

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ И РЕЛАКСАЦИЮ КОНСТРУКЦИОННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА

THE INFLUENCE OF LONG-TERM PROCESSES ON THE CREEP AND RELAXATION OF STRUCTURAL FIBERGLASS

В. Е. БАТРАК, канд. техн. наук

В. В. БОБРЯШОВ

Приводятся результаты оценки ползучести и релаксации композитного материала с полимерной матрицей – однонаправленного стеклопластика. В результате экспериментальных исследований определены параметры функций влияния по кривым релаксации материала. Показана необходимость учёта влияния ползучести и релаксации на изменение напряжённо-деформированного состояния конструкций из композитных материалов.

The article presents the results of the creep and relaxation evaluation of a composite material with a polymer matrix – unidirectional fiberglass. As a result of experimental studies, the parameters of the effect functions on the material relaxation curves are determined. The need to take into account the effect of creep and relaxation on the change in the stress-strain state of structures made of composite materials is shown.

Ключевые слова:

Вязкоупругие характеристики, длительная прочность, композитные материалы, конструкционные стеклопластики, ползучесть, релаксация

Key words:

Composite materials, creep, long-term strength, relaxation, structural fiberglass, viscoelastic characteristics

В настоящее время в России расширяется применение композитных материалов в строительных конструкциях. Такие свойства как высокая удельная прочность, малая плотность, износостойкость, хорошее сопротивление воздействию агрессивных сред, высокие электроизоляционные характеристики и технологичность изготовления делают композитные

материалы незаменимыми для использования в строительных конструкциях различного назначения. В то же время в России имеются лишь отдельные длительно эксплуатируемые крупногабаритные конструкции из композитных материалов. Опыт эксплуатации таких конструкций свидетельствует том, что основным условием их успешной эксплуатации является достоверная оценка длительных характеристик материала конструкции [1].

Длительные эксплуатационные характеристики композитных материалов, в частности, стеклопластиков, обычно оцениваются по трём основным показателям. Это явления ползучести и релаксации, определяющие длительные деформации конструкций, длительная прочность при постоянных нагрузках и длительная прочность при переменных нагрузках (выносливость).

Ползучесть и релаксация композитных материалов с полимерной матрицей (связующим) являются их характерными особенностями и проявляются даже при комнатной температуре, поэтому вопросы напряжённо-деформированного состояния конструкций из композитных материалов следует решать с учетом фактора времени.

Известно, что практически все композитные материалы с полимерной матрицей обладают также свойством обратной ползучести. При разгрузке часть деформации композитов вследствие упругих свойств полимерного связующего восстанавливается, а затем происходит процесс упругого последействия вследствие постепенного исчезновения высокоэластичной деформации. Таким образом, композитные материалы с полимерными матрицами проявляют под нагрузкой вязкоупругие свойства. Наиболее полно это явление – вязкоупругость – учитывается в наследственных теориях ползучести. При определении напряжённо-деформированного состояния конструкций из вязкоупругих материалов используются соотношения, связывающие напряжения, деформации и время.

В статье приводятся результаты оценки ползучести и релаксации композитного материала с полимерной матрицей – однонаправленного стеклопластика под торговым названием FibberPull, вырабатываемого на основе ненасыщенных смол, минеральных наполнителей и стекловолоконных армирующих материалов методом пултрузии, при растяжении вдоль направления армирования.

Образцы композитного материала для эксперимента вырезали из стеклопластиковой прямоугольной трубы FT 40 × 25 × 3 × 3, изготавливаемой из материала FibberPull. Плотность образцов материала составляла в среднем 1,84 г/см³.

Обычно параметры функций влияния – ядер ползучести – определяются посредством обработки кривых ползучести или релаксации. Определение параметров ядер ползучести по кривым ползучести требует применения испытательных машин, позволяющих испытывать композитные материалы в режиме постоянного напряжения, что, учитывая обычное изменение поперечного сечения образцов при деформировании, реализовать обычно сложнее.

Второй путь – определение параметров ядер по кривым релаксации – часто более удобен, так как требует применения испытательных машин, позволяющих испыты-

вать материалы в режиме постоянной деформации, и устройств, позволяющих записывать изменение напряжения в образцах в течение длительного времени.

Определение вязкоупругих характеристик композитного материала обычно сводится к задаче нахождения аналитического выражения для описания длительного деформирования материала на основе результатов эксперимента – построением функции влияния.

Для образцов композитного материала первоначально определяли кратковременную прочность образцов при растяжении. Испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ 32656-2014 «Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение». Для испытаний вдоль направления армирования были использованы образцы тип А.

Перед проведением испытаний образцы кондиционировали по ГОСТ 12423-2013 «Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)» при температуре (23 ± 2) °С и влажности $(50 \pm 10)\%$ в течение 24 ч. Испытания образцов проводили в той же стандартной атмосфере, при которой велось кондиционирование.

Испытания проводили на немецкой универсальной испытательной машине FP 100/1, обеспечивающей измерение нагрузки с точностью 1 % измеряемой величины, с фиксацией диаграмм «нагрузка-деформация» в автоматическом режиме. Скорость нагружения образцов при испытании вдоль направления армирования составляла 2 мм/мин. В качестве измерителя деформаций использовали многоканальный тензометрический комплекс с тензодатчиками с базой 5 мм.

Результаты кратковременных испытаний 10 образцов при растяжении представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты кратковременных испытаний на растяжение вдоль волокон композитного материала FibberPull

<i>Среднее значение, МПа</i>	<i>Медиана, МПа</i>	<i>Мода (наименьшая), МПа</i>	<i>Коэффициент вариации, %</i>	<i>Асимметрия</i>	<i>Экссесс</i>
576,2	592,5	396,0	14,6	-0,854	1,762

Значения асимметрии и эксцесса результатов испытаний свидетельствуют о том, что распределение кратковременной прочности образцов примерно соответствует нормальному распределению.

Параметры функции влияния для исследуемого материала определяли из испытания на релаксацию при растяжении. При испытании материала при нормальных температурно-влажностных условиях были получены серии кривых релаксации.

Образцы для испытания на релаксацию, условия кондиционирования и испытания образцов принимали такими же, как и при кратковременных испытаниях материала.

Кривые релаксации при растяжении были получены измерением в различные отрезки времени напряжений в образцах при постоянной деформации. Всего было испытано 10 образцов композитного материала.

Кратковременное деформирование материала до заданной деформации производилось таким образом, чтобы напряжение в образцах составляло от 0,1 до 0,3 от кратковременной прочности при растяжении образцов.

Испытания композитного материала на релаксацию, как и кратковременные испытания, проводили на немецкой универсальной испытательной машине FP 100/1.

Деформации каждого образца $\epsilon_k(0)$, достигнутые и зафиксированные в конце этапа нагружения, делились на экспериментальные значения напряжений в материале $\sigma(t)$, зафиксированные в разные отрезки времени экспонирования образцов при постоянной деформации. Полученные при этом кривые податливости $\epsilon_k(0)/\sigma(t)$ укладывались в узкий пучок с разбросом менее 7 %, что свидетельствовало о высоком уровне линейности вязкоупругих свойств материала.

Для удобства обработки кривых релаксации каждое экспериментальное значение напряжения делением на начальное напряжение в образце, достигнутое к моменту начала релаксации, приводили к безразмерному виду – $\sigma(t)/\sigma(0)$.

Всю экспериментальную информацию по данным испытаний образцов на релаксацию представляли в виде таблицы средних значений, стандартного отклонения, коэффициента вариации, асимметрии и эксцесса относительных напряжений за каждый отрезок времени экспонирования образцов.

Измерения напряжений в образцах проводили в следующие отрезки времени экспонирования образцов t_k : 0 мин (конец нагружения образцов – начало релаксации), 9 минут, 5 часов, 4 суток, 7 суток, 30 суток, 60 суток.

Результаты статистической обработки результатов испытаний образцов на релаксацию для каждого промежутка времени t_k от 9 минут до 60 суток приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты статистической обработки результатов испытаний образцов на релаксацию

Показатели	Время экспонирования					
	9 мин	5 ч	4 сут	7 сут	30 сут	60 сут
Среднее значение	0,846	0,828	0,804	0,801	0,787	0,767
Стандартное отклонение	0,102	0,105	0,105	0,104	0,104	0,105
Коэффициент вариации	0,120	0,126	0,130	0,129	0,132	0,137
Асимметрия	-0,009	-0,018	-0,016	-0,016	-0,016	-0,017
Эксцесс	-2,529	-2,509	-2,512	-2,512	-2,500	-2,517

Выражение для релаксации напряжений при постоянных уровнях деформаций можно получить из общего уравнения вязкоупругости для релаксации материала:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) - E \int_0^t T(t-\tau)\varepsilon(\tau) d\tau. \quad (1)$$

Для описания релаксации композитного материала была выбрана функция влияния в виде слабо сингулярного ядра А. М. Колтунова: $T(t) = Ae^{-\beta t} t^{\alpha-1}$.

Уравнение (1) при постоянной деформации $\varepsilon_k = \text{const}$ принимает вид

$$\sigma(t) = E\varepsilon_k \left[1 - \int_0^t T(\tau) d\tau \right]. \quad (2)$$

Средние значения экспериментальных данных по релаксации композитного материала сравнивали со значениями релаксации материала, рассчитанными с использованием уравнения наследственной вязкоупругости с ядром релаксации А. М. Колтунова с принятыми параметрами функции влияния. Для этого по полученным средним значениям строили среднюю кривую в логарифмических координатах и сравнивали совмещением с теоретическими кривыми релаксации в соответствии с [2] с определёнными параметрами ядра релаксации.

Описанным методом совмещения [2] для осреднённой кривой релаксации были определены следующие параметры ядра релаксации теоретической кривой $\alpha_T = 0,075$, $A_T = 0,0156$, $\beta_T = 0,05$ при приведённом времени $tr = t_3/10$, сут, где tr – время отсчёта для теоретической кривой релаксации; t_3 – время отсчёта для экспериментальной кривой.

Уравнение ползучести стеклопластика получили, «обращая» уравнение релаксации. При этом уравнение ползучести стеклопластика принимает вид

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Резольвента ядра релаксации в форме А. М. Колтунова – ядро ползучести – имеет вид

$$K(t) = \frac{e^{-\beta t}}{t} \sum_1^{\infty} \frac{A\Gamma(\alpha)^n t^{\alpha n}}{\Gamma(\alpha n)}. \quad (4)$$

С учётом найденных параметров на ЭВМ можно рассчитать любой процесс напряженно-деформированного состояния конструкций из композитного материала с учётом ползучести и релаксации материала.

Учитывая разброс экспериментальных данных, сравнение экспериментальных данных по релаксации образцов композитного материала, приведёнными в табл. 1, с проверяемыми значениями релаксации – результатами расчётов релаксации материала по уравнению наследственной теории вязкоупругости с ядром М. А. Колтунова – проводили на основании одновыборочного t-критерия сравнения средних. Результа-

ты сравнения теоретических значений релаксации с экспериментальными средними значениями приведены в табл. 3.

Таблица 3

Теоретические и экспериментальные значения релаксации материала

Показатели	Время экспонирования					
	9 мин	5 ч	4 сут	7 сут	30 сут	60 сут
Проверяемое значение	0,8763	0,8452	0, 8065	0, 7984	0, 7768	0,7672
Значимость двухсторонняя	0,371	0,622	0, 942	0, 939	0, 774	0, 995
Разность значений	-0,0303	-0,0169	-0, 0025	0, 0026	0, 0097	0, 0002
Нижняя граница 95% доверительного интервала для разности значений	-0,1031	-0,0918	-0, 0775	-0,0724	-0, 0643	-0, 0752
Верхняя граница 95% доверительного интервала для разности значений	0,0425	0,0580	0, 0725	0,0776	0,0837	0, 0756

Анализируя полученные таблицы 2 и 3, можно сделать вывод, что релаксация образцов композитного материала для всех времён наблюдения с достаточной достоверностью описывается на основании уравнения наследственной теории вязкоупругости с ядром А. М. Колтунова. Уровень значимости при обработке результатов экспериментов и сравнении экспериментальных и теоретических значений релаксации для всех времён наблюдения составляет более 0,370.

С помощью найденных параметров функции влияния по уравнению наследственной упругости с ядром ползучести в форме А. М. Колтунова рассчитывали величины ползучести – увеличение деформации образцов при постоянных напряжениях в композитном материале, которые приведены в табл. 4.

Таблица 4

Деформация образцов при постоянных напряжениях в материале

Время наблюдения	0 мин	9 мин	5 ч	4 сут	7 сут	30 сут	60 сут	4 г
Относительное увеличение деформаций (средние значения)	1,0000	1,1409	1,1828	1,2394	1,2519	1,2865	1,3028	1,3333

Имея найденные параметры функции влияния, можно вычислить релаксацию и ползучесть композитного материала за длительные периоды времени. Так, за 4 года эксплуатации при постоянной деформации падение напряжения в материале составит 25 %. Увеличение деформации материала при постоянном напряжении за 4 года составит 33 %.

Таким образом, установлено, что вязкоупругие процессы в композитном материале оказывают существенное влияние на его ползучесть и релаксацию, что обуславли-

вадет необходимость учёта их влияния на изменение напряжённо-деформированного состояния конструкций из композитных материалов.

Заключение

1. Проведены кратковременные испытания, а также испытания на релаксацию напряжений при растяжении образцов конструкционного стеклопластика.

2. По полученной серии кривых релаксации найдены параметры функции влияния на основании уравнения наследственной теории вязкоупругости с ядром А. М. Колтунова.

3. Установлено, что вязкоупругие процессы в композитном материале оказывают существенное влияние на его ползучесть и релаксацию, что обуславливает необходимость учёта их влияния на изменение напряжённо-деформированного состояния конструкций из композитных материалов.

Библиографический список

1. *Батрак В. Е., Кондакова Т. В., Оснач Р. Г., Чернов Е. Н.* Применение стеклоэпоксидных труб для несущих конструкций генераторов импульсных напряжений и токов. // *Электротехника*. 1989. № 9. С. 65 – 68.

2. *Колтунов М. А.* Ползучесть и релаксация. М.: Высшая школа, 1976.

Авторы:

Владимир Евгеньевич БАТРАК, канд. техн. наук, заведующий лабораторией легких конструкций и теплоизоляционных материалов ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Vladimir BATRAK, Ph.D. in Engineering, Head of the Laboratory of Lightweight Constructions and Heat Insulation TSNIISK named after V. A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: batrakve@yandex.ru

тел.: +7 (499) 174-73-42

Виктор Викторович БОБРЯШОВ, ведущий научный сотрудник лаборатории легких конструкций и теплоизоляционных материалов ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Victor BOBRYASHOV, Leading researcher of the Laboratory of Lightweight Constructions and Heat Insulation Materials TSNIISK named after V. A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: bobryashoff@yandex.ru

тел.: +7 (499) 174-73-42