

УДК 539.3

Петров А. В., Михалкин А. А., Кравченко И. Ф.

Государственное предприятие «Ивченко-Прогресс». Украина, г. Запорожье

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В работе представлена методика прогнозирования упругих свойств однонаправленных композиционных материалов по упругим свойствам входящих в них волокна и матрицы – так называемых эффективных упругих свойств с использованием микромеханических моделей на основе моделирования условий проведения испытаний образцов на растяжение и сдвиг. Приведены зависимости упругих характеристик от объемного содержания волокон в композиционном материале. Расчеты выполнены по методу конечных элементов в трехмерной постановке. Выполнена верификация полученных результатов с известными расчетными и экспериментальными данными. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании конструкций из слоистых композиционных материалов.

Ключевые слова: однонаправленный композиционный материал; эффективные упругие свойства; микромеханическая модель; метод конечных элементов; объемное содержание волокон; верификация.

1. Введение

При проектировании деталей из композиционных материалов (КМ) актуальной научной и практической задачей является разработка методов определения их механических свойств. Физико-механические свойства КМ главным образом зависят от состава и структуры входящих компонентов – геометрии волокна, его ориентации, свойств связующего, условий взаимодействия на границе между волокном и связующим, а также технологии его изготовления [1,2].

Достоверное определение механических свойств КМ расчетным путем позволяет сократить или заменить ряд экспериментальных этапов компьютерным моделированием с целью сокращения временных и материальных затрат. Для этого, вместе с известными расчетными [1,5,6] и экспериментальными методами [2,5,7] применяются подходы компьютерного моделирования, моделирующие структуру КМ на основе использования микромеханических моделей [4,5, 9,10-12]. От точности расчетного или экспериментального определения механических свойств существенно зависят результаты расчета на прочность деталей из КМ. Поэтому разработка расчетных методик для точного и достоверного определения упругих свойств КМ является важной научной и практической задачей.

2. Постановка задачи исследования

В настоящее время получили широкое развитие КМ с 2D и 3D схемой армирования [9–12]. Применение микромеханического подхода для определения упругих свойств трехмерно-армированных композиционных материалов особенно актуально в связи с тем, что если для КМ с однонаправленной схемой армирования существует достаточно много хорошо себя зарекомендовавших аналитических методов расчета их упругих свойств [1,3], для КМ на основе 2D тканей аналитические зависимости существенно усложняются и, как правило, используются расчетно-экспериментальные методики [6,7,11]. Для трехмерно-армированных КМ получение аналитических зависимостей становится еще более сложной задачей, а в известной литературе применяются только упрощенные методики [10]. Поэтому применение микромеханических моделей для определения упругих свойств 3D КМ является рациональной альтернативой указанным методам. При этом, важным фактором является обеспечение максимальной близости компьютерного моделирования и условий проведения эксперимента.

Целью данной работы является разработка методов прогнозирования упругих свойств (модулей упругости, модулей сдвига и коэффициентов Пуассона) однонаправленных КМ по упругим свойствам входящих в них волокна и матрицы – так

называемых эффективных упругих свойств с использованием микромеханических моделей на основе моделирования условий проведения испытаний образцов на растяжение и сдвиг, а также их верификация с известными расчетными и экспериментальными данными. Рассчитанные по предлагаемой методике механические свойства могут использоваться при расчетах на прочность деталей из КМ.

3. Описание методики исследования

Для численного определения механических свойств КМ выполняется решение краевой задачи теории упругости в силах [3], при этом реальная структура КМ сводится к эквивалентному ортотропному материалу, напряженно-деформированное состояние которого однозначно моделируется девятью эффективными упругими характеристиками – тремя модулями упругости (E_1, E_2, E_3), тремя модулями сдвига (G_{12}, G_{23}, G_{13}) и тремя коэффициентами Пуассона (μ), с линейно-упругим поведением при нагружении, подчиняющемуся закону Гука [2, 3].

В данном случае, применительно для исследуемого однонаправленного КМ (рис. 1), волокно моделируется как трансверсально изотропный материал, а связующее – как изотропный материал. При

этом количество упругих констант волокна сокращается до пяти, поскольку имеют место следующие равенства:

$$E_2 = E_3; \mu_{12} = \mu_{13}; G_{12} = G_{13}.$$

Свойства матрицы определяются двумя упругими характеристиками – E и G (см. табл. 1).

Расчетная модель представляется в виде представительского объема КМ, представляющего собой минимальный элементарный объем КМ (рис. 1), моделирующий структуру материала – характер пространственного расположения армирующих волокон в объеме связующего, объемное содержание волокон и механические свойства входящих в материал компонентов. Диаметр волокна принимался $d = 0,12 \cdot 10^{-3}$ м. Размер представительского объема L принимался равным $1 \cdot 10^{-3}$ м. Размеры b и h выбирались таким образом, чтобы обеспечить объемное содержание волокон $V_f = 42,2\%, 52,5\%, 60,0\%$ и $69,6\%$.

Описанные выше микромеханические модели представительских объемов КМ были реализованы при помощи метода конечных элементов. Конечно-элементная модель показана на рис. 1 (б).

Для определения расчетных значений эффективных упругих характеристик решались следующие шесть краевых задач для представительского объема (рис. 2):

Таблица 1

Механические свойства волокна и связующего исследуемого КМ

Составляющая КМ	E_1 , ГПа	E_2 , ГПа	μ_{12}	μ_{23}	G_{12} , ГПа
Волокно	184,5	25,7	0,23	0,3	25,0
Связующее	3,2		0,35		–

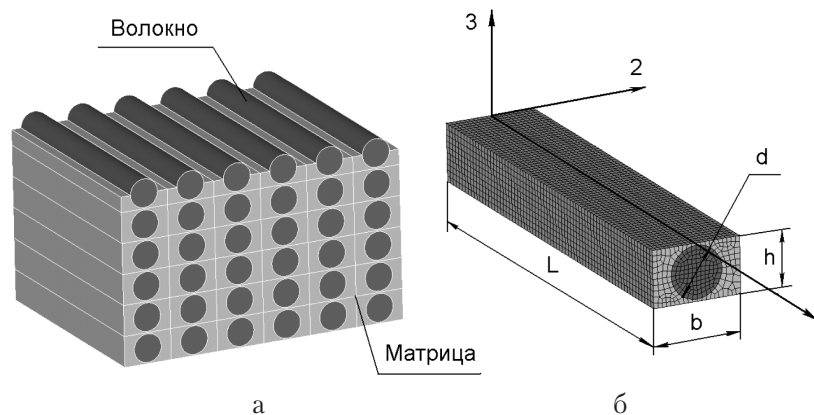


Рис. 1. Схема армирования (а) и конечно-элементная модель (б) представительского объема композиционного материала

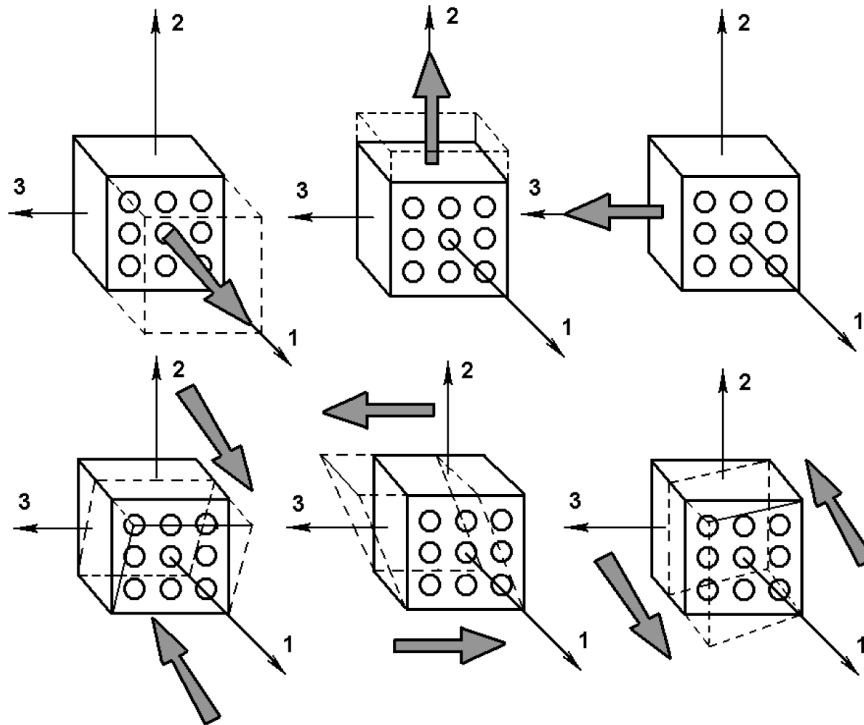


Рис. 2. Расчетные случаи для определения упругих характеристик КМ

- 1) растяжение вдоль оси 1 – для определения модуля упругости E_1 и коэффициента Пуассона μ_{12} ;
- 2) растяжение вдоль оси 2 – для определения модуля упругости E_2 и коэффициента Пуассона μ_{23} ;
- 3) растяжение вдоль оси 3 – для определения модуля упругости E_3 и коэффициента Пуассона μ_{31} ;
- 4) сдвиг в плоскости 12 – для определения модуля сдвига G_{12} ;
- 5) сдвиг в плоскости 23 – для определения модуля сдвига G_{23} ;
- 6) сдвиг в плоскости 13 – для определения модуля сдвига G_{13} .

Как показывают результаты проведенных разными авторами исследований [2], КМ с ориентиро-

ванным расположением волокон (к которым относится и исследуемый однонаправленный углепластик) при растяжении, сжатии и сдвиге ведут себя как упругие тела, подчиняющиеся закону Гука вплоть до разрушения.

Упругие характеристики КМ определялись методом конечных элементов с использованием микромеханических моделей, при этом нагружение представительского объема КМ моделировало испытание образцов на растяжение и сдвиг (рис. 3).

В качестве граничных условий использовалась жесткая заделка свободного края, а при расчетах на сдвиг дополнительно запрещались перемещения по нормали к поверхности сдвига для обеспечения напряженно-деформированного состояния пред-

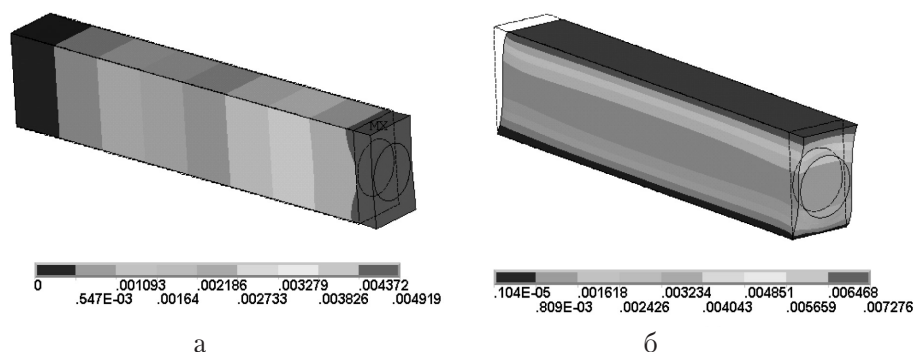


Рис. 3. Распределение перемещений в представительском объеме КМ: а – при растяжении в направлении 1; б – при сдвиге в плоскости 1–2

ставительского объема КМ наиболее близко соответствующего “чистому сдвигу”.

В результате, упругие характеристики КМ определялись на основе осредненных по сечению перемещений при растяжении и сдвиге представительского объема (рис. 3) по следующим ниже зависимостям:

– модули упругости

$$E = \frac{P \cdot L}{F \cdot u},$$

где P – сила нагрузки;

F – площадь поперечного сечения представительского объема;

L – длина представительского объема;

u – перемещение под действием силы;

– модули сдвига

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \text{ кг/мм}^2,$$

где $\tau = \frac{P}{F}$ – напряжение при сдвиге;

P – сила, прикладываемая в качестве нагрузки;

F – площадь сдвига;

$\gamma = \arctg \frac{\Delta S}{a}$ – деформация при сдвиге;

ΔS – перемещение при сдвиге;

a – ширина (высота) образца.

Коэффициенты Пуассона определялись как отношения соответствующих осредненных деформаций в продольном и поперечном направлениях.

4. Верификация полученных результатов

Верификация результатов определения механических свойств исследуемого КМ, полученных с использованием микромеханических моделей, проводилась путем сравнения данных результатов с результатами, полученными по двум альтернативным методикам – аналитической методике, использующей гомогенную модель КМ [1], и расчетно-экспериментальной методике Халпина-Цая [6,7,11], а также экспериментальными данными [2,8].

При использовании гомогенной модели модуль упругости в продольном направлении определяется на основе известного “правила смесей” [1, 6]

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f),$$

где E_f – модуль упругости волокна;

E_m – модуль упругости матрицы;

V_f – объемное содержание волокна в КМ.

Модуль упругости в поперечном направлении:

$$E_2 = \frac{E_f E_m [E_f V_f + E_m (1 - V_f)]}{[E_f + E_m (1 - V_f)][E_m + E_f (1 - V_f)] - V_f (1 - V_f) (E_f \mu_m - E_m \mu_f)^2},$$

где μ_f – коэффициент Пуассона волокна;

μ_m – коэффициент Пуассона матрицы.

Коэффициенты Пуассона КМ определялись по следующим зависимостям:

$$\mu_{12} = \mu_f V_f + \mu_m (1 - V_f),$$

$$\mu_{21} = \frac{E_f E_m [\mu_f V_f + \mu_m (1 - V_f)]}{[E_f + E_m (1 - V_f)][E_m + E_f (1 - V_f)] - V_f (1 - V_f) (E_f \mu_m - E_m \mu_f)^2}.$$

Расчетно-экспериментальная модель Халпина-Цая используется для моделирования двухфазных КМ с изотропной матрицей. Для определения эффективных (осредненных) упругих постоянных в ней используется уравнение “правила смесей”

$$P_c = \xi (P_f V_f + P_m V_m)$$

и уравнение Халпина-Цая

$$P_c = P_m \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f},$$

$$\text{где } \eta = \frac{P_f - P_m}{P_f + \xi P_m};$$

P_c – эффективная упругая постоянная КМ (модуль упругости, модуль сдвига);

P_f и P_m – эффективные упругие постоянные волокна и матрицы соответственно;

V_f и V_m – объемные содержания волокна и матрицы соответственно;

ξ – эмпирический коэффициент.

Значения эмпирического коэффициента следующие [6,7]:

$$- \xi = 1 \text{ при определении } E_1;$$

$$- \xi = 2 + 40 V_f^{10} \text{ при определении } E_2;$$

$$- \xi = 1 + 40 V_f^{10} \text{ при определении } G_{12};$$

$$- \xi = \frac{1}{4 - 3 \mu_m} \text{ при определении } G_{23},$$

где μ_m – коэффициент Пуассона изотропного материала матрицы.

Значения упругих характеристик, рассчитанных с использованием приведенных выше эмпирических коэффициентов, обычно дают хорошую сходимость с экспериментальными данными для однонаправленных слоистых КМ с высоким объемным содержанием волокон.

5. Анализ результатов работы

Одним из наиболее влияющих на свойства КМ факторов является объемное содержание волокна [1, 2]. С увеличением объемного содержания волокон возрастают плотность КМ, его прочность и модули упругости при растяжении, сжатии, сдвиге. В зависимости от технологии изготовления для исследуемых однонаправленных углепластиков предельное объемное содержание составляет 60...70 % [2].

На рис. 4–6 показаны зависимости модулей упругости, сдвига и коэффициентов Пуассона исследуемого КМ в зависимости от объемного содержания волокон, рассчитанных по микромеханическим конечно-элементным моделям, расчетно-экспериментальной модели Халпина-Цая и гомогенной модели и экспериментальным данным для $V_f = 60$ и 65%.

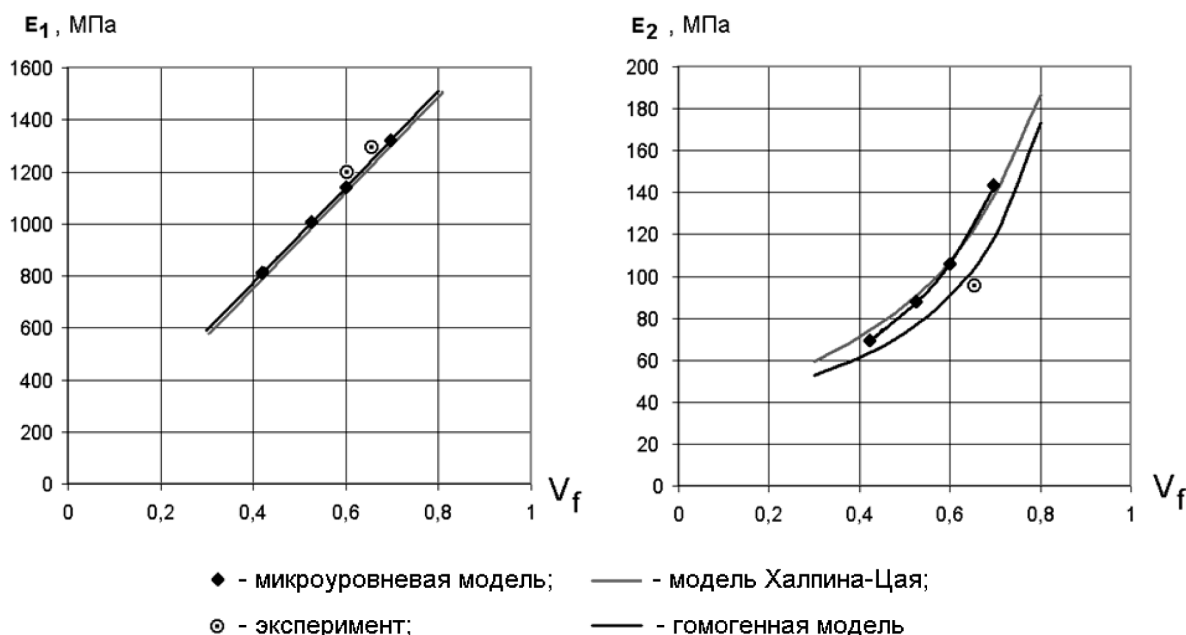


Рис. 4. Зависимость модулей упругости КМ от объемного содержания волокна

Как видно на рис. 4, для модуля упругости КМ в направлении армирования (E_1) получено практически полное совпадение результатов, полученных по всем указанным выше методикам между собой и экспериментальными данными. Для модуля упругости КМ в направлении перпендикулярном армированию (E_2) результаты расчета по микромеханическим моделям наиболее точно совпадают с моделью Халпина-Цая, хотя экспериментальные данные ближе к результатам, полученным по гомогенной модели. При этом максимальное различие в результатах, в зависимости от объемного содержания, составляет 10...25%.

В аналогичных условиях сравнения были проведены расчеты по определению модуля сдвига КМ в плоскости армирования (G_{12}) и перпендикулярном ей направлении (G_{23}), результаты которых представлены на рис. 5.

Как видно на рис. 5, результаты расчета модуля сдвига КМ G_{12} по микромеханическим моделям лежат между результатами, полученными по модели Халпина-Цая и гомогенной модели и близки к экспериментальным данным (относительная погрешность от 0 до 30%), при этом результаты расчета по аналитическим методикам существенно расходятся с увеличением объемного содержания волокон в КМ. Результаты расчета модуля сдвига G_{23} , полученные по гомогенной модели, существенно отличаются (в сторону завышения) от результатов, полученных по другим моделям и экспериментальным данным. Наиболее вероятно, что данное

различие связано с анизотропией механических свойств волокна в плоскости 2–3, которое не моделируется в рамках гомогенной модели (волокно моделируется как изотропный материал), в то время как микромеханическая модель и модель Халпина-Цая учитывают этот фактор, что подтверждает достаточно хорошее совпадение с экспериментальными результатами (рис. 5). Также источником погрешности при вычислении модулей сдвига может выступать недостаточно корректное моделирование “чистого сдвига” применяемыми граничными условиями или влияние формы и структуры выбранного представительского объема КМ.

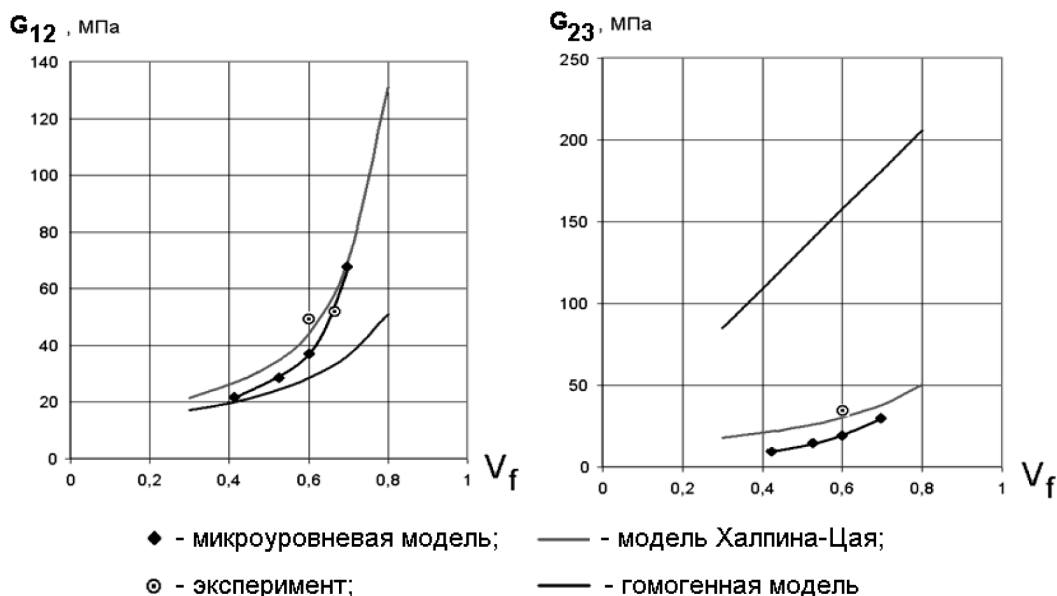


Рис. 5. Зависимость модулей сдвига КМ от объемного содержания волокна

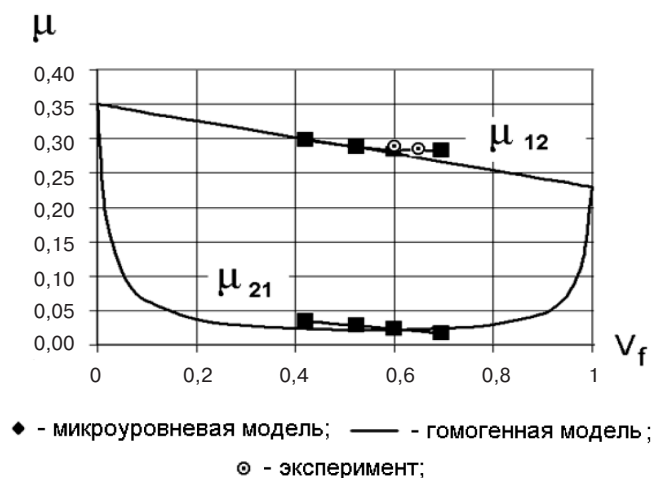


Рис. 6. Зависимость коэффициентов Пуассона КМ от объемного содержания волокна

Возможно этими или другими (неисследованными) факторами объясняется занижение результатов при определении модуля сдвига G_{23} с использованием микромеханических моделей относительно экспериментальных значений.

Результаты расчетов коэффициентов Пуассона μ_{12} и μ_{21} , полученные с использованием микромеханических моделей, показали хорошее совпадение с гомогенной моделью в исследованном диапазоне значений объемного содержания волокон в КМ (рис. 6), при этом сходимость с экспериментальными значениями составляет 1–2%.

Значение эффективных механических свойств КМ исследовано в достаточно широком диапазоне значений объемного содержания, что связано с необходимостью определения характера данных

зависимостей. На практике значения объемного содержания волокон в исследованном КМ обычно составляет $V_f = 60\text{--}65\%$. Более низкие значения не выгодны с точки зрения низких механических свойств, а более высокие связаны с технологическими трудностями при пропитке связующим [2] (этим обусловлено отсутствие экспериментальных данных по определению механических свойств КМ в указанных диапазонах объемного содержания). В связи с этим, в табл. 2 приведены значения эффективных механических свойств КМ, полученных по рассмотренным выше методикам, а также экспериментальные значения для $V_f = 60$ и 65% .

Как видно из табл. 2, значения эффективных механических свойств исследуемого однонаправленного слоистого КМ, полученные с использованием

Результаты определения упругих характеристик КМ

Метод определения	Упругая характеристика КМ							
	E_1 , ГПа		$E_2 (E_3)$, ГПа		G_{12} , ГПа		G_{23} , ГПа	
	Объемное содержание волокна (Vf)							
	60%	65%	60%	65%	60%	65%	60%	65%
Микромеханическая модель	111,99	121,11	10,38	12,31	3,63	5,20	1,91	2,43
Гомогенная модель	112,01	121,13	8,91	10,31	2,79	3,19	15,46	16,65
Модель Халпина-Цая	111,97	121,09	10,49	12,08	4,34	5,64	2,97	3,24
Эксперимент	117,68	127,49	–	9,32	4,90	5,10	3,43	–

микромеханических моделей с достаточной для практики точностью согласуются с экспериментальными данными, а также с альтернативными расчетными и расчетно-экспериментальными методиками.

6. Выводы

1. Определены методологические подходы к определению эффективных упругих свойств однонаправленных КМ на основе использования микромеханических моделей и моделирования эксперимента.

2. Исследовано влияние объемного содержания волокон на величины упругих свойств однонаправленного КМ при использовании аналитической гомогенной модели, расчетно-экспериментальной модели Халпина-Цая и микромеханических моделей с использованием МКЭ.

3. Получены величины эффективных упругих свойств однонаправленных КМ как ортотропного материала с достаточной для практики точностью, которые можно использовать в расчетах на прочность деталей из КМ.

4. Перспективами дальнейших исследований являются следующие:

- применение разработанных подходов и микромеханических моделей для определения эффективных упругих свойств КМ с 2D и 3D схемой армирования;

- исследование влияния вида граничных условий и формы представительского объема на величины упругих свойств КМ;

- исследование микромеханических моделей с повреждениями для определения критериев прочности 2D и 3D армированных КМ.

Литература

- [1] Карпов Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник / Я.С. Карпов, – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “Харк. авиац. ин-т”, 2010. – 768 с.
- [2] Армированные пластики / В.А. Бунаков, Г.С. Головкин, Г.П. Машинская и др.; Под ред. Г.С. Головкина, В.И. Семенова. – М.: Изд-во МАИ, 1997. – 404 с.
- [3] Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
- [4] Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов. – К.: Наукова думка, 1985. – 304 с.
- [5] P. Morgan Carbon Fibers and their Composites. CRC Press Taylor & Francis Group. 2005. – 1131 p.
- [6] B. Harris. Engineering Composite Materials. The Institute of Materials, London, 1999. – 194 p.
- [7] S.Y Fu, B.Lauke and Y.W. Mai Science and Engineering of Short Fibre Reinforced Polymer Composites. Woodhead Publishing Limited, 2009. – 338 p.
- [8] T. Ishikava, T-W Chou. Elastic Behavior of Woven Hybrid Composites. Journal of Composite Materials, 1982. – 19 p.
- [9] Lomov S.V., Ivanov D.S., Verpoest I., Bogdanovich A.E., Mungaloy D., Zako M., et al. Predictive analyses and experimental validations of effective elastic properties of 2D and 3D woven composites. In: 13th European conference on composite materials (ECCM-13), 2008, Stockholm.
- [10] Polymer Composites in the Aerospace Industry. Edited by P.E.Irving and C. Soutis. Elsevier Ltd, 2015. – 520 p.
- [11] B. Mobasher Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites. CRC Press, 2012. – 440 p.
- [12] Peng X.O., Cao J. Numerical Determination of Mechanical Elastic Constants of Textile Composites. 15th Annual Technical Conference of the American Society for Composites, College Station, TX, 2000.

Petrov A. V., Mikhalkin A. A., Kravchenko I. F.

SE Ivchenko-Progress. Ukraine, Zapozozhye

PREDICTION ELASTIC PROPERTIES OF UNIDIRECTIONAL COMPOSITES WITH USING BY MICROMECHANICAL MODELS

In the present research the method to predict elastic properties of unidirectional layered composites based on elastic properties of fibers and matrix incorporated in them is proposed. The so-called effective elastic properties are predicted using micromechanical models based on a simulation of specimen shear and tensile test conditions. Dependences of elastic properties from fiber volume fraction in composites are presented. Calculations are performed according to finite-element method in three-dimensional formulation. The obtained elastic properties were verified with the experimental and calculated data. The obtained results can be used at designing of parts made of layered composite materials.

Keywords: unidirectional composite; effective elastic properties; micromechanical model; finite element method; fiber volume fraction; verification.

References

- [1] Karpov Y.S. Proektirovanie detaley i agregatov iz compositov: uchebnik / Y.S. Karpov, - Kh.: National aerospace university, 2010. – 768 p.
- [2] Armirovaniye plastiki / V.A. Bunakov, G.S. Golovkin, G.P. Mashinskaya i dr.; reg. by G.S. Golovkin, V.I. Semenov. – M.: MAI, 1997. – 404 p.
- [3] Pobedria B.E. Mekhanika kompozitsionih materialov. – M.: Moscow university, 1984. – 336 p.
- [4] Vanin G.A. Micromechanika kompozitsionih materialov. – K.: Naukova dumka, 1985. – 304 p.
- [5] P. Morgan Carbone Fibers and their Composites. CRC Press Taylor & Francis Group. 2005. – 1131 p.
- [6] B. Harris. Engineering Composite Materials. The Institute of Materials, London, 1999. – 194 p.
- [7] S.Y Fu, B.Lauke and Y.W. Mai Science and Engineering of Short Fibre Reinforced Polymer Composites. Woodhead Publishing Limited, 2009. – 338p.
- [8] T. Ishikava, T-W Chou. Elastic Behavior of Woven Hybrid Composites. Journal of Composite Materials, 1982. – 19 p.
- [9] Lomov S.V., Ivanov D.S., Verpoist I., Bogdanovich A.E., Mungaloy D., Zako M., et al. Predictive analyses and experimental validations of effective elastic properties of 2D and 3D woven composites. In: 13th European conference on composite materials (ECCM-13), 2008, Stockholm.
- [10] Polymer Composites in the Aerospace Industry. Edited by P.E. Irving and C. Soutis. Elsevier Ltd, 2015. – 520 p.
- [11] B.Mobasher Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites. CRC Press, 2012. – 440 p.
- [12] Peng X.O., Cao J. Numerical Determination of Mechanical Elastic Constants of Textile Composites. 15th Annual Technical Conference of the American Society for Composites, College Station, TX, 2000.