

УДК 678.067.5-033.37

ББК 35.719

Я-41

Языева Светлана Борисовна, кандидат технических наук, докторант кафедры «Проектирование зданий», ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет», e-mail: iskra1917@bk.ru;

Андреев Владимир Игоревич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, заведующий кафедрой «Сопротивление материалов», ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», т.: (499)4835557, e-mail: asv@mgsu.ru;

Блягоз Алик Моссович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет».

ЭФФЕКТ «ЯМЫ» КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

(рецензирована)

В статье проведены исследования, направленные на изучение поведения коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) полимерных композитов при различных температурных режимах и показано, что вблизи температуры стеклования T_g наблюдается эффект «ямы». Для объяснения данного явления в настоящей работе предпринята попытка учета остаточных напряжений, возникающих в композитах в процессе их создания. Эти напряжения возникают за счет предварительного натяжения волокон и их последующей разгрузки после полимеризации.

Ключевые слова: коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР), модуль упругости, температура, деформация, эффект «ямы», напряжение, композит, полимер.

Yazyeva Svetlana Borisovna, Candidate of Technical Sciences, doctoral student of the Department Building Design, FSBEI HPE "Rostov State University of Civil Engineering", e-mail: iskra1917@bk.ru;

Andreev Vladimir Igorevich, Doctor of Technical Sciences, professor, corresponding member of RAASN, head of the Department of Strength of Materials", FSBEI HPE "Moscow State Construction University", tel.: (499) 4835557, e-mail: asv@mgsu.ru;

Blyagoz Alec Mossovich, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Construction and General Professional Disciplines, FSBEI HPE "Maikop State Technological University".

EFFECT OF "PIT" OF LINEAR TEMPERATURE EXPANSION OF ARMED GLASS PLASTICS COEFFICIENT

(reviewed)

The article presents research aimed at studying the behavior of the coefficient of linear thermal expansion (CTE) of polymer composites at different temperatures and it has been shown that the effect of "pit" is observed near the glass transition temperature T_g . To explain this phenomenon an attempt has been made to account for the residual stresses in composites during their creation. These stresses arise from the pre-tension fibers and their subsequent unloading after polymerization.

Keywords: coefficient of linear thermal expansion (CTE), modulus of elasticity, temperature, strain, the effect of "pit", voltage, composite, polymer.

Как показывают экспериментальные исследования [1-6], зависимость коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) полимерных композитов от температуры не является монотонной, а вблизи температуры стеклования T_g наблюдается эффект "ямы" (рис. 1).

При этом данный эффект проявляется как при нагревании, так и при охлаждении композита. Следует отметить, что подобный эффект был обнаружен при исследовании различных сочетаний армирующих волокон и материала матрицы.

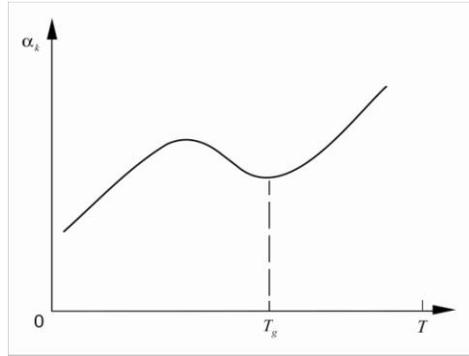


Рис 1 – Кривая зависимости коэффициента линейного температурного расширения композита от температуры

При использовании простейшей модели однонаправленного композита для его КЛТР (a_k) получается формула смеси:

$$a_k = \frac{a_1 E_1 F_1 + a_2 E_2 F_2}{E_1 F_1 + E_2 F_2} \quad (1)$$

Здесь: индекс «1» относится к полимеру, индекс «2» – к волокну; a_i – КЛТР; E_i – модуль Юнга; F_i – объемное содержание.

При этом

$$F_1 + F_2 = 1$$

С учетом того, что $a_1 > a_2$ из (1) следует, что a_k всегда больше a_2 .

Известные зависимости $a_1(T)$ и $a_2(T)$ являются монотонно возрастающими, откуда следует, что зависимость $a_k(T)$, даваемая формулой (1), также должна быть монотонно возрастающей. Таким образом, эффект «ямы» на кривой $a_k(T)$ следует признать аномальным.

Для объяснения данного эффекта в настоящей работе предпринята попытка учета остаточных напряжений, возникающих в композитах в процессе их создания. Эти напряжения возникают за счет предварительного натяжения волокон и их последующей разгрузки после полимеризации. В результате волокна не разгружаются полностью, а остаются частично растянутыми. В то же время полимерное связующее оказывается сжатым. При этом из условия равновесия следует:

$$\sigma_{o1} F_1 + \sigma_{o2} F_2 = 0 \quad (2)$$

где σ_{oi} – остаточные напряжения в полимере ($i = 1$) и волокнах ($i = 2$).

Особенностью приводимого ниже расчета $a_k(T)$ является учет зависимости $E_1(T)$, схематически показанной на рисунке 2. При этом модуль упругости волокон в исследуемом интервале температур практически не меняется.

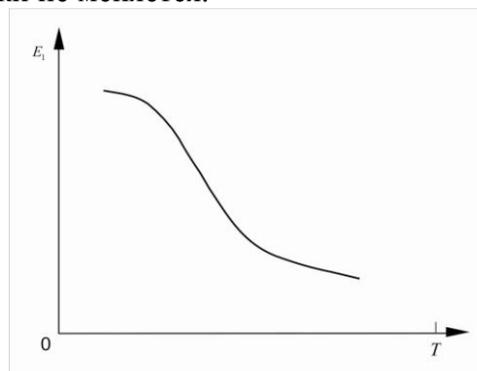


Рис 2 – Кривая зависимости модуля Юнга полимерной матрицы от температуры

Чтобы учесть зависимость $E_1(T)$ воспользуемся физическими зависимостями в приращениях. Приращения полных осевых деформаций будут равны:

$$d\varepsilon_i = de_i + d\varepsilon_{Ti} + d\varepsilon_{oi} \quad (3)$$

где e_i , ε_{Ti} и ε_{oi} – соответственно упругие, температурные и остаточные деформации.

При этом

$$de_i = \frac{d\sigma_i}{E_i}$$

Пусть волокна при некоторой постоянной температуре растянуты силой P . При этом в них

возникнут напряжения

$$\sigma_2^{(0)} = \frac{P}{E_2}$$

Соответствующие деформации будут равны:

$$e_2^{(0)} = \frac{\sigma_2^{(0)}}{E_2} = \frac{P}{E_2 F_2} > 0 \quad (4)$$

При этой температуре жидкая матрица твердеет, после чего растягивающая нагрузка снимается, т.е. прикладывается сила равная $(-P)$. На это действие реагирует весь композит. В полимере и волокнах возникнут деформации:

$$e_1^{(1)} = \frac{\sigma_1^{(1)}}{E_1}; \quad e_2^{(1)} = \frac{\sigma_2^{(1)}}{E_2} \quad (5)$$

При этом справедливы условие равновесия

$$\sigma_1^{(1)} F_1 + \sigma_2^{(1)} F_2 = -P \quad (6)$$

и условие совместности деформаций

$$e_1^{(1)} = e_2^{(1)} \quad (7)$$

Из (5) – (7) получается

$$\sigma_1^{(1)} = -\frac{P E_1}{E_1 F_1 + E_2 F_2}; \quad \sigma_2^{(1)} = -\frac{P E_2}{E_1 F_1 + E_2 F_2} \quad (8)$$

Учитывая (4) и (7), получим

$$e_1^{(1)} = e_2^{(1)} = \frac{\sigma_i^{(1)}}{E_i} - \frac{E_2 F_2 e_2^{(0)}}{E_1 F_1 + E_2 F_2} \quad (9)$$

Окончательно после разгрузки остаточные деформации в полимере и волокнах будут равны:

$$\varepsilon_{o1} = e_1^{(1)} = -\frac{E_2 F_2 e_2^{(0)}}{E_1 F_1 + E_2 F_2}; \quad \varepsilon_{o2} = e_2^{(0)} = e_2^{(1)} = \frac{E_1 F_1 e_2^{(0)}}{E_1 F_1 + E_2 F_2} \quad (10)$$

Здесь $e_2^{(0)}$ определяется формулой (4).

Остаточные напряжения будут равны:

$$\sigma_{o1} = E_1 \varepsilon_{o1}; \quad \sigma_{o2} = E_2 \varepsilon_{o2} \quad (11)$$

Нетрудно проверить, что система внутренне уравновешена, т.е. выполняется равенство

$$\sigma_{o1} F_1 + \sigma_{o2} F_2 = 0 \quad (12)$$

Таким образом, в сформированном при некоторой температуре композите волокна оказываются – растянутыми, а полимерная матрица – сжатой.

Теперь рассмотрим процесс температурного деформирования материала. При этом напряженно-деформированное состояние, описываемое равенствами (10), (11) для данного процесса будем считать начальным. При изменении температуры на малую величину dT начальная деформация в полимере изменится на величину

$$d\varepsilon_{o1} = -\frac{d}{dT} \left(\frac{e_2^{(0)} E_2 F_2}{E_1 F_1 + E_2 F_2} \right) dT \quad (13)$$

Для вычисления полного приращения деформации к выражению (13) следует добавить приращения температурных и упругих деформаций:

$$d\varepsilon_{T1} = a_1(T) dT; \quad de_1 = \frac{d\sigma_1}{E_1(T)}$$

Аналогично для волокон получается равенство

$$d\varepsilon_2 = \frac{d}{dT} \left(\frac{e_2^{(0)} E_1 F_1}{E_1 F_1 + E_2 F_2} \right) dT + a_2(T) + \frac{d\sigma_2}{E_2(T)} \quad (14)$$

Полное приращение температурной деформации композита

$$d\varepsilon_{kT} = a_k(T) dT$$

определяется совместным деформированием полимера и волокон. Таким образом, имеем:

$$a_k(T)dT = \frac{d\sigma_1}{E_1(T)} + a_1(T)dT - \frac{d}{dT} \left(\frac{e_2^{(0)} E_1 F_1}{E_1 F_1 + E_2 F_2} \right) dT = =$$

$$\frac{d\sigma_2}{E_2(T)} + a_2(T)dT - \frac{d}{dT} \left(\frac{e_2^{(0)} E_1 F_1}{E_1 F_1 + E_2 F_2} \right) dT \quad (15)$$

Следует отметить, что последнее слагаемое в (15) определяет только ту часть приращения начальных деформаций dE_2 , которая совместна с приращением начальной деформации полимера, что следует из формулы (9).

Решая совместно (15) и уравнение равновесия

$$d\sigma_1 E_1 + d\sigma_2 E_2 = 0$$

находим выражение для КЛТР армированного полимера:

$$a_k(T) = \frac{a_1 E_1 F_1 + a_2 E_2 F_2}{E_1 F_1 + E_2 F_2} + e_2^{(0)} F_1 F_2 \frac{E_1' E_2 - E_2' E_1}{(E_1 F_1 + E_2 F_2)^2} \quad (16)$$

Здесь штрих означает дифференцирование по температуре. Для общности в (16) учтена зависимость $E_2(T)$. Однако, как было отмечено выше, можно положить $E_2(T) \cong const$. Дальнейший анализ зависимости (16) проведем в этом предположении.

Очевидно, что в предельных случаях, когда $F_1 = 1$ ($F_2 = 0$) или $F_2 = 1$ ($F_1 = 0$) a_k равно соответственно a_1 или a_2 . Поскольку $e_2^{(0)} > 0$, а $E_1' < 0$ (см. рис. 2), то второе слагаемое в (16) является отрицательным, что и приводит к эффекту «ямы» на кривой $a_k(T)$. С увеличением содержания полимера F_1 от 0 до 1 глубина «ямы» сначала растет, а затем падает. При этом следует отметить, что решение обратимо (нагрев-охлаждение) и не зависит от начальной температуры. Все это качественно совпадает с экспериментальными результатами.

ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты исследований показывают, что с увеличением содержания полимера F_1 от 0 до 1 глубина «ямы» сначала растет, а затем падает. При этом следует отметить, что решение обратимо (нагрев – охлаждение) и не зависит от начальной температуры. Установлено, что все это качественно совпадает с экспериментальными результатами.

Литература:

1. Tourousov R., Freidine A. Anomalous behavior of the coefficient of linear expansion of reinforced plastics on increased temperature. Abst. Proc. Third Intern. Space Conf. Toronto. Canada: April, 1996. P. 17.
2. Tourousov R., Jasyev B., Andreev V. Reasons of anomalous behaviour of the coefficient of linear expansion of reinforced plastics along fibres // 8-th Int. Conf. on Mechanics and technology of composite materials. Sofia, 1997. P. 68-69.
3. Языев Б.М., Андреев В.И., Турусов Р.А. Изотермическая релаксация температурных напряжений в жестких сетчатых полимерах // VI Международная конференция по химии и физике олигомеров: тезисы докладов. Казань, 1997. С. 137.
4. Языев Б.М. Экспериментальные и теоретические исследования температурных напряжений в полимерных стержнях // Строительство и образование: сб. научных трудов Уральского ГТУ. Екатеринбург, 1998. С. 48-50.
5. Турусов Р.А. Механические явления в полимерах и композитах (в процессах формирования): дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: Изд-во Ин-та хим. физики АН СССР, 1983. 362 с.
6. Гуревич Г.И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М.: Наука, 1974. 482 с.
7. Бабич В.Ф. Исследование влияния температуры на механические характеристики жестких сетчатых полимеров: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1966. 125 с.

References:

1. Tourousov R., Freidine A. Anomalous behavior of the coefficient of linear expansion of reinforced plastics on increased temperature. Abst. Proc. Third Intern. Space Conf. Toronto. Canada: April, 1996. P. 17.
2. Tourousov R., Jasyev B., Andreev V. Reasons of anomalous behaviour of the coefficient of linear expansion of reinforced plastics along fibres // 8-th Int. Conf. on Mechanics and technology of composite materials. Sofia, 1997. P. 68-69.

3. Yazyev B.M., Andreev V.I., Turusov R.A. *Isothermal relaxation of thermal stresses in hard cross-linked polymers // VI International Conference on Chemistry and Physics of oligomers: abstracts. Kazan, 1997. P. 137.*

4. Yazyev B.M. *Experimental and theoretical studies of thermal stresses in polymer rods // Construction and Education: coll. of scientific works of the Ural State Technical University. Ekaterinburg, 1998. P. 48-50.*

5. Turusov R.A. *Mechanical phenomena in polymers and composites(in the formation processes): diss. ... Doc. of Physics and Maths. M.:Institute of chemical physics pub. AS USSR, 1983. 362 p.*

6. Gurevich G.I. *Deformable media and propagation of seismic waves. M.: Nauka, 1974. 482 p.*

7. Babich V.F. *Study the effect of temperature on the mechanical properties of hard-linked polymers: diss. ... Cand. of Physics and Maths. M., 1966. 125 p.*