

УДК 620.22-419

Модель нелинейного деформирования углепластиков

А. М. ДУМАНСКИЙ, д-р физ.-мат. наук

Федеральное бюджетное учреждение науки "Институт машиностроения им. А. А. Благонравова" РАН,
Москва, Россия

А. Н. РУСЛАНЦЕВ, Л. П. ТАИРОВА, канд. техн. наук

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Представлено использование углепластика в качестве материала в новейших конструкциях авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ), что позволит повысить ресурс, эффективность применения топлива, жесткость конструкции, коррозионную стойкость и другие важные технические характеристики. Определена необходимость разработки инженерных методов расчета и прогнозирования сопротивления внешним воздействиям для максимальной реализации механических свойств углепластика в элементах конструкций. Предложена расчетно-аналитическая модель, позволяющая на основе соотношений теории слоистых пластин и аппроксимации кривой деформирования однонаправленного слоя при сдвиге в плоскости слоя прогнозировать нелинейное деформирование слоистого углепластика. Получены явные матричные выражения для матриц жесткости и податливости пакета, представляющие собой произведения соответствующих матриц упругих характеристик на матрицы, позволяющие производить учет нелинейных свойств пакета.

Ключевые слова: слоистый углепластик, модель нелинейного деформирования, теория слоистых пластин, матрица податливости, матрица жесткости.

Уникальные физико-механические свойства полимерных композитных материалов позволяют широко использовать их в элементах конструкций АРКТ. При проектировании элементов конструкций из таких материалов необходимо решить широкий круг вопросов, связанных с прочностью, жесткостью, устойчивостью, долговечностью и надежностью конструкции. Углепластик является одним из наиболее распространенных в авиационной и ракетно-космической технике композитных материалов. Наряду с высокими удельными характеристиками прочности и жесткости этот материал обладает существенной анизотропией механических свойств, склонностью к трещинообразованию и накоплению дефектов, что вынуждает увеличивать запас надежности при проектировании из него элементов конструкций. Поэтому весьма актуальна разработка расчетно-экспериментальных методов, позволяющих учитывать влияние структурных и технологических факторов на характер

деформирования углепластика с разными схемами армирования. В данной работе предлагается структурно-феноменологический метод прогнозирования механических свойств слоистого углепластика по характеристикам слоя.

Следует отметить, что большинство моделей деформирования и разрушения слоистых композитных материалов основываются на использовании физико-механических свойств однонаправленного слоя и создании расчетно-экспериментальных вычислительных методов оценки и прогнозирования деформирования и разрушения многослойного материала с любой заданной схемой армирования при заданных силовых воздействиях [1–4]. В предлагаемых подходах, рассмотренных в [4], механические свойства слоя определяются по результатам различных испытаний и по-разному проявляются в свободно деформируемом однонаправленном слое и в составе многослойного пакета. Можно отметить, что механические свойства слоя в направлении армирования волокон незначительно зависят от напряжений, действующих поперек направления армирования и при сдвиге. В работе [5] при одноосном растяжении слоя в направлении армирования отмечается его некоторое упрочнение. Деформирование и разрушение слоя поперек волокон и при сдвиге в плоскости слоя часто происходит с накоплением повреждений и приводит к появлению нелинейной

Думанский Александр Митрофанович, заведующий лабораторией.

E-mail: alduman@rambler.ru

Русланцев Андрей Николаевич, бакалавр, студент.

E-mail: andreiruslansev@gmail.com

Таирова Людмила Павловна, старший научный сотрудник.

E-mail: com-or@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2013 г.

© Думанский А. М., Русланцев А. Н., Таирова Л. П., 2013

зависимости между напряжениями и деформациями [6—8]. В [7, 8] количественный учет влияния нелинейности деформаций производился с помощью комбинации продольных и поперечных напряжений.

В ряде работ отмечается, что нелинейное поведение слоя и пакета в значительной степени зависят от нелинейных свойств при сдвиге в плоскости слоя [7—12]. Нелинейные эффекты проявляются вследствие накопления повреждений, вызванных расслоением, разрывом волокон, проскальзыванием слоев, избытком или недостатком смолы в некоторых областях, наличием бороздок, включений, инородных тел, вмятин и царапин. Длительное действие нагрузок, не совпадающих с направлением армирования хотя бы одного из слоев, характеризуется проявлением реологических свойств [13, 14].

В качестве базовых испытаний по определению механических свойств слоя обычно используются результаты испытаний на растяжение или сжатие однонаправленных, перекрестно армированных или многонаправленных образцов [15—18]. Одной из возможностей разделения нелинейной деформации на необратимую (пластическую) и зависящую от времени составляющие являются испытания на ползучесть с последующей разгрузкой [19]. Дополнительная информация по реологии свойств может быть получена при анализе петель гистерезиса при ограниченном числе циклов нагружения [13].

Механизмы разрушения многослойных композитов существенно отличаются от механизмов разрушения металлов и сплавов. Во время эксплуатации в конструкциях из композитных материалов имеются или возникают микродефекты, которые в дальнейшем могут привести к растрескиванию матрицы и расслоению материала. Но в то же время такие материалы более устойчивы чем металл к росту макроскопических трещин при циклической нагрузке. Для учета нелинейности деформаций в ряде работ используются инкрементальные методы расчета напряжений или деформаций [12, 16, 20]. В работе [21] рассматривается деградация жесткостных и прочностных характеристик при растрескивании матрицы и расслоении стекло- и углепластиков с укладкой $[0/90]_n$. В работе [22] нелинейное деформирование слоистого композита описывается с помощью аппроксимации кривых деформирования слоя соотношением Рамберга—Осгуда. В [7] рассмотрена модель, позволяющая учитывать нелинейное деформирование образца при сдвиге, вызванное накоплением повреждений вследствие растрескивания хрупкой матрицы. Для аппроксимации пластических деформаций в слое

использовалась степенная зависимость. В работе [23] проведен анализ кривых деформирования и типов разрушения перекрестно армированных образцов из углепластика, на основе которого была предложена зависимость сдвиговых деформаций от напряжений в плоскости слоя в виде полинома второй степени.

В связи с многообразием механизмов накопления повреждений и разрушения существует ряд феноменологических подходов к проблеме оценки предельного состояния элементов из слоистых композитов. Поверхности разрушения, связанные с нарушением монолитности или разделением элемента конструкции на части, как правило, имеют эллиптическую, эллипсоидную или ромбовидную формы.

В данной работе с помощью матричных алгоритмов и аналитической аппроксимации кривых деформирования в плоскости слоя при сдвиге предлагается метод построения нелинейных определяющих соотношений слоя и пакета. На первом этапе в области линейно упругого поведения проводится оценка упругих характеристик слоя. Их определение может быть сделано по результатам испытаний однонаправленных или перекрестно армированных образцов [24].

Для выявления некоторых общих закономерностей нелинейного поведения слоя при сдвиге на рис. 1 приведены кривые деформирования при сдвиге в плоскости слоя для четырех материалов, построенные по данным международного Проекта Third World-Wide Failure Exercise (WWFE-III) [25].

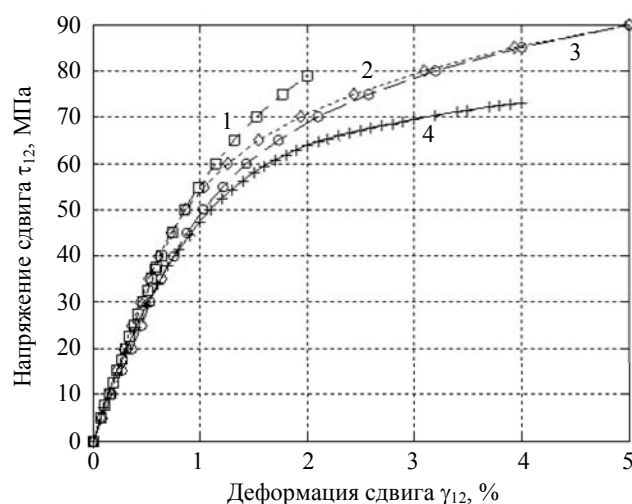


Рис. 1. Кривые диаграмм деформирования при сдвиге в плоскости слоя образцов:

1—3 — углепластики AS4/3501-6, IM7/8552 и G40/800, соответственно; 4 — стеклопластик LY556/60

С учетом нелинейности диаграммы деформирования при сдвиге в плоскости слоя система оп-

ределяющих соотношений для слоя может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= g_{12}^0 \varepsilon_1 + g_{12}^0 \varepsilon_2, \\ \sigma_2 &= g_{12}^0 \varepsilon_1 + g_{22}^0 \varepsilon_2, \\ \tau_{12} &= \psi(\gamma_{12}),\end{aligned}$$

где g_{ij}^0 — компоненты матрицы жесткости слоя;
 ψ — функция, аппроксимирующая кривую деформирования при сдвиге в плоскости слоя.

Анализ экспериментальных кривых деформирования при сдвиге в плоскости слоя свидетельствует о наличии начального линейного участка. Аппроксимацию этих кривых можно выполнить с помощью кусочно-линейной функции, либо комбинации линейной функции на начальном участке и нелинейной (степенной или какой-либо другой) функции на нелинейном участке деформирования. В частности, можно использовать кусочно-линейную аппроксимацию

$$\begin{aligned}\tau_{12}(\gamma_{12}) &= g_{66}^0 \gamma_{12} - \Delta g_{66}^{(1)} (\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(1)}) H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(1)}) - \\ &- \Delta g_{66}^{(2)} (\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(2)}) H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(2)}) - \dots,\end{aligned}\quad (1)$$

где g_{66}^0 — модуль сдвига на начальном участке, $\Delta g_{66}^{(i)}$ описывает изменение модуля сдвига по достижении некоторого порогового значения деформации $\gamma_{12}^{(i)}$, $H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(i)})$ — функция Хэвисайда соответствующего аргумента.

Модуль сдвига в соответствии с аппроксимацией (1) примет следующий вид

$$\begin{aligned}g_{66}(\gamma_{12}) &= g_{66}^0 - \Delta g_{66}^{(1)} H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(1)}) - \\ &- \Delta g_{66}^{(2)} H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(2)}) - \dots.\end{aligned}$$

Изменение модуля сдвига при достижении некоторых значений сдвиговой деформации может свидетельствовать об увеличении уровня накопленных повреждений.

Обозначив

$$f = \Delta g_{66}^{(1)} H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(1)}) - \Delta g_{66}^{(2)} H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(2)}) - \dots,$$

матрицу жесткости слоя можно записать в следующем матричном виде

$$G_{12} = G_{12}^0 - I_g f, \quad (2)$$

где G_{12}^0 — матрица жесткости на упругом участке

$$\text{деформирования слоя, } I_g = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Матрицу жесткости слоя после некоторых матричных преобразований запишем следующим образом

$$G_{12} = G_{12}^0 \left(I - I_g \frac{f}{g_{66}^0} \right), \quad (3)$$

где I — единичная матрица.

Обращая матрицу жесткости (3), получим матрицу податливости слоя

$$S_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \left(1 - \frac{f}{g_{66}^0} \right)^{-1} \end{pmatrix} S_{12}^0.$$

Анизотропия нелинейных свойств однонаправленного слоя может быть описана с помощью известных соотношений преобразования матриц жесткости и податливости при повороте системы координат

$$\begin{aligned}\bar{G}_{xy} &= T_1 G_{12} T_1^T; \\ \bar{S}_{xy} &= T_2 S_{12} T_2^T,\end{aligned}\quad (4)$$

где матрицы преобразования равны:

$$T_1 = \begin{pmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 \end{pmatrix}, \quad T_2 = \begin{pmatrix} c^2 & s^2 & -sc \\ s^2 & c^2 & sc \\ 2sc & -2sc & c^2 \end{pmatrix},$$

где $s = \sin\theta$, $c = \cos\theta$, θ — угол между осью Ox и направлением армирования волокон.

Выражения для компонент жесткости и податливости имеют вид, подобный упругому случаю, только вместо компоненты g_{66}^0 подставляется $g_{66}^0 - f$, в нашем случае, зависящую от двух параметров $\gamma_{12}^{(1)}$ и $\gamma_{12}^{(2)}$.

Построение связанных матриц жесткости и податливости проведем с помощью преобразования известных соотношений теории слоистых пластин [1]. Матрица жесткости пакета определяется с помощью выражения (2)

$$G_{xy} = \sum_k T_1^{(k)} \left[G_{12}^0 - I_g f \right] T_1^{(k)T} \bar{h}^{(k)} = G_{xy}^0 - \tilde{G}_{xy} f, \quad (5)$$

где $\tilde{G}_{xy} = \sum_k T_1^{(k)} I_g T_1^{(k)T} \bar{h}^{(k)}$;

$\bar{h}^{(k)}$ — относительная толщина k -го слоя;

G_{xy}^0 — упругая матрица жесткости.

Следует отметить, что матрица \tilde{G}_{xy} не зависит от упругих характеристик слоя и определяется укладкой слоев и их относительными толщинами.

Подобно (3) матрицу жесткости (5) с помощью алгебраических преобразований представим в виде произведения матрицы жесткости на упругом участке деформирования и некоторой поправочной матрицы, позволяющей учитывать влияние нелинейности слоя при сдвиге

$$G_{xy} = G_{xy}^0 (I - S_{xy}^0 \tilde{G}_{xy} f), \quad (6)$$

где $S_{xy}^0 = [G_{xy}^0]^{-1}$. Проведем диагонализацию произведения $S_{xy}^0 \tilde{G}_{xy} = Q \text{diag}(\lambda_i) Q^{-1}$, подставляя затем полученное выражение в (6). После преобразований получим:

$$G_{xy} = G_{xy}^0 Q \text{diag}(1 - \lambda_i f) Q^{-1}. \quad (7)$$

Процедура диагонализации выполнялась для более наглядного представления матрицы жесткости пакета, а также для упрощения ее обращения. Поправочный матричный коэффициент, позволяющий учитывать влияние нелинейной деформации, оказывается равным: $K_{xy} = Q \text{diag}(1 - \lambda_i f) Q^{-1}$.

Используя формулу для функции от матрицы, обращая матрицу жесткости (7), получим выражение для матрицы податливости:

$$S_{xy} = Q \text{diag} \left(\frac{1}{1 - \lambda_i f} \right) Q^{-1} S_{xy}^0. \quad (8)$$

Таким образом, с помощью выражений для матриц жесткости и податливости можно получить явные выражения для определяющих соотношений слоистого композита, позволяющих учитывать влияние нелинейных свойств.

Для ортотропного композита с помощью соотношений, подобных (4), может быть описана анизотропия нелинейных свойств слоистого материала.

В общем случае процедура построения определяющих выражений включает следующие действия: определение упругих свойств однонаправленного материала;

выбор функции аппроксимации кривой деформирования при сдвиге в плоскости слоя и определение ее параметров;

проведение матричных вычислений и построение определяющих соотношений.

При помощи описанного алгоритма были повторно обработаны данные, опубликованные в [26]. Определение характеристик проводилось при помощи нахождения минимума следующего функционала

$$f(E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}) = \sum_k \left[\left(\varepsilon_{\varepsilon x}^{(k)} - \varepsilon_{\varepsilon px}^{(k)} \right)^2 + \left(\varepsilon_{\varepsilon y}^{(k)} - \varepsilon_{\varepsilon py}^{(k)} \right)^2 \right],$$

где $\varepsilon_p^{(k)}$ — экспериментальные значения деформации;

$\varepsilon_p^{(k)}$ — расчетные значения для каждой укладки;

k — количество укладок.

По начальному линейному участку кривой деформирования были определены упругие характеристики слоя: $E_1 = 150$ ГПа, $E_2 = 4,0$ ГПа, $G_{12} = 2,5$ ГПа, $\nu_{12} = 0,316$. Ограничиваясь одним участком падения модуля сдвига, авторы определили параметры аппроксимирующей модуль сдвига функции $g_{66}^0 = 2,5 - 1,4 \cdot H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(1)})$. В этом случае:

$$\Delta g_{66}^{(1)} = 1,4 \text{ ГПа}, \quad \gamma_{12}^{(1)} = 0,006, \quad f = H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(1)}).$$

На рис. 2 показано соответствие расчетных и экспериментальных данных зависимостей модуля упругости и коэффициента Пуассона перекрестно армированных образцов.

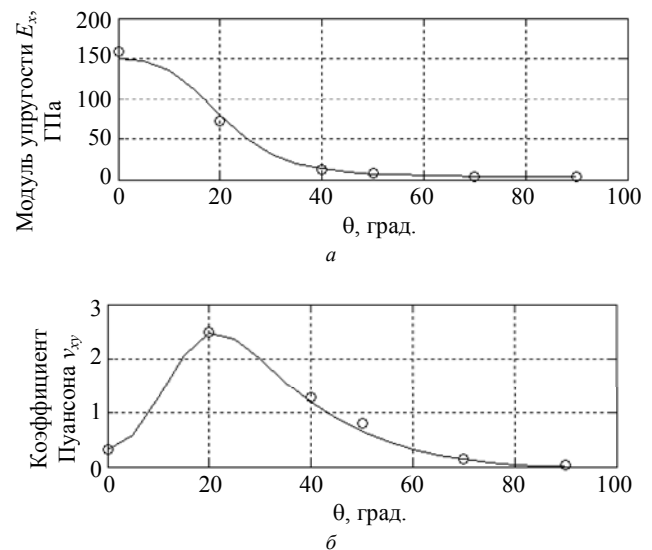


Рис. 2. Зависимости модуля упругости (а) и коэффициента Пуассона (б) образцов из перекрестно армированного углепластика КМУ-4 от укладки θ (кружки — экспериментальные данные, линии — расчетные)

Расчет кривых деформирования проводился по схеме пошагового накопления деформаций с ростом нагрузки:

$$\varepsilon_x^{(i+1)} = \varepsilon_x^{(i)} + s_{xx}^{(i)} \left[\sigma_x^{(i+1)} - \sigma_x^{(i)} \right];$$

$$\varepsilon_y^{(i+1)} = \varepsilon_y^{(i)} + s_{xy}^{(i)} \left[\sigma_x^{(i+1)} - \sigma_x^{(i)} \right],$$

где i — индекс массива напряжений, соответствующего экспериментальным значениям;

$s_{xx}^{(i)}$ и $s_{xy}^{(i)}$ — компоненты податливости, определяемые с помощью выражения (8).

Сравнение расчетных и экспериментальных данных приведено на рис. 3. Подобный расчет может быть выполнен для образцов с произвольной укладкой слоев.

Выводы

1. Предложена модель, позволяющая по упругим характеристикам однонаправленного слоя и аппроксимации нелинейной диаграммы деформирования при сдвиге в плоскости слоя прогнозировать

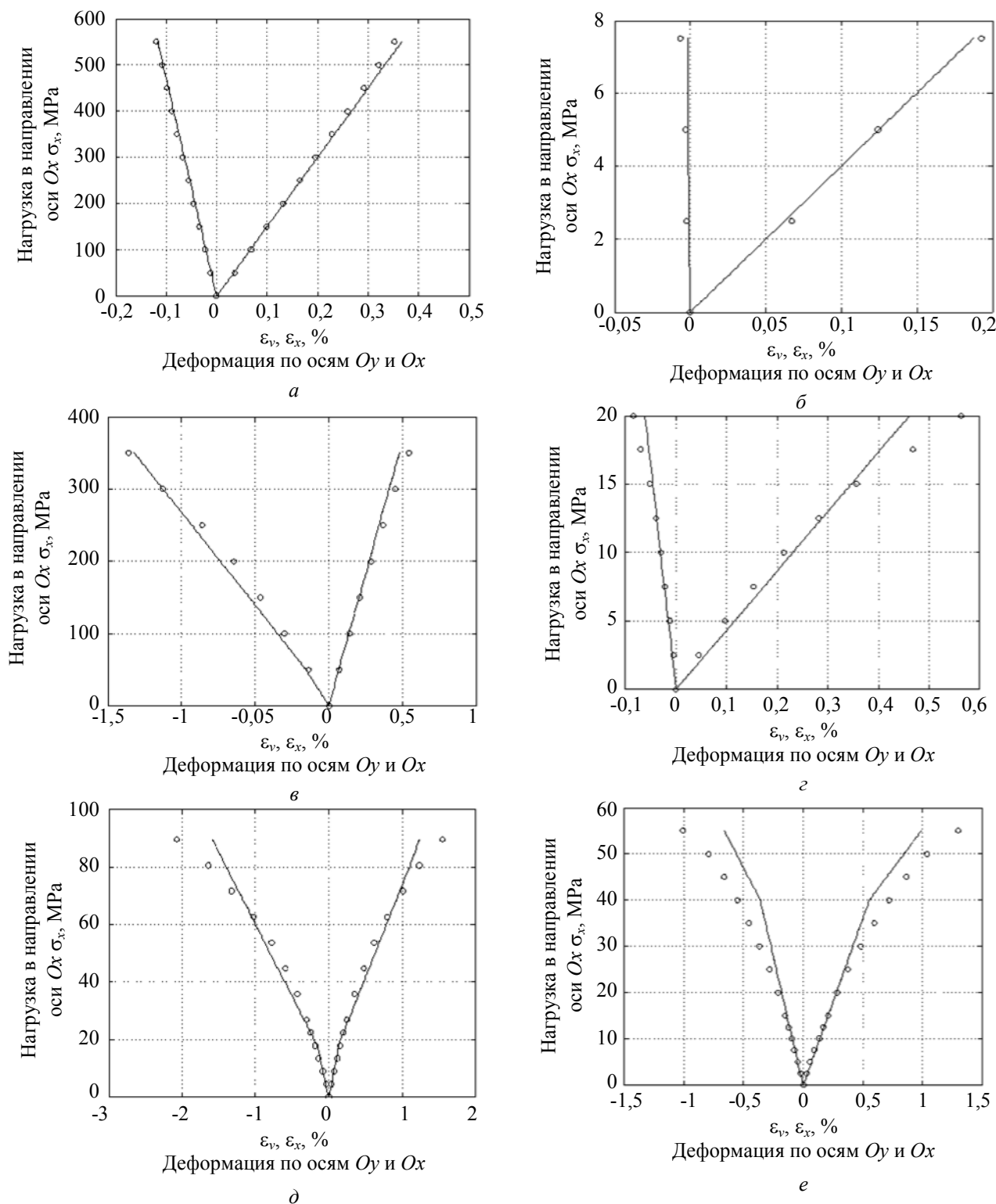


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные значения кривых диаграмм деформирования перекрестно армированных образцов углепластика со следующими значениями укладок:
 а — 0°; б — 90°; в — ± 20°; г — ± 40°; д — ± 40°; е — ± 50°.

вать нелинейное деформирование слоистых композитов.

2. Для описания нелинейного деформирования образцов углепластика КМУ-4 выполнен соответствующий расчет. Показано удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных.

3. Предложенный подход позволяет разделить влияние укладки слоев и физическую нелинейность при сдвиге на нелинейные свойства пакета.

4. Предложенный метод может быть рекомендован для расчета элементов тонкостенных конструкций из углепластиков.

ЛИТЕРАТУРА

- Композиционные материалы. Справочник / Под ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. — М.: Машиностроение, 1990. — 512 с.
- Винсон Ж. Р., Сираковский Р. Л.** Поведение конструкций из композитных материалов. — М.: Металлургия, 1991. — 264 с.
- Композиционные материалы. Т. 8. Часть 2. Анализ и проектирование конструкций. Ред. К Чамис. Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1978. — 264 с.
- Failure criteria in fibre reinforced polymer composites, The World-Wide Failure Exercise. Editors: M. J. Hinton, A. S. Kaddour, P. D. Soden. Elsevier: 2004. — 1269 p.
- Лагас П. А.** Нелинейный характер зависимости "напряжение—деформация" для слоистых графитопоксидных пластиков // *Аэрокосмическая техника*, 1985, № 4. Апрель. С. 102—111.
- Кравченко О. Л., Вильдеман В. Э.** Моделирование неупругого деформирования перекрестно армированных слоистых композитов // *Математическое моделирование систем и процессов*, 1997, № 5. С. 49—55.
- Schueker C., Petterman H. E.** Combining elastic brittle damage with plasticity to model the non-linear behavior of fiber reinforced laminates // In *Mechanical response of composites. Computational methods in applied sciences*. V. 10. Camanho P. P., Davila C. G., Pinho S. T., Remmers J. J. T. (Eds). Springer, 2008. P. 99—117.
- Алимов М. А., Думанский А. М., Радченко А. А.** Анализ нелинейности деформирования при одноосном растяжении косоугольно-армированного углепластика // *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2012, № 2. С. 39—44.
- Hahn H. T., Tsai S. W.** Nonlinear Elastic Behavior of Unidirectional Composite Laminae // *Journal of Composite Materials*. 1973. V. 7. P. 102—118.
- Думанский А. М., Таирова Л. П., Смердов А. А.** Исследование деформативных и прочностных характеристик углепластика на плоских и трехслойных образцах // *Аэрокосмические технологии*, 2009. Труды второй междунар. науч.-техн. конф. Сборник трудов. Реутов—Москва, 19—20 мая, 2009. Том 2. — М., 2012. С. 180—192.
- Думанский А. М., Таирова Л. П., Горлач И., Алимов М. А.** Расчетно-экспериментальное исследование нелинейных свойств углепластика // *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2011, № 5. С. 91—97.
- Zinoviev P. A., Grigoriev S. V., Lebedeva O. V., Tairova L. P.** The strength of multilayered composites under a plane-stress state // In *Failure criteria in fibre reinforced polymer composites*. Elsevier: 2004. P. 379—401.
- Sierakowski R. L.** Impact damage-tolerant composite structural design // In *Impact behavior of fiber-reinforced composite materials and structures*. Ed. By S. R. Reid and G. Zhou. CRC Press, Woodhead Publishing Limited. Cambridge. England: 2000. P. 106—132.
- Dumansky A. M., Tairova L. P.** The prediction of viscoelastic properties of layered composites on example of cross ply carbon reinforced plastic // *World Congress on Engineering 2007*. V. II. — London, UK 2-4 July, 2007. P. 1346—1351.
- Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Таирова Л. П.** Идентификация упругих характеристик однонаправленных материалов по результатам испытаний многослойных композитов. В кн.: *Расчеты на прочность*. 1989. Вып. 30. С. 16—31.
- Ogihara S., Kobayashi S., Reifsnider K. L.** Characterization of nonlinear behavior of carbon/epoxy unidirectional and angle-ply laminates // *Adv. Composite Mater*, 2003. V. 11. No. 3. P. 239—254.
- Kawai M., Honda N.** Ply-by-ply basis off-axis fatigue life prediction for cross-ply CFRP laminates at room temperature // *16th International conference on composite materials*. Kyoto. Japan, 2007. P. 1—9.
- Daniel I. M., Werner B. T., Fenner J. S.** Strain-rate-dependent failure criteria for composites // *Composite Science and Technology*, 2011. V. 71. P. 357—364.
- Dumansky A. M., Tairova L. P.** Time-dependent behavior of carbon fibre reinforced laminates // *Proceedings of the Second International Conference on Advanced composite materials and technologies for aerospace applications*, June 11—13, 2012, Wrexham, North Wales, United Kingdom. P. 75—79.
- Puck A., Schukmann H.** Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models // In *Failure criteria in fibre reinforced polymer composites*. Elsevier: 2004. P. 264—297.
- Kashtalyan M., Soutis C.** Stiffness degradation in cross-ply laminates damaged by transverse cracking and splitting // *Composites : Part A* 31 (2000). P. 335—351.
- Bogetti T., Hoppel C., Harik V., Newill J., Burns B.** Predicting the Nonlinear Response and Progressive Failure of Composite Laminates // In *Failure criteria in fibre reinforced polymer composites*. Elsevier: 2004. P. 961—975.
- Rotem A., Hashin Z.** Failure modes of angle ply laminates // *Journ. Compos. Mater.*, 1975. V. 9. P. 191—206.
- Думанский А. М., Таирова Л. П., Горлач И., Алимов М. А.** Расчетно-экспериментальное исследование нелинейных свойств углепластика // *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2011, № 5. С. 91—97.
- Kaddour A. S., Hinton M. J., Li S., Smith P. A.** Instructions to contributors of the Third World-Wide Failure Exercise (WWFE-III) Part (A). — 48 p.
- Смердов А. А., Думанский А. М., Таирова Л. П.** Комплексные экспериментальные исследования деформативных и прочностных свойств композитов для отсеков и обтекателей ракет-носителей // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. машиностроение*, 2012. С. 124—136.

Model of nonlinear deformation of carbon fiber reinforced plastics

A. M. DUMANSKY

Federal budget-funded research "Institute of Machines Science named after A. A. Blagonravova of RAS",
Moscow, Russia

A. N. RUSLANTSEV, L. P. TAIROVA

Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russia

Use of carbon fiber reinforced plastics in advanced aviation and spacecraft structures provides increase of durability, fuel use efficiency, structure stiffness, corrosive resistance and other specifications. To attain maximal achievement of carbon fiber reinforced plastics (cfpr) mechanical properties the structure-phenomenological methods for prediction of environmental effects resistance is required. On the basis of classical lamination theory and analytical approximation of straining curve of unidirectional layer at shear plane layer shear stress-strain a calculated-analytical model allowing the prediction of nonlinear behavior of multidirectional cfpr was suggested. The explicit expressions for stiffness and compliance matrices representing the multiplication of the corresponding matrices of the elastic properties by correcting matrices allowing nonlinear properties to be taken into account.

Keywords: layered carbon reinforced plastic, model of nonlinear straining, classical lamination theory, compliance matrix, stiffness matrix.