

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ / CONSTRUCTION MATERIALS

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2018.12.5>

Бормотов А.Н.

ORCID: 0000-0001-7069-6603

Пензенский государственный технологический университет

АНАЛИЗ ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ РАНГОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

Аннотация

Предложена математическая реологическая модель композиционных материалов повышенной плотности и математический метод моделирования и анализа деформативных свойств полимерных композитов. Проведена оценка упруго-пластических свойств полимерных композиционных материалов повышенной плотности с помощью предложенных методик. Показаны высокие эксплуатационные свойства композитов и вычислительная эффективность предложенных методов оценки и моделирования деформативных свойств композитов повышенной плотности.

Ключевые слова: композиционные материалы, математическое моделирование, деформативные свойства.

Bormotov A.N.

ORCID: 0000-0001-7069-6603

Penza State Technological University

ANALYSIS OF DEFORMATIVE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS ENHANCED DENSITY THROUGH RANGE CORRELATIONS

Abstract

The article proposes a mathematical rheological model of high-density composite materials and a mathematical method for modeling and analyzing the deforming properties of polymeric composites. The evaluation of the elastic-plastic properties of polymeric composite materials of increased density was carried out with the help of the proposed techniques. High-performance properties of composites and computational efficiency of the proposed methods for evaluating and modeling the deforming properties of high-density composites are shown.

Keywords: composite materials, mathematical modeling, deformative properties.

Email авторов / Author email: aleks21618@yandex.ru

На этапах изготовления, эксплуатации и лабораторных испытаний композиционных материалов часто необходима подробная характеристика их упругих, высокоэластических и пластических свойств. Определение этих свойств по отдельности требует значительных затрат труда и времени.

Область применения тех или иных полимерных композиционных материалов (ПКМ) определяет специфику действующих на них нагрузок и свойств, которыми должны обладать эти материалы.

Существующие методы определения деформативных свойств, путём внедрения жёсткого индентора, дают мало информации о реологических свойствах полимерного материала [1, 2]. Применение сферического индентора для определения модуля упругости теоретически обосновано только для упругого деформирования тел [3, 4], что существенно ограничивает применимость метода для ПКМ повышенной плотности, особенно для определения их упруго-пластических свойств.

Полимеры в эластичном состоянии представляют собой высокодеформативные материалы с модулем упругости около 0,2 МПа, сравнимым по величине с модулем упругости газов – 0,1 МПа [5]. При отверждении полимеров значительно возрастает уровень межмолекулярного взаимодействия и плотность пространственной матричной сетки. В результате этого, они приобретают способность к деформированию подобно твёрдым телам.

Деформативные свойства наполненных ПКМ определяются совокупностью свойств полимерной матрицы и наполнителя. Физико-механические и деформативные свойства наполнителя, которого в системе содержится до 90 %, в 15-20 раз выше, чем аналогичные свойства у полимерной матрицы, поэтому деформативные свойства ПКМ повышенной плотности в значительно большей степени будут определяться деформативными свойствами наполнителя.

Для изучения деформативных свойств ПКМ повышенной плотности предлагается метод, основывающийся на внедрении конусообразного индентора, и позволяющий в течение 20-30 минут приближённо определить твёрдость (T), упругие (E_0 , $E_{ув}$, ϵ_y), высокоэластические ($E_{вэ}$, $\eta_{вэ}$, $\epsilon_{вэ}$), пластические ($\eta_{пл}$, $\epsilon_{пл}$, $k_{пл}$) и другие деформативные свойства материалов. В основе математического метода лежит представление материала в виде 4-х элементной реологической модели, представляющей собой последовательное соединение моделей Максвелла и Кальвина-Фойхта. Приближённым математическим выражением этой модели является представление общей относительной деформации ϵ как суммы упругой, высокоэластической и пластической составляющих [6].

Изучению подвергались литевые образцы размерами 30×30×30 мм и пресованные образцы размерами $H \times D = 30 \div 35 \times 30$ мм. Составы исследуемых образцов приведены в таблице 1.

Результатом измерения каждой из порядковых переменных является приписывание каждому из обследованных объектов некоторой условной числовой метки, обозначающей место объекта в ряду из всех n анализируемых

объектов, упорядоченном по убыванию степени проявления в них k -го, $k = \overline{0, p}$, изучаемого свойства. Число $x_k^{(i)}$, определяющее место $O^{(i)}$ по k -му признаку, называется **рангом i -го объекта по k -му признаку** (таблица 2).

Система понятий и методов, позволяющих измерять и анализировать статистическую связь, существующую между несколькими **ранжировками** одного и того же конечного множества объектов $O^{(1)}, O^{(2)}, \dots, O^{(n)}$ составляет раздел математической статистики, называемый анализом **ранговых корреляций**.

Таблица 1 – Составы исследуемых образцов [7]

№ состава	Содержание компонентов, % по массе.									
	ЭД-16	ПЭПА	ММ	ДБФ	ГЖ 136-41	Катапин	СМС	ОП-4	Песок	Заполнитель
1	16,26	2,44	-	-	-	-	-	-	-	81,30
2	8,97	1,35	-	-	-	-	-	-	-	89,69
3	6,19	0,93	-	-	-	-	-	-	-	92,88
4	8,81	1,32	-	1,76	-	-	-	-	88,11	-
5	8,93	1,34	-	-	0,45	-	-	-	-	89,29
6	8,58	1,29	-	-	-	4,29	-	-	-	85,84
7	8,58	1,29	-	-	-	-	4,29	-	-	85,84
8	8,58	1,29	-	-	-	-	-	4,29	-	85,84
9	8,89	1,33	0,89	-	-	-	-	-	-	88,89
10	5,19	0,78	0,52	-	-	-	-	-	-	93,51

Столбец с номером k , $k = \overline{0, p}$, указанной таблицы представляет собой перестановку из n натуральных чисел $1, 2, \dots, n$, определяющую порядковые места объектов $O^{(1)}, O^{(2)}, \dots, O^{(n)}$ в ряду, упорядоченном по свойству x_k . Ниже приводятся результаты исследований деформативных свойств 10 видов эпоксидных композитов (объекты) с указанием значений 14 различных показателей (“свойств”). В клетках в правом верхнем углу указаны соответствующие ранги (таблица 3).

Для всех исследуемых составов, относящихся к одной группе материалов, экспериментально был определён коэффициент пропорциональности между твёрдостью (T) и прочностью ($R_{сж}$), который равен 0,195.

Таблица 2 – Принцип ранжирования

Порядковый номер объекта	Порядковый номер исследуемой переменной (“Свойства”)						
	0	1	2	...	k	...	p
1	$x_0^{(1)} = y^{(1)}$	$x_1^{(1)}$	$x_2^{(1)}$	...	$x_k^{(1)}$	...	$x_p^{(1)}$
2	$x_0^{(2)} = y^{(2)}$	$x_1^{(2)}$	$x_2^{(2)}$	...	$x_k^{(2)}$	...	$x_p^{(2)}$
⋮				
i	$x_0^{(i)} = y^{(i)}$	$x_1^{(i)}$	$x_2^{(i)}$	...	$x_k^{(i)}$	...	$x_p^{(i)}$
⋮				
n	$x_0^{(n)} = y^{(n)}$	$x_1^{(n)}$	$x_2^{(n)}$	...	$x_k^{(n)}$	...	$x_p^{(n)}$

Условно-мгновенный модуль упругости (E_0 , МПа) характеризует только упругие деформации материала, развивающиеся практически по линейному закону Гука при достаточно быстром нагружении. По величине E_0 судят об однородности структуры, о дефектности и прочности материала.

Модуль деформации материала ($E_{д15}$, МПа) характеризует прочность, плотность и однородность материала. Чем выше $E_{д15}$, тем более прочный и плотный материал.

Модуль высокоэластичности ($E_{вэ}$, МПа) характеризует наличие упругого послейдействия материала, а равновесный модуль упругости ($E_{ув}$, МПа) характеризует работу материала в упруго-пластичной стадии и учитывает упругую и высокоэластическую составляющие деформации.

Все 10 исследуемых составов можно условно разделить на несколько групп: 1-3 – влияние степени наполнения; 4-8 – влияние модифицирующих добавок, где 4 – контрольный (традиционно применяемый состав); 9 – оптимальный литьевой состав; 10 – оптимальный прессованный состав [7, 8].

Таблица 3 – Деформативные свойства эпоксидных композитов повышенной плотности

Показатели	Составы (объекты)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа	117	100	120	57,3	98,6	102	79,0	63,7	73,9	86,7
2. Твёрдость T , МПа	6,01	5,05	6,15	2,94	5,06	5,23	4,05	3,40	3,79	4,44
3. Модуль деформации материала $E_{д15}$, МПа	$3,62 \cdot 10^4$	$4,71 \cdot 10^4$	$3,51 \cdot 10^4$	$10,6 \cdot 10^4$	$4,71 \cdot 10^4$	$4,48 \cdot 10^4$	$6,57 \cdot 10^4$	$8,52 \cdot 10^4$	$7,25 \cdot 10^4$	$5,71 \cdot 10^4$
4. Условно-мгновенный модуль упругости E_0 , МПа	$6,07 \cdot 10^4$	$6,85 \cdot 10^4$	$6,70 \cdot 10^4$	$4,48 \cdot 10^4$	$7,82 \cdot 10^4$	$8,27 \cdot 10^4$	$10,1 \cdot 10^4$	$13,9 \cdot 10^4$	$13,7 \cdot 10^4$	$9,27 \cdot 10^4$
5. Равновесный модуль упругости $E_{ув}$, МПа	$4,41 \cdot 10^4$	$5,53 \cdot 10^4$	$6,28 \cdot 10^4$	$3,94 \cdot 10^4$	$5,52 \cdot 10^4$	$8,22 \cdot 10^4$	$9,86 \cdot 10^4$	$10,3 \cdot 10^4$	$11,1 \cdot 10^4$	$7,94 \cdot 10^4$
6. Модуль высокоэластичности $E_{вэ}$, МПа	$18,1 \cdot 10^4$	$16,7 \cdot 10^4$	$16,3 \cdot 10^4$	$12,2 \cdot 10^4$	$15,9 \cdot 10^4$	$14,2 \cdot 10^4$	$19,4 \cdot 10^4$	$17,5 \cdot 10^4$	$19,5 \cdot 10^4$	$13,9 \cdot 10^4$
7. Доля упругой составляющей ϵ_y	0,398	0,587	0,647	0,733	0,602	0,541	0,499	0,531	0,582	0,408
8. Доля высокоэластической составляющей $\epsilon_{вэ}$	0,125	0,164	0,173	0,187	0,192	0,153	0,166	0,140	0,173	0,204
9. Доля пластической составляющей $\epsilon_{пл}$	0,299	0,199	0,102	0,101	0,093	0,103	0,112	0,084	0,095	0,018
10. Коэффициент пластической вязкости $y_{пл}$, МПа·с	$2,72 \cdot 10^5$	$1,56 \cdot 10^5$	$1,12 \cdot 10^5$	$2,26 \cdot 10^5$	$1,23 \cdot 10^5$	$1,37 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^5$	$1,34 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^5$	$1,11 \cdot 10^5$
11. Коэффициент высокоэластической вязкости $y_{вэ}$, МПа·с	$2,88 \cdot 10^7$	$5,14 \cdot 10^7$	$5,65 \cdot 10^7$	$2,18 \cdot 10^7$	$5,06 \cdot 10^7$	$5,54 \cdot 10^7$	$6,06 \cdot 10^7$	$6,06 \cdot 10^7$	$5,48 \cdot 10^7$	$6,48 \cdot 10^7$
12. Коэффициент пластичности $k_{пл}$	1,4	0,9	0,6	0,7	0,43	0,52	0,51	0,47	0,93	0,08
13. Коэффициент структуры $k_{стр}$	5,4	14,5	14,2	7,8	13,2	13,8	14,2	14,8	15,0	16,1
14. Коэффициент энергоёмкости $k_{эн}$	0,5	0,65	0,7	0,6	0,6	0,57	0,62	0,61	0,59	0,85

При упорядочении объектов по некоторому признаку x_k одновременно несколько объектов могут оказаться неразличимыми по степени проявления в них свойства x_k . Тогда каждому из объектов этой группы приписывается ранг, равный среднему арифметическому значению рангов указанных объектов. Полученные при этом ранги называются **объединёнными**, или **связанными**.

Возможны **три основные задачи** статистического анализа связей между ранжировками [9].

1. Анализ структуры совокупности упорядочений

$$X_k = (x_k^{(1)}, x_k^{(2)}, \dots, x_k^{(n)})^T, \quad k = \overline{0, p}.$$

Если точки x_k разбросаны равномерно по всей области их возможных значений

$$1 \leq x_k^{(i)} \leq n, \quad i = \overline{1, n},$$

то можно говорить об отсутствии связи или согласованности между ранжировками (свойствами материала).

При наличии сгустка (ядра) близко лежащих друг от друга точек можно говорить о согласованности переменных.

При наличии нескольких ядер можно говорить о наличии нескольких подмножеств переменных с высокой степенью взаимосвязей между входящими в ядра переменными.

2. Анализ интегральной (совокупной) согласованности переменных и их условная ранжировка по критерию степени тесноты связи каждой из них с остальными переменными [10].

Например, такая задача возникает при исследовании степени согласованности мнений группы экспертов и условном упорядочении экспертов по их компетентности. В основе этого анализа лежит определение **коэффициента совокупной согласованности – коэффициента конкордации** для различных комбинаций переменных.

3. Наилучшее (в определённом смысле) восстановление ранжировки $X_0 = (x_0^{(1)}, x_0^{(2)}, \dots, x_0^{(n)})^T$, связанной с результирующей переменной $y = \Delta x_0$, по ранжировкам X_1, X_2, \dots, X_p , соответствующим объясняющим переменным x_1, x_2, \dots, x_p (задача регрессии на порядковых (ординальных) переменных).

Зная о влиянии тех или иных физико-механических свойств друг на друга, о тесноте связи между свойствами материала, можно судить о процессах образования структуры, о характеристиках структуры, строить структурную модель и прогнозировать поведение композиционного материала в агрессивных средах.

Для определения тесноты связи между ранжировками X_k, X_j используется коэффициент корреляции Спирмена (введён К. Спирменом в 1904 г. при исследованиях в области психологии):

$$\hat{\tau}_{kj}^{(s)} = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n (x_k^{(i)} - x_j^{(i)})^2. \quad (1)$$

При совпадающих ранжировках $(1, 2, \dots, n)^T, (1, 2, \dots, n)^T$, то есть при $x_k^{(i)} = x_j^{(i)} \forall i = \overline{1, n}$, получим $\hat{\tau}_{kj}^{(s)} = 1$.

При противоположных ранжировках $(1, 2, \dots, n)^T, (n, (n-1), \dots, 1)^T$, то есть при $x_k^{(i)} = (n+1) - x_j^{(i)} \forall i = \overline{1, n}$, получим $\hat{\tau}_{kj}^{(s)} = -1$.

Формула (1) пригодна лишь в случае отсутствия объединённых рангов в ранжировках X_k, X_j .

При ранжировке по признаку x_k имеется m_k групп с неразличимыми рангами, и пусть далее n_q^k – число элементов в q -й группе, $q = \overline{1, m_k}$.

Введём для ранжировки по признаку x_k величину:

$$T_k = \frac{1}{12} \sum_{q=1}^{m_k} [(n_q^k)^3 - n_q^k]. \quad (2)$$

Если q -я группа состоит лишь из одного элемента ($n_q^k = 1$), то $(n_q^k)^3 - n_q^k = 0$, и эти элементы в расчёте величины T_k фактически не участвуют.

При отсутствии объединённых рангов при ранжировке по признаку x_k будем иметь $m_k = n; n_1^k = n_2^k = \dots = n_n^k = 1$, и соответственно $T_k = 0$.

В общем случае для анализа парных ранговых статистических связей используется ранговый коэффициент корреляции Спирмена, вычисляемый по формуле:

$$\hat{\tau}_{kj}^{(s)} = \frac{\frac{1}{6}(n^3 - n) - \sum_{i=1}^n (x_k^{(i)} - x_j^{(i)})^2 - (T_k + T_j)}{\sqrt{\left[\frac{1}{6}(n^3 - n) - 2T_k \right] \left[\frac{1}{6}(n^3 - n) - 2T_j \right]}}. \quad (3)$$

Если T_k и T_j малы по сравнению с $\frac{1}{6}(n^3 - n)$, то можно воспользоваться приближённой формулой:

$$\hat{\tau}_{kj}^{(s)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_k^{(i)} - x_j^{(i)})^2}{\frac{1}{6}(n^3 - n) - (T_k + T_j)}, \quad (4)$$

(формула точна при $T_k = T_j$).

При анализе парных ранговых статистических связей между ранжировками часто удобнее пользоваться **ранговым коэффициентом корреляции Кендалла**.

Ранговый коэффициент корреляции Кендалла определяется в виде:

$$\hat{\tau}_{kj}^{(s)} = 1 - \frac{2S}{\frac{1}{2}n(n-1)}. \quad (5)$$

При совпадающих ранжировках $S = 0$ и $\hat{\tau}_{kj}^{(k)} = 1$, а при противоположных – $\hat{\tau}_{kj}^{(k)} = -1$, так как в этом случае $S = \frac{1}{2}n(n-1)$.

Вычисление $\hat{\tau}_{k,j}^{(k)}$ связано с трудоёмким вычислением S . Однако коэффициент Кендалла обладает некоторыми преимуществами по сравнению с коэффициентом Спирмена. А именно:

- при добавлении к n исследованным объектам новых значений коэффициент Кендалла можно вычислить как сумму старого его значения и некоторой добавки (то есть рекуррентным способом), что упрощает перерасчёт $\hat{\tau}_{k,j}^{(k)}$, а при вычислении $\hat{\tau}_{k,j}^{(s)}$ требуется перерасчёт разностей $x_k^{(i)} - x_j^{(i)}$;
- значительно лучше исследованы статистические свойства, в частности, выборочное распределение коэффициента Кендалла;
- $\hat{\tau}_{k,j}^{(k)}$ обладает большими возможностями при исследовании частной корреляции рангов.

Указанная формула для вычисления $\hat{\tau}_{k,j}^{(k)}$ (5) пригодна лишь в случае отсутствия объединённых рангов в ранжировках x_k, x_j .

В общем случае ранговый коэффициент Кендалла определяется по формуле:

$$\hat{\tau}_{k,j}^{(k)} = \frac{\hat{\tau}_{k,j}^{(k)} - \frac{2(u_k + u_j)}{n(n-1)}}{\sqrt{\left(1 - \frac{2u_k}{n(n-1)}\right)\left(1 - \frac{2u_j}{n(n-1)}\right)}}, \quad (6)$$

в которой $\hat{\tau}_{k,j}^{(k)}$ вычисляется по (6), а $u_k = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^{m_k} n_q^k (n_q^k - 1)$; $u_j = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^{m_j} n_q^j (n_q^j - 1)$.

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендалла связаны между собой. Это является следствием того, что оба коэффициента – линейные функции от числа инверсий в перестановке. А именно: $\hat{\tau}_{k,j}^{(s)} \approx 1,5 \hat{\tau}_{k,j}^{(k)}$, при условии, что абсолютные величины их значений не слишком близки к 1 и $n \geq 10$.

При определении коэффициентов Спирмена и Кендалла речь, таким образом, шла о **выборочных характеристиках** ранговой связи.

Возникает вопрос, как точно выборочные характеристики, определённые по формулам (1) – (6), оценивают истинные теоретические значения.

Под теоретическими значениями коэффициентов $\hat{\tau}_{k,j}^{(s)}$, $\hat{\tau}_{k,j}^{(k)}$ понимаются значения, вычисленные по формулам (1) – (6) с заменой объёма выборки n объёмом N генеральной совокупности.

Доверительный интервал для $\hat{\tau}^{(k)}$ есть интервал $\left(\hat{\tau}^{(k)} - t_\beta \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}; \hat{\tau}^{(k)} + t_\beta \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \right)$, где t_β определяется из условия

$$\beta = 2 \Phi(t_\beta), \text{ а } \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \text{ (при } \beta = 0,95 \text{ будем иметь } t_\beta = 1,96).$$

При использовании коэффициента Спирмена проверка значимости осуществляется по неравенству $|\hat{\tau}^{(s)}| > t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2) \sqrt{\frac{1-\tau^{(s)^2}}{n-2}}$, где $t_{\frac{\alpha}{2}}$ – 100 $\frac{\alpha}{2}$ %-ная точка распределения Стьюдента.

После проведения всех статистических расчетов и анализа результатов можно сделать вывод, что при увеличении степени наполнения ПКМ до значений П/Н = 1/15 ÷ 1/18 (по массе) формируется однородная бездефектная структура, о чём свидетельствует возрастание значений $E_o, E_{д15}, E_{ув}, E_{вз}$ и наличие тесной существенной связи между ними ($\hat{\tau}_{k,j}^{(k)}$,

$\hat{\tau}_{k,j}^{(s)} = 0,889 \div 0,993$). При достижении отношения П/Н = 1/20 наблюдается снижение упругих характеристик ПКМ вследствие увеличения пористости и образования более дефектной структуры. Таким образом, степень наполнения П/Н = 1/20 для данных композитов является предельной. Матрица таких композитов находится в тонкоплёночном и островковом состояниях. При наполнении композитов выше предельных значений вследствие более плотной и жесткой упаковки частиц наполнителя, ухудшается их смачиваемость, что приводит к закапсулированию частиц наполнителя. Малые зазоры между частицами способствуют дроблению плёнки по причине её термодинамической неустойчивости, что при вибролитьевой технологии сопровождается интенсивным порообразованием. И то, и другое, в комплексе, значительно снижает физико-механические свойства материалов.

В высоконаполненных композитах под действием давления прессования происходит тесное сближение между частицами наполнителя и принудительное заполнение зазоров между ними связующим. Вследствие энергетической природы внутреннего трения полимеров, в центре сечения зазора будет наблюдаться наибольшая скорость течения связующего, а вдоль стенок зазора – скорость течения будет стремиться к нулю. Последнее создает благоприятные условия для адсорбции связующего в виде тонких плёнок, о чем свидетельствуют максимальные значения высокоэластических деформаций.

Введение модифицирующих добавок вызывает увеличение всех модулей упругости (E_0 , $E_{д15}$, $E_{ув}$ и $E_{вз}$), что говорит о более упорядоченной, бездефектной и плотной структуре. Наибольшее влияние оказывают ПАВ анионактивного и неионогенного типов. Макромолекулы высоконаполненных ПКМ имеют весьма низкую конформационную подвижность. Модификаторы и пластификаторы увеличивают подвижность молекул олигомера и улучшают смачиваемость, улучшают сцепление между частицами наполнителя и полимерной матрицей, образуют гибкие пространственные сетки и замедляют полимеризацию, что способствует быстрому протеканию релаксационных процессов. В результате всех вышеперечисленных явлений в объёмной матрице преобладает, в основном, кристаллитная фаза, которая и обуславливает низкую деформативность и высокую жёсткость композитов, что соответствует прочной, плотной и бездефектной структуре ($\hat{\tau}_{k,j}^{(s)}$, $\hat{\tau}_{k,j}^{(k)} = 0,998$).

По абсолютным значениям коэффициентов Спирмена и Кендалла, а также модулей деформаций (E_0 , $E_{д15}$, $E_{ув}$ и $E_{вз}$) ПКМ повышенной плотности относятся к твёрдым, низкодеформативным, жёстким материалам, хорошо сопротивляющимся сжимающим нагрузкам.

Наличие во всех ПКМ обратимых и необратимых деформаций, упругого последствия и очень малых пластических деформаций подтверждает предположение о кристаллитном строении матрицы. Небольшая доля высокоэластических деформаций свидетельствует о состоянии полимерной матрицы в виде жёстких пространственных каркасов.

Введение пластификаторов приводит к увеличению деформативности ПКМ (снижению значений E_0 , $E_{д15}$, $E_{ув}$ и $E_{вз}$) и улучшает реологические показатели смесей. Данное обстоятельство позволяет вводить в ПКМ дисперсные легирующие добавки (например PbO), повышающие защитные свойства ПКМ при действии ионизирующих излучений. Наличие связей между $E_0 \leftrightarrow \epsilon_y$, $E_{вз} \leftrightarrow \epsilon_{вз}$, $E_{ув} \leftrightarrow \epsilon_{пл}$ свидетельствует, что при прессовании высоконаполненных ПКМ (П/Н = 1/18) действие пластификатора проявляется более сильно, чем при изготовлении вибролитьевых композитов (П/Н = 1/10).

В табл. 3. коэффициент пластичности – $k_{пл}$ – определяли при условии бездефектности или максимальной "когезионной прочности". Выявлена существенная связь между $k_{пл}$ и $\epsilon_{пл}$. По этому показателю все ПКМ относятся к группе среднепластичных материалов [6, табл. 4].

Коэффициент структуры – $k_{стр}$ – характеризует наличие пространственной сетки, упрочнения структуры полимера. Является самостоятельным показателем, не связанным ни с одним из определяемых ранее. Чем больше $k_{стр}$, тем более развитую пространственную, сетчатую, сшитую трёхмерную структуру полимерного связующего имеет материал. По этому показателю малонаполненные ПКМ частично имеют пространственную структуру, а при увеличении степени наполнения, при одновременном действии пластификаторов и модификаторов, в ПКМ появляется развитая пространственная структура (состав № 10).

Коэффициент энергоёмкости материала – $k_{эн}$ – выведен из представлений о том, что требуемая для разрушения материала энергия увеличивается при увеличении прочности на сжатие и предельной деформации материала до разрушения. Является самостоятельным показателем, $k_{эн}$ примерно соответствует удельной работе деформации, затраченной на единицу объёма материала, и измеряется в Дж/м³. По этому показателю все исследуемые композиты относятся к среднеэнергоёмким материалам [6, табл. 4].

Таким образом, проведённая оценка упруго-пластических свойств полимерных композиционных материалов повышенной плотности при помощи предложенной математической реологической модели композиционных материалов и математического метода моделирования и анализа деформативных свойств на основе ранговых корреляций, подтвердила высокие эксплуатационные свойства рассмотренных композитов и показала высокую вычислительную эффективность предложенных методов оценки и моделирования деформативных свойств полимерных композитов.

Список литературы / References

1. Канавец И.Ф., Баталова Л.Г. Новый прибор-эластомер для определения структурно-механических свойств полимерных материалов / Пластические массы. – № 2. – 1960. – 68 с.
2. Пашнина В.И., Марковец М.П. Прибор для определения предела и модуля упругости вдавливанием шара / Авт. свид. № 167343, БИ №1, 1965.
3. Айнбиндер С.Б., Лака М.Г. О твёрдости полимерных материалов / Механика полимеров. – № 3. – 1966. – с. 337-346.
4. Лийв Э.Х., Мармор С.А. О кинетике и механизме твердения полимерцементных покрытий / Сб. НИИ строительства Госстроя Эстонской ССР. Исследования по строительству. Технология и долговечность автоклавных бетонов. – Таллин, 1973. – с. 38-44.
5. Грасси Н. Химия процессов деструкции полимеров. – М.: Иностранная литература, 1959. – 152 с.
6. Лийв Э.Х., Машегиров А.Д. Методика определения физико-механических свойств полимерных композиций путем внедрения конусообразного индентора. – Таллин: Эст. НИИТНИ, 1983. – 30 с.
7. Бормотов А.Н. Пластифицированные эпоксидные композиты повышенной плотности. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. – Пенза, 1999. – 196 с.
8. Бормотов А.Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов специального назначения. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пензенский государственный технологический университет. – Пенза, 2011. – 275 с.
9. Коновалов В.В., Лянденбургский В.В., Баженов А.В. Основы научных исследований / Учебное пособие. – Пенза, Изд-во ПГУАС, 2013. – 396 с.
10. Тарасов Д.А., Коновалов В.В., Зайцев В.Ю. Математическое моделирование оптимизации параметров несущих элементов, выполненных из стальных канатов / Интеграл. – 2012. – № 6. – С. 118-120.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kanavec I.F., Batalova L.G. Novyj pribor-ehlastomer dlya opredeleniya strukturno-mekhanicheskikh svojstv polimernyh materialov [New device-elastomer to determine the structural and mechanical properties of polymeric materials] / Plasticheskie massy [Plastics mass]. – № 2. – 1960. – 68 P. [in Russian]
2. Pashnina V.I., Markovec M.P. Pribor dlya opredeleniya predela i modulya uprugosti vdavlivaniem shara [A device for determining the limit and modulus of elasticity by pressing the ball] / Avt. свид. [Certificate of authorship] № 167343, BI №1, 1965. [in Russian]
3. Ajnbinder S.B., Laka M.G. O tvyordosti polimernyh materialov [On the hardness of polymeric materials] / Mekhanika polimerov [Mechanics of polymers]. – № 3. – 1966. – pp. 337-346. [in Russian]
4. Lijv E.H., Marmor S.A. O kinetike i mekhanizme tverdeniya polimercementnyh pokrytij [On the kinetics and mechanism of hardening polymer-cement coatings] / Sb. NII stroitel'stva Gosstroya EHstonskoj SSR. Issledovaniya po stroitel'stvu. Tekhnologiya i dolgovechnost' avtoklavnyh betonov [Coll. Research Institute of Construction of the Gosstroy of the Estonian SSR. Research on construction. Technology and durability of autoclaved concretes]. – Tallin, 1973. – pp. 38-44. [in Russian]
5. Grassi N. Himiya processov destrukcii polimerov [Chemistry of polymer decomposition processes]. – M.: Inostrannaya literature [Foreign literature], 1959. – 152 P. [in Russian]
6. Lijv E.H., Mashegirov A.D. Metodika opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh svojstv polimernyh kompozicij putem vnedreniya konusoobraznogo indentora [Method for determining the physicomechanical properties of polymer compositions by introducing a cone-shaped indenter]. – Tallin: EHst. NIITNI, 1983. – 30 P. [in Russian]
7. Bormotov A.N. Plastificirovannye ehpkosidnye kompozity povy-shennoj plotnosti. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandi-data tekhnicheskikh nauk [Plasticized epoxy composites of high density. Thesis for the degree of candidate of technical sciences] / Penzenskij gosudarstvennyj universitet arhitektury i stroitel'stva [Penza State University of Architecture and Construction]. – Penza, 1999. – 196 P. [in Russian]
8. Bormotov A.N. Matematicheskoe modelirovanie i mnogokriterial'nyj sintez kompozicionnyh materialov special'nogo naznacheniya. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Mathematical modeling and multi-criteria synthesis of special purpose composite materials. Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences] / Penzenskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet [Penza State Technological University]. – Penza, 2011. – 275 P. [in Russian]
9. Konovalov V.V., Lyandenburskij V.V., Bazhenov A.V. Osnovy nauchnyh issledovanij [Basics of research] / Uchebnoe posobie [textbook]. – Penza, Izd-vo PGUAS, 2013 [Penza, Publishing house of PGUAS]. – 396 P. [in Russian]
10. Tarasov D.A., Konovalov V.V., Zajcev V.YU. Matematicheskoe modelirovanie optimizacii parametrov nesushchih ehlementov, vypolnennyh iz stal'nyh kanatov [Mathematical modeling of optimization of parameters of bearing elements made of steel ropes] / Integral. – 2012. – № 6. – Pp. 118-120. [in Russian]