

Прогнозирование физических свойств многокомпонентных композитных материалов с полимерной матрицей

Г.Б. Вержбовский

Донской государственный технический университет

Аннотация: Описана инженерная методика прогнозирования основных физических характеристик многокомпонентных композитных материалов с полипропиленовой матрицей. Приведены расчетные формулы для определения модуля упругости и коэффициента Пуассона композита. Описан алгоритм применения предложенных формул. Доказано, что порядок учета наполнителей не влияет на конечный результат.

Ключевые слова: композиты, матрица, наполнитель, полипропилен, древесная мука, мел, модуль упругости, коэффициент Пуассона.

Постоянное развитие строительной науки приводит к появлению инновационных композитных материалов со сложным составом. Очевидно, что внедрению новой продукции предшествует порой достаточно долгий этап экспериментальных исследований, подбора оптимального сочетания отдельных составляющих материала и натуральных испытаний опытных образцов. Сокращение сроков указанного этапа возможно, в частности, за счет проведения предварительного аналитического прогнозирования свойств композитов.

Достаточно широкое распространение получили композиты с полимерной матрицей – полимерные композитные материалы (ПКМ). Из них изготавливают террасную доску – декинг, они применяются при производстве различной фурнитуры и элементов инженерных коммуникаций, их область применения не ограничивается только строительством. ПКМ хорошо зарекомендовали себя в авиационной и космической отраслях, автомобилестроении, легкой промышленности и т.п. В связи с этим аналитическое прогнозирование свойств подобных материалов на этапе их создания является актуальной задачей.

ПКМ имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при разработке методик определения их характеристик. Условимся рассматривать далее композит с полимерной матрицей и одним или

несколькими порошковыми наполнителями, при изготовлении которого не происходят химические реакции между его составляющими. В таком случае к ПКМ применимо правило смеси [1]. Следующим допущением является подчинение композита и его составляющих закону Гука вплоть до разрушения. Также будем считать, что и наполнители, и матрица являются изотропными.

Стандартными связующими в ПКМ выступают полиэтилен и полипропилен, изотропия которых очевидна. Что касается наполнителей, то, строго говоря, они могут быть и анизотропными, однако в силу того, что при изготовлении композита они измельчаются в порошок, можно считать подобные столь мелкие частицы также изотропными.

В литературе описаны различные методики определения характеристик полимерных композитов. Большинство из них предполагает, что все части материала испытывают либо одинаковые деформации (например, Фойхт, [2]), либо равные напряжения (Рейсс, [3]), поэтому исследователи, прогнозируя свойства создаваемого материала, зачастую пользуются обоими подходами, а затем сужают полученную интервальную оценку, например, по методикам Хашина-Штрикмана [4] или Мори-Танака [5]. Среди работ отечественных исследователей определенный интерес представляют источники [6, 7].

В работе [8] подробно рассмотрена интегральная методика определения модуля упругости и коэффициента Пуассона двухкомпонентного (бинарного) композиционного материала с полимерной матрицей и порошковым наполнителем. Приведем здесь ее основные положения.

Энергия деформации тела является суммой энергий деформаций его отдельных частей. Предположим, что между упругими потенциалами составных частей бинарного композита существует связь, определяемая выражением:

$$s\sigma_1\varepsilon_1 = \sigma_2\varepsilon_2, \quad (1)$$

Где индексы «1» и «2» относятся к матрице и наполнителю соответственно, $s = \frac{E_1}{E_2}$, а остальные обозначения общеприняты.

В случае всестороннего сжатия связь между напряжениями и относительными деформациями может быть записана через модуль объемной упругости (2):

$$K = \sigma / \varepsilon = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad (2)$$

где ν – это коэффициент Пуассона.

На основании принятого допущения о подчинении закону Гука каждой из составляющих ПКМ можно записать равенства (3):

$$\sigma_1 = \left(\frac{K_1}{sK_2} \right)^{1/2} \cdot \sigma_2, \quad \varepsilon_1 = \left(\frac{K_1}{sK_2} \right)^{1/2} \cdot \varepsilon_2. \quad (3)$$

Вслед за [6] деформации и напряжения в композите могут быть представлены через усредненные по объему соответствующие характеристики матрицы и наполнителя (4):

$$\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_1 \cdot m_1 + \varepsilon_2 \cdot m_2, \quad \sigma_\Sigma = \sigma_1 \cdot m_1 + \sigma_2 \cdot m_2. \quad (4)$$

В последних выражениях m_1 и m_2 – объемные доли матрицы и наполнителя, а индекс « Σ » относится к ПКМ в целом. Следует отметить, что $m_1 + m_2 = 1$.

После ряда преобразований в [8] получены формулы для определения модулей упругости и коэффициента Пуассона бинарного композита (5), выражаемые через объемные модули деформации и модули сдвига:

$$E_\Sigma = \frac{9K_\Sigma G_\Sigma}{3K_\Sigma + G_\Sigma}, \quad \nu_\Sigma = \frac{3K_\Sigma - 2G_\Sigma}{2(3K_\Sigma + G_\Sigma)}, \quad (5)$$

Причем:

$$K_\Sigma = (K_1 K_2)^{1/2} \cdot \frac{m_1 K_1^{1/2} + m_2 K_2^{1/2} s^{1/2}}{m_1 K_2^{1/2} + m_2 K_1^{1/2} s^{1/2}}, \quad (6)$$

$$G_{\Sigma} = (G_1 G_2)^{1/2} \cdot \frac{m_1 G_1^{1/2} + m_2 G_2^{1/2} s^{1/2}}{m_1 G_2^{1/2} + m_2 G_1^{1/2} s^{1/2}}. \quad (7)$$

Приведенные в [8] многочисленные примеры составов бинарных композитов с полипропиленовой матрицей и наполнителями из древесной муки, мела или талька показывают хорошее совпадение теоретических результатов с указанными в [9] экспериментальными величинами. Расхождение не превышает 10% и только при очень малом содержании мела в ПКМ оказывается равным 15,6%. Указанный факт дает возможность рекомендовать выражения (5) для прогнозирования свойств бинарных композитных материалов.

В последнее время состав ПКМ усложняется. Появились материалы с двумя и более наполнителями [10], для которых также желательно иметь аналогичные методики прогнозирования их физических характеристик. Зависимости (5) могут быть распространены и на композиты более сложного состава. Для ПКМ, состоящего из n компонентов, выражениями (5) придется воспользоваться $n - 1$ раз, последовательно добавляя к бинарному композиту новые составляющие. Первый шаг – рассмотрение двухкомпонентного материала с полимерной матрицей и одним из наполнителей. В таком «начальном» материале сумма объемных долей компонентов принимается за единицу. После определения его физических характеристик в материал всякий раз добавляется еще один наполнитель, причем сумма объемных долей в новой смеси на каждом шаге снова равна единице. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут учтены все компоненты, составляющие композит.

В качестве примера в таблице 1 определены модуль упругости и коэффициент Пуассона для трехкомпонентного ПКМ с полипропиленовой матрицей (40%) и наполнителями из древесной муки (50%) и мела (10%). Значения объемных модулей деформации, модулей сдвига и упругости в ней приведены в МПа. При этом рассмотрены два варианта «начального»

бинарного композита для оценки зависимости итоговых результатов от порядка учета наполнителей.

Таблица 1

Значения модулей объемной деформации (МПа)
композиционных материалов с полипропиленовой матрицей

Компо- зит	Матрица			Наполнитель			K_{Σ}	G_{Σ}	s	E_{Σ}	ν_{Σ}
	m_1	K_1	G_1	m_2	K_2	G_2					
«Начальный материал» - полипропилен (ПП) и древесная мука (Д)											
ПП+Д	0,44	2917	493	0,56	8333	3846	4107	981	0,14	2727	0,39
Итог	0,9	4107	981	0,1	7500	3462	4254	1060	0,3	2935	0,385
«Начальный материал» - полипропилен (ПП) и мел (М)											
ПП+М	0,8	2917	493	0,2	7500	3462	3182	600	0,16	1692	0,41
Итог	0,5	3182	600	0,5	8333	3846	4226	1053	0,17	2917	0,385

Из таблицы видно, что выделенный жирным шрифтом итоговый результат практически не зависит от порядка учета наполнителей. Разница между полученными значениями модулей упругости составляет всего 0,6%.

Описанную в настоящей статье аналитическую методику прогнозирования физических характеристик ПКМ можно распространить на композитные материалы с любым количеством наполнителей, для которых выполняется правило смеси. Ее использование позволит существенно сократить сроки проектирования новых материалов и даст возможность уменьшить количество реальных экспериментов.

Литература

1. Бартенев Г.В., Зеленов Ю.В. Физика полимеров. М.: Высшая школа, 1982, 280с.
2. Voigt V. Lehrbuch der Kristallphysik. Berlin: Teubner, 1928. – 962 s.

3. Reuss A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung. // Z. Angew. Math. Und Mech. - 1929. V. 9, - № 1. - pp. 49-58.
4. Hashin, Z., Shtrikman, S. A variational approach to the elastic behavior of multiphase materials. // J. Mech. Phys. Solids. – 1963. - № 11. – pp. 127–140.
5. Klusemann, B. Homogenization methods for multi-phase elastic composites: Comparisons and benchmarks // Technische Mechanik. - 2010. - Vol.30(4) - pp. 374-386.
6. Петроченков Р.Г. Композиты на минеральных заполнителях. т. 2 - М.: Изд-во московского государственного горного университета, 2005. - 351 с.
7. Яковлев М.Я., Янгирова А.В. Метод и результаты численной оценки эффективных механических свойств резинокордных композитов для случая двухслойного материала // Инженерный вестник Дона, 2013, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1639.
8. Вержбовский Г.Б. Малоэтажные быстровозводимые здания и сооружения из композитных материалов. Ростов-на-Дону: П-Пресс, 2015. - 280 с.
9. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты. СПб.: Изд-во НОТ, 2010. – 735 с.
10. Саввинова М.Е., Петухова Е.С. Выбор перспективных наполнителей для полиэтиленов ПЭ80Б и ПЭ2НТ11 // Инженерный вестник Дона, 2013, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1518.

References

1. Bartenev G.V., Zelenev Ju.V. Fizika polimerov [Polymer physics]. M.: Vysshaja shkola, 1982, 280p.
2. Voigt V. Lehrbuch der Kristallphysik. Berlin: Teubner, 1928. 962 p.
3. Reuss A. Z. Agnew. Math. Und Mech. 1929. V. 9. № 1. pp. 49-58.
4. Hashin, Z., Shtrikman, S. J. Mech. Phys. Solids. 1963. № 11. pp. 127–140.
5. Klusemann, B. Technische Mechanik. 2010. Vol.30 (4). pp. 374-386.
6. Petrochenkov R.G. Kompozity na mineral'nyh zapolniteljah [Composites on mineral aggregates]. V. 2. M.: Izd-vo moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2005. 351 p.
7. Jakovlev M.Ja., Jangirova A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1639.
8. Verzhbovskiy G.B. Malojetazhnye bystrovozvodimye zdaniya i sooruzhenija iz kompozitnyh materialov [Low-rise prefabricated buildings and structures made of composite materials]. Rostov-na-Donu: P-Press, 2015. 280 p.
9. Klesov A.A. Drevesno-polimernye kompozity [Wood-polymer composites]. SPb.: Izd-vo NOT, 2010. 735 p.
10. Savvinova M.E., Petuhova E.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1518.