. – Рук. деп. в ЦНТИ №87-19. – Липецк, 4 с.
17. Бондарев Б.А., Борков П.В., Бондарев А.Б. Сопротивление полимерных композиционных материалов действию циклических напряжений: учеб. Пособие. – Саратов. – 2017. – 154 с.
18. Бондарев, Б.А. Циклическая долговечность композиционных материалов в конструкциях транспортных сооружений / Б.А. Бондарев, Ю.В. Штефан, П.В. Комаров // Актуальные проблемы современного дорожного строительства и хозяйства: Сб. науч. тр. – Вологда, 2002. – С. 8–11.
19. Бондарев, Б.А. Полимерные композиционные материалы каркасной структуры / Б.А. Бондарев, П.В. Комаров, О.О. Корнеев, А.Ю. Сычёв, А.А. Мещеряков, И.В. Немахов // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 3, URL статьи: <https://esj.today/PDF/51SAVN320.pdf> (дата обращения: 25.02.2021).
20. Корнеев, О.О. Статическая малоцикловая усталость полимербетона / О.О. Корнеев, Р.Ю. Сапрыкин, А.О. Корнеева, Б.А. Бондарев // Современные проблемы строительной науки: сб. научн. тр. междунар. научн.-практич. конф. – Липецк, 2017. – С. 94–97.
21. Korneeva, A.O. The influence of structure-forming factors on the properties of polymer composite material under static loading = Влияние структурообразующих факторов на свойства полимерного композиционного материала при статическом нагружении / А.О. Korneeva, R.Y. Saprykin, A.B. Bondarev // Solid State Phenomena. – 2018. – Т. 284 SSP. – pp. 163–166.
22. Bondarev, V.A. Research of Fiberglass Polymer Concrete Switch Bars on Endurance Under Cyclic Loading = Исследование стеклопластполимербетонных брусьев стрелочных переводов на выносливость при циклическом нагружении / V.A. Bondarev, A.A. Kosta, A.Y. Sychev // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 147. – pp. 294–301.
23. Карпухин, Н.С. Исследование выносливости железобетона / Н.С. Карпухин // Строительные конструкции. – Труды МИИТ. – М.: МИИТ, 1959. – Вып.108. – С. 44–54.
24. Korneeva, A.O. Effective polyurethane compositions with industrial wastes = Эффективные полиуретановые композиты с промышленными отходами / А.О. Korneeva, O.O. Korneev, Al-Surraiwy H.G.H. // International journal of engineering and technology (UAE). – 2018. – Vol. 2.13 Special Issue 13., Т. 7. – pp. 240–246.
25. Bondarev, V.A. Risk management in requirements of the iso standarts in relation to logging roads = Управление рисками в требованиях стандартов ИСО применительно к лесовозным дорогам / V.A. Bondarev, Y.V. Shtefan // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2020. – Vol. 1 (45). – pp. 85–97.
26. Bondarev, V.A. Modeling the coupling of reinforcement in concrete based on an artificial neural network = Моделирование сцепления арматуры в бетоне на основе искусственной нейронной сети / V.A. Bondarev, A.N. Nikolyukin, V.P. Yartsev, Korneeva A.O. // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2019. – Vol. 3 (43). – pp. 6–16.
27. Bondarev, V.A. Accelerated method of predicting cyclic durability of polymer composite materials = Ускоренный метод прогнозирования циклической долговечности полимерных композиционных материалов / V.A. Bondarev, P.V. Komarov, A.B. Bondarev, P.V. Borkov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2014. – Vol. 2 (22). – pp. 27–33.

**Bondarev Boris Alexandrovich**

Lipetsk state technical university, Lipetsk, Russia  
E-mail: [lnsp-48@mail.ru](mailto:lnsp-48@mail.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7194-9270>

**Komarov Pavel Valeryevich**

Lipetsk state technical university, Lipetsk, Russia  
E-mail: [kpv@stu.lipetsk.ru](mailto:kpv@stu.lipetsk.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6684-587X>

**Kosta Anton Andreevich**

Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia  
E-mail: [KostaAA@mgsu.ru](mailto:KostaAA@mgsu.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4548-8359>

**Korneev Oleg Olegovich**

Lipetsk state technical university, Lipetsk, Russia  
E-mail: [pao2010@rambler.ru](mailto:pao2010@rambler.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8036-884>

**Bondarev Alexander Borisovich**

Lipetsk state technical university, Lipetsk, Russia  
E-mail: [lnsp-48@mail.ru](mailto:lnsp-48@mail.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2902-7528>

**Korneeva Anastasia Olegovna**

Lipetsk state technical university, Lipetsk, Russia  
E-mail: [lnsp-48@mail.ru](mailto:lnsp-48@mail.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2434-9536>

## Research of the endurance of epoxy composite materials under cyclic compression

**Abstract.** The widespread use of polymer composite materials is largely constrained by the complexity of predicting the characteristics of their stress-strain state under cyclic types of loading. Due to the poor knowledge of the behavior of polymer composite materials under this kind of loading. At present, it is rather difficult to predict the durability of polymer composite materials under static types of loading, and the available methods for materials of a crystalline structure and polymers are not always applicable to them. Insufficient theoretical and experimental data on the assessment of the stress-strain state of polymer concretes under prolonged loading. Under long-term action of cyclic loads, changes in the structure of polymer composite materials occur due to local self-heating at the tops of growing submicrocracks and the associated change in the elastic-hysteretic properties of the material. In this case, the energy of fatigue manifests itself, when the simultaneous multifactorial cyclic action of natural and force stresses leads to an effect that exceeds the total action of certain types of stresses. And, if such processes have been sufficiently studied for wood, a natural polymer material, then for artificial conglomerates, such as polymer composites, these issues require careful study.

Studies of the endurance of epoxy polymer concretes were carried out on samples of prisms 100x100x400 mm according to the method developed by the authors. The formula was used to determine the minimum number of samples required to build endurance lines. The value of the cycle asymmetry coefficient was taken equal to 0.6. The value of the maximum cyclic loading was taken from 0.62  $R_B$  with a gradual decrease.

The values of the endurance limit of an epoxy composite material under cyclic loading  $R_{в, pul} = 0.43 R_{в}$  or 93.72 MPa were obtained, which makes it possible to judge the sufficient durability of this material.

**Keywords:** endurance limit; epoxy composite material; cyclic loading; cyclic durability; self-heating temperature; structure-forming factors