

УДК 539.3+534.13+629.783

Об определении модулей упругости слоя композиционного материала**Маслей В.Н.¹, Бобыр Н.И.², Рудаков К.Н.², Попель В.М.¹, Кулик А.С.¹**¹ – Государственное предприятие "КБ "Южное" имени М.К. Янгеля", г. Днепр, Украина² – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", г. Киев, Украина

Аннотация: Для проведения расчетов на выявление характеристик напряженно-деформированного состояния любых изделий необходимо иметь, среди прочих, такие характеристики материалов, как модули упругости. В силовых конструкциях космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли в "КБ "Южное" применяют, в частности, слоистый полимерный композиционный материал с наполнителем ЭДТ-10 ОСТ 92-0957, армированным высокомодульным углеродным волокном ТС 36S-12К фирмы TAIRYFIL (Англия). В спецификации на материал указывают лишь модуль Юнга при растяжении и коэффициент Пуассона. Остальные модули упругости обычно определяют по известным формулам, в лучшем случае – в численном или натурном эксперименте. Полученные значения имеют значительный разброс.

В результате проведенного исследования были подобраны формулы, наиболее соответствующие композиции ЭДТ-10 / ТС 36S-12К. Для валидации применяли численный (метод конечных элементов) и натурный эксперименты

Ключевые слова: полимерный композиционный материал; модули упругости

Введение

В практике конструирования изделий из слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) широко применяют расчетные методы, которые требуют, в частности, значений модулей упругости композита. Если модули известны для одного слоя, то на их основе часто подсчитывают "эквивалентные" модули многослойного ПКМ [1–3]. Обычно считается, что и отдельные слои, и совокупность слоев ПКМ обладают 3D-ортотропией, иногда – трансверсальной изотропией.

Считается, что монослой с однонаправленным (вдоль оси 1) волокном обладает трансверсальной изотропией [1], поэтому его модули $E_{22} = E_{33}$ и $\mu_{12} = \mu_{13}$. Волокно и связующее считаются изотропными: $(E_{11})_B = (E_{22})_B = (E_{33})_B = E_B$, $(\mu_{12})_B = (\mu_{13})_B = (\mu_{23})_B = \mu_B$, $(E_{11})_C = (E_{22})_C = (E_{33})_C = E_C$ и $(\mu_{12})_C = (\mu_{13})_C = (\mu_{23})_C = \mu_C$.

Индексы 1, 2, 3 указывают направления главных осей анизотропии.

Целью работы являлся подбор формул для определения модулей Юнга E_{11} , $E_{22} = E_{33}$ монослоя, наиболее соответствующей композиции ЭДТ-10 / ТС 36S-12К.

Правило смеси

Для определения E_{11} , $E_{22} = E_{33}$ монослоя обычно используют одну из известных формул "правила смеси" таких авторов, как Fought, Rays/Jones, Puck, Förster/Knappe, Schneider, Tsai и др., в лучшем случае проводят натурный или численный эксперимент [4, 5]. Численный эксперимент должен повторять условия натурального.

В соответствии с "правилом смеси" в поперечном сечении монослоя подсчитывают относительные части ("весовые" коэффициенты V_i), которые занимает каждая из компонент. Формула Fought (Фойхта) дает верхнюю оценку [2, 3]:

$$\chi = V_1\chi_1 + V_2\chi_2 + \dots + V_n\chi_n = \sum_{i=1}^n V_i\chi_i, \quad (1)$$

где χ – характеристика материала. Формула Rays/Jones (Рейса) дает нижнюю оценку [2, 3]:

$$1/\chi = V_1/\chi_1 + V_2/\chi_2 + \dots + V_n/\chi_n = \sum_{i=1}^n (V_i/\chi_i). \quad (2)$$

Есть и другие формулы, дающие промежуточные значения [2, 3, 6].

Расчетные характеристики композиции ЭДТ-10 / ТС 36S-12К

Рассмотрели слоистый ПКМ с наполнителем ЭДТ-10 ОСТ 92-0957, армированным высокомодульным углеродным волокном ТС 36S-12К фирмы TAIRYFIL (Англия), коэффициент армирования $V_B=0.7$, применяемый в космических аппаратах "КБ "Южное". Из спецификации на материалы имели лишь модуль Юнга при растяжении $(E_{11})_B \approx 2.5 \cdot 10^5$ МПа и коэффициент Пуассона $(\mu_{12} = \mu_{13})_B \approx 0.25$ (ТС 36S-12К); $(E_{11})_C \approx 0.025 \cdot 10^5$ МПа и $(\mu_{12} = \mu_{13})_C \approx 0.32$ (ЭДТ-10). Толщина монослоя 0.24 мм при его укладке в направлениях 0 и 90 градусов. Весовые части $V_B=0.7$ и $V_C=1-V_B=0.3$.

Модуль Юнга E_{11} монослоя принято подсчитывать по формуле (1) [2]: $E_{11} = V_B E_B + V_C E_C \approx 1.758 \cdot 10^5$ МПа. Модули упругости $E_{22} = E_{33}$ вначале подсчитали по формуле (2) [2]: $E_{22} = E_{33} = E_B E_C / (E_B V_C + E_C V_B) \approx 0.0814 \cdot 10^5$ МПа.

В книге [6] в разделе 10.7 приведено несколько формул (методов) для вычисления $E_{22} = E_{33}$. Некоторые из них, дающие максимальный диапазон результатов, привели в таблице (в наших обозначениях).

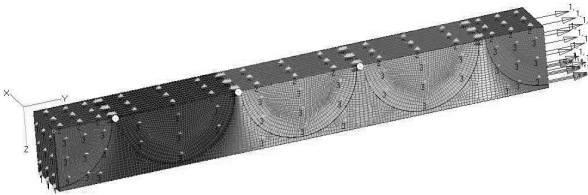
Формулы для вычисления модуля Юнга E_{22} и результаты вычислений

Авторы формулы	Формула	$E_{11}, E_{22} \cdot 10^{-5}$, МПа
Schneider	$E_{22} = \frac{E_C^*(1-V_B^3)}{(1-V_B)^{0.75} + 6E_C^*V_B/E_B} = \frac{E_B E_C^*(1-V_B^3)}{E_B V_C^{0.75} + 6E_C^*V_B}$	0.0405
Rays / Jones	$E_{22} = \frac{E_B E_C}{E_B V_C + E_C V_B} = \frac{E_C}{(1-V_B) + E_C V_B / E_B}$	0.0814
Förster / Knappe	$E_{22} = \frac{E_C^*}{(1-V_B)^{1.45} + E_C^*V_B/E_B} = \frac{E_B E_C^*}{E_B (V_C)^{1.45} + E_C^*V_B}$	0.1654
Puck	$E_{22} = \frac{E_C^*(1+0.85V_B^2)}{(1-V_B)^{1.25} + E_C^*V_B/E_B} = \frac{E_B E_C^*(1+0.85V_B^2)}{E_B V_C^{1.25} + E_C^*V_B}$	0.1717
МКЭ	$E_{11} = p / \varepsilon_x$	1.827
	$E_{22} = p / \varepsilon_y$	0.1975
Эксперимент (диапазон)	E_{11}	1.50 ÷ 1.75
	$E_{22} = E_{33}$	0.16 ÷ 0.20

Приведенный модуль $E_C^* = E_C / (1 - \mu_C^2) = 0.025 \cdot 10^5 (1 - 0.32^2) \approx 2785$ МПа.

Из рисунков книги [6] можем сделать вывод, что для высокопрочного волокна (Carbon HT) расчетные значение модуля $E_{22} = E_{33}$ при $V_f=0.7$ могут отличаться приблизительно в два раза, а для высокомодульного волокна (Carbon HM) – приблизительно в пять раз. Из данных таблицы для рассматриваемой композиции следует четырехкратное отличие. Кстати, все эти формулы весьма чувствительны к изменению величин V_B и V_C .

Валидацию формул при определении $E_{22} = E_{33}$ актуальной композиции провели в численном эксперименте. На рисунке показана расчетная схема модели сечения элемента монослоя с наложенными результатами расчета – продольным перемещением U_Y .



Расчетная схема модели монослоя с цветовым изображением продольного перемещения U_Y

Выписали перемещения $(U_Y)_n$ в трех помеченных (белых) точках с координатами Y_n , Определили в них величины продольной деформации $(\varepsilon_Y)_n = (U_Y)_n / Y_n$, усреднили (отличия были незначительны), подсчитали модуль $E_{22} = p / \varepsilon_Y$, результат поместили в таблицу в строку "МКЭ". Отличие от рассчитанного по формуле (2) значения – примерно в 2.4 раза.

Аналогичный численный эксперимент провели для определения модуля E_{11} монослоя. Значения E_{11} поместили в таблицу. В ту же таблицу поместили диапазон значений модулей, полученных в натурном эксперименте на плоских образцах. Погрешности не определяли ввиду незначительности базы данных.

Вывод: для рассматриваемой композиции ЭДТ-10 / ТС 36S-12K для определения значений соответствующих модулей упругости формулой Фойгта (1) пользоваться можно, а Райсса (2) – не желательно; для нее хороший результат дали формулы Puck и Förster / Knappe.

About defening of moduli of elasticity of composite material layer

Masleye V., Bobyr N., Rudakov K., Popel' V., Kulyk A.

Abstract: To carry out calculations for defining characteristics of mode deformation for any product, it is required to have modulus of elasticity among other characteristics of materials. For the load-bearing structures of remote sensing satellites Yuzhnoye State Design Office uses laminate polymer composite material with filler ЭДТ-10 OST 92-0957, reinforced with high modular carbon fiber TC 36S-12K made by TAIRYFIL (England). The material specifications contain only Young's modulus upon tension and Poisson's ratio. Other moduli of elasticity are usually calculated by using certain formulas or determined during numerical or natural experiments. The obtained values show considerable variation.

The performed research resulted in selecting formulas that fit the ЭДТ-10 / TC 36S-12K composition. The numerical (FEM) and natural experiments were used for validation.

Keywords: CFRP; elastic modulus

Про визначення модулів пружності шаруватого композиційного матеріалу

Маслій В.М., Бобир М.І., Рудаков К.М., Попель В.М., Кулик А.С.

Анотація: Для проведення розрахунків на виявлення характеристик напружено-деформованого стану будь-яких виробів необхідно мати, серед інших, такі характеристики матеріалів, як модулі пружності. У силових конструкціях космічних апаратів для дистанційного зондування Землі в "КБ "Південне" застосовують, зокрема, шаруватий полімерний композиційний матеріал з наповнювачем ЭДТ-10 ОСТ 92-0957, армованим високомодульним вуглецевим волокном ТС 36S-12К фірми TAIRYFIL (Англія). У специфікації на матеріал указують лише модуль Юнга при розтяганні й коефіцієнт Пуассона. Інші модулі пружності зазвичай визначають за відомими формулами, у найкращому разі – у чисельному або натурному експерименті. Розкид результатів – значний. Отримані значення мають значний розкид.

У результаті проведеного дослідження були підібрані формули, що найбільш відповідні композиції ЭДТ-10 / ТС 36S-12К. Для валідації застосовували чисельний (метод скінчених елементів) і натурний експерименти.

Ключові слова: полімерний композиційний матеріал; модулі пружності

Список літератури

1. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий // Изд. 2-е. М. : Главная редакция физ-мат. лит-ры изд-ва "Наука", 1977. – 416 с.
2. Болотин В.В. Механика многослойных конструкций / В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
3. Победра Б.Е. Механика композиционных материалов / М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
4. Тарнопольский Ю.М. Методы статических испытаний армированных пластиков. 3-е изд. / Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Киндис. – М.: Химия, 1981. – 271 с.
5. Дифучин, Ю.М. Чисельне моделювання болтових з'єднань з ПКМ. Повідомлення 1. Створення змішаних 3D-моделей / Ю.М. Дифучин, К.М. Рудаков // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. машинобудування. №2(77), 2016. – С. 100-107. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.77.76975>.
6. ECSS-E-HB-32-20, Part 2A. Structural materials handbook – Part 2: Design calculation methods and general design aspects. (2011), available at : http://www.ecss.nl/wp-content/uploads/handbooks/ecss-e-hb/ECSS-E-HB-32-20_Part2A.pdf.