

РАСЧЕТ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ТКАНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПОСРЕДСТВОМ ЭНДОХРОННОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ

Б.С. Сарбаев

А.Н. Барышев

abaryshev@inbox.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведен краткий обзор математических моделей нелинейного деформирования ортотропных конструкционных материалов. Предложена эндохронная модель нелинейного деформирования ортотропного композиционного материала с тканым наполнителем при плоском напряженном состоянии. Выделены три независимых механизма деформирования — при одноосном нагружении вдоль основы, утка и чистом сдвиге в плоскости слоя. Приведены соотношения и процедура определения численных значений материальных параметров. Показаны результаты применения модели для описания деформирования различных композиционных материалов с тканым наполнителем

Ключевые слова

Композиционный материал, тканый наполнитель, диаграмма деформирования, эндохронная теория пластичности, физическая нелинейность, идентификация параметров, плоское напряженное состояние

Поступила в редакцию 14.03.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Для расчета напряженно-деформированного состояния конструкции необходима математическая модель, описывающая связь напряжений и деформаций в материале. Применение закона Гука для описания деформирования конструкционных композитов во многих случаях некорректно, так как материалы проявляют нелинейные свойства задолго до разрушения. При этом фактор времени несущественен, а при разгрузке можно наблюдать образование остаточных деформаций. В соответствии с традиционной терминологией такое неупругое деформирование называют пластическим. Материалы именно с такими свойствами рассматриваются в настоящей статье. В этом случае для описания процессов деформирования необходимы соотношения теории пластичности. В настоящее время разработано большое число моделей, предназначенных для описания пластического поведения конструкционных материалов. Некоторые из них достаточно подробно приведены в работе [1]. Значительная часть существующих моделей предназначена для описания изотропных материалов. Далее приведен краткий обзор современных моделей пластического деформирования ортотропных конструкционных материалов.

Модели неупругого деформирования ортотропных материалов. Классический подход к описанию неупругого поведения материала связан с понятием критерия пластичности — условия перехода от упругого деформирования к неупругому. В пространстве напряжений критерий задает некоторую поверхность

пластичности. При построении модели деформирования материала необходимо установить вид поверхности и закон ее изменения. Эта задача достаточно сложна и требует большого количества исходных данных, а также принятия адекватных гипотез о поведении материала при пластическом деформировании. Появление первых критериев пластичности для анизотропных материалов связано с необходимостью описания поведения металлов с наведенной анизотропией, возникающей при обработке давлением, например при прокатке. Наиболее известным критерием такого вида является критерий Хилла, обобщающий критерий Мизеса в случае анизотропного материала. Обзор моделей для описания пластических свойств листового металла приведен в [2].

Следует отметить, что применение моделей, разработанных для металлов, к описанию композиционных материалов не всегда приводит к корректным результатам. Одна из причин состоит в том, что теоретические положения, справедливые для изотропных материалов, часто не выполняются для композиционных. Например, в теории малых упругопластических деформаций предполагается, что изменение объема материала при пластическом деформировании происходит линейно упруго. При этом механизм сдвигового деформирования, описываемый девиаторами напряжений и деформаций, не связан с механизмом объемного деформирования, который выражается шаровыми составляющими тензоров напряжений и деформаций. Распространение этого положения, нашедшего экспериментальное подтверждение для многих изотропных материалов, в случае анизотропного композиционного материала ничем не обосновано.

Перспективным подходом к описанию нелинейного деформирования композитов является применение эндохронной теории, или теории пластичности без поверхности текучести. В данной теории неупругое поведение материала описывается с учетом истории нагружения. Для этого используется внутреннее время — неубывающая скалярная величина, приращение которой связано с приращением деформаций. Ее можно рассматривать как аналог параметра Одквиста, применяемого в классической теории течения. Термины эндохронная теория и внутреннее время были предложены К. Валанисом в работе [3]. Эндохронная теория хорошо зарекомендовала себя при описании деформирования металлов, а также гетерогенных материалов таких, как наполненные полимеры, бетон, горные породы, грунт. С помощью эндохронной модели описывается образование остаточных деформаций [4, 5], деформирование при циклическом нагружении [6]. При этом деформированию анизотропных материалов посвящено небольшое число работ [7–10]. В частности, в [8] была предложена модель нелинейного деформирования слоистого композиционного материала при плоском напряженном состоянии. Предложенная модель позволяет описывать пластическое деформирование материалов широкого класса, но требует определения достаточно большого числа материальных параметров.

Модель ортотропного тела с независимыми механизмами деформирования. Учет особенностей деформирования конкретного класса материалов при построении модели сокращает область ее применения, но при этом позволяет

получить более простые определяющие соотношения с меньшим числом материальных параметров. При экспериментальном исследовании ряда материалов, армированных тканью, были получены близкие к нулю значения коэффициентов Пуассона. Это свидетельствует о слабой связи волокон различных направлений в материале. При анализе экспериментальных данных, относящихся к нелинейному деформированию, были получены дополнительные результаты, позволяющие принять следующую гипотезу. Для композиционных материалов с тканым наполнителем процесс деформирования можно представить как независимое деформирование материала при одноосном нагружении вдоль основы, одноосном нагружении вдоль утка и при чистом сдвиге в плоскости слоя. В моделях [8–10] предполагается, что эти механизмы деформирования взаимосвязаны. Одноосное нагружение вдоль основы описывается напряжением σ_{11} и деформацией ε_{11} , вдоль утка — напряжением σ_{22} и деформацией ε_{22} , при чистом сдвиге — напряжением σ_{12} и угловой деформацией γ_{12} . В работе [11] для подобного случая предложен потенциал удельной энергии упругой деформации для ортотропного тела.

Представим полную деформацию ε_{ij} в виде суммы двух компонент — упругой ε_{ij}^e и неупругой ε_{ij}^p . Приращение полной деформации есть сумма вида

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p.$$

Предположим также, что упругие компоненты деформации связаны и подчиняются закону Гука, а неупругие компоненты для каждого из механизмов деформирования независимы. Для случая плоского напряженного состояния запишем следующие выражения для приращений деформаций в направлении основы ε_{11} , в направлении утка ε_{22} и для угла сдвига в плоскости слоя γ_{12} :

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{11} &= \frac{d\sigma_{11}}{E_1} - \nu_{21} \frac{d\sigma_{22}}{E_2} + \frac{\alpha_1 d\xi_1}{f(\xi_1)} \frac{\sigma_{11}}{E_1}; \\ d\varepsilon_{22} &= \frac{d\sigma_{22}}{E_2} - \nu_{12} \frac{d\sigma_{11}}{E_1} + \frac{\alpha_2 d\xi_2}{f(\xi_2)} \frac{\sigma_{22}}{E_2}; \\ d\gamma_{12} &= \frac{d\sigma_{12}}{G_{12}} + \frac{\alpha_3 d\xi_3}{f(\xi_3)} \frac{\sigma_{12}}{G_{12}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — параметры модели; E_1, E_2, G_{12} — модули упругости в направлении основы, в направлении утка и модуль сдвига соответственно; ξ_1, ξ_2, ξ_3 — меры внутреннего времени. Приращение меры внутреннего времени определим как

$$d\xi_1 = |d\varepsilon_{11}|, \quad d\xi_2 = |d\varepsilon_{22}|, \quad d\xi_3 = |d\gamma_{12}|. \quad (2)$$

Для материальных функций принимаем выражение

$$f(\xi_i) = 1 + \beta_i \xi_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Здесь $\beta_i > 0$ — параметры модели. Равенства (1)–(3) — это определяющие соотношения для композита с тканым наполнителем при плоском напряженном состоянии.

При описании деформирования материалов соотношения (1) в общем случае целесообразно интегрировать численно. При построении вычислительного алгоритма запишем их в конечных разностях. Далее будем применять матричные формулировки. При реализации шагового нагружения зададим приращение напряжений, т. е. $\Delta\sigma = (\Delta\sigma_{11}, \Delta\sigma_{22}, \Delta\sigma_{12})^T$.

Начальные значения напряжений, деформаций, мер внутреннего времени и приращений внутреннего времени принимаем равными нулю. Введем матрицу упругих податливостей материала

$$S = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix},$$

а также вспомогательные матрицы и векторы следующего вида:

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 \end{pmatrix}, \quad K(\xi, \Delta\xi) = \begin{pmatrix} \frac{\Delta\xi_1}{f(\xi_1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta\xi_2}{f(\xi_2)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta\xi_3}{f(\xi_3)} \end{pmatrix},$$

$$\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)^T, \quad \varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12})^T.$$

На первом шаге приращения деформаций определяются по закону Гука. Далее используем итерационную процедуру. На первой итерации i -го шага определяем приращение деформаций по следующей формуле

$$\Delta\varepsilon_i^{(1)} = S\Delta\sigma + AK(\xi_{i-1}, \Delta\xi_{i-1})\sigma_i,$$

где $\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta\sigma$ — текущее значение напряжений.

Для k -й итерации записываем такое равенство

$$\Delta\varepsilon_i^{(k)} = S\Delta\sigma + AK(\xi_{i-1}, \Delta\xi_i^{(k-1)})\sigma_i,$$

где $\Delta\xi_i^{(k-1)}$ — приращение меры внутреннего времени, определенное на $(k-1)$ -й итерации по формуле (2). Условием окончания итерационного процесса является

ся расхождение между значениями приращений $\Delta\varepsilon_i^{(k)}$ и $\Delta\varepsilon_i^{(k-1)}$, не превышающее заранее заданного малого значения. При выполнении указанного условия принимаем

$$\Delta\varepsilon_i = \Delta\varepsilon_i^{(k)}, \quad \varepsilon_i = \varepsilon_{i-1} + \Delta\varepsilon_i, \quad \xi_i = \xi_{i-1} + \Delta\xi_i.$$

С помощью приведенных соотношений можно описать деформирование материала при плоском напряженном состоянии. Отметим, что модель, представленная в работе [8], предполагает определение 11 параметров. В определяющих соотношениях (1)–(3) содержится только шесть параметров, причем определяться они могут независимо для каждого из механизмов деформирования.

Моделирование поведения композитов. Применим предложенную модель для описания нелинейных свойств композиционных материалов с тканым наполнителем. Рассмотрим материал на основе кварцевой ткани. Эксперименты проводились на плоских образцах-лопатках, в которых волокна основы были направлены под некоторым углом к продольной оси образца. Этот угол в дальнейшем будем называть углом вырезки. На растяжение испытывались плоские образцы с углами вырезки 0, 15, 45, 75 и 90°. Испытания на сдвиг в плоскости армирования проводились на образцах Иосипеску в соответствии с требованиями [12]. Для упругих характеристик материала справедливы соотношения: $E_1/E_2 = 1,9$, $E_1/G_{12} = 4$. Диаграммы деформирования, полученные при сдвиге и растяжении образцов с углами вырезки 0 и 90°, для принятой модели являются базовыми и служат для определения материальных параметров α_i и β_i . Числовые значения параметров эндохронной модели найдены с помощью программы оптимизации. В программе реализован метод глобального перебора. Целевой функцией является минимум среднего отклонения, определяемого по формуле

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \varepsilon_i^{\text{э}} - \varepsilon_i^{\text{р}} \right|,$$

где n — количество экспериментальных точек; $\varepsilon_i^{\text{э}}$ — экспериментальное значение деформации; $\varepsilon_i^{\text{р}}$ — расчетное значение деформации.

В результате расчета по разработанной вычислительной программе получены следующие значения параметров: $\alpha_1 = 130$, $\alpha_2 = 170$, $\alpha_3 = 250$, $\beta_1 = 130$, $\beta_2 = 20$, $\beta_3 = 30$.

На рис. 1 приведены расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования образца с углом вырезки 0° при нагружении и последующей разгрузке. На диаграммах ε_1 , ε_2 — деформации вдоль оси образца и поперечном направлении. Числовые данные для напряжений и деформаций нормированы по предельным напряжениям и деформациям. Как следует из приведенных диаграмм, в материале возникают остаточные деформации при напряжениях, которые существенно ниже предела прочности.

Экспериментальные и теоретические диаграммы деформирования при сдвиге, а также при растяжении образцов с углами вырезки 0 и 90°, приведены на рис. 2. Здесь и далее используются следующие обозначения: σ , τ — нормальные и касательные напряжения; ε_1^ϕ , ε_2^ϕ — продольные и поперечные деформации образца с углом вырезки ϕ . Все числовые значения напряжений и деформаций нормированы по максимальным напряжениям и деформациям для образцов с углом вырезки 0°.

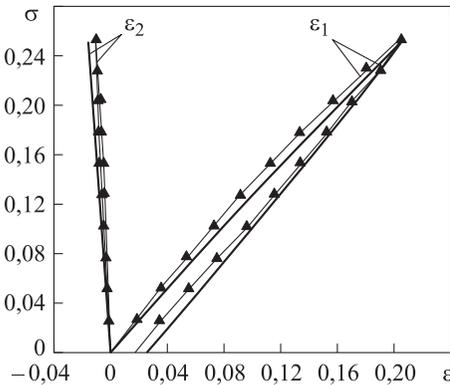


Рис. 1. Диаграммы деформирования образца с углом вырезки 0° (— — теория; -▲-▲- — эксперимент)

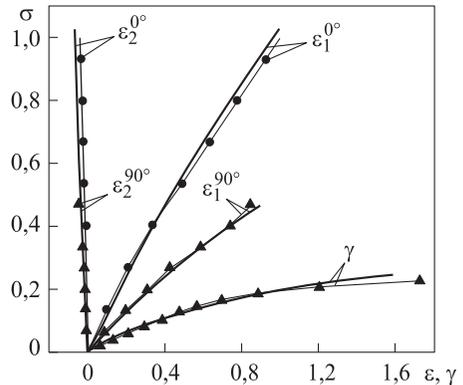


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные базовые диаграммы для материала на основе кварцевой ткани (— — теория; -▲-▲-, ●-●- — эксперимент)

Диаграммы деформирования образцов с углами вырезки 15, 45 и 75° являются контрольными и служат для оценки адекватности модели. Соответствующие экспериментальные и теоретические кривые приведены на рис. 3. Совпадение результатов эксперимента и расчета удовлетворительное.

Предложенную модель можно применить и для описания нелинейного деформирования углерод-керамического композиционного материала (УККМ) с тканевым армированием. На растяжение испытаны плоские образцы из УККМ с углами вырезки 0, 15, 30°, 45, 75 и 90°. Диаграмма деформирования при сдвиге получена при кручении тонкостенных трубчатых образцов. Волокна основы в трубчатых образцах располагались вдоль оси, волокна утка — в окружном направлении. Для упругих характеристик материала справедливы соотношения: $E_1 / E_2 = 1,07$, $E_1 / G_{12} = 6,5$. С помощью разработанной вычислительной программы были получены следующие значения материальных параметров: $\alpha_1 = 330$, $\alpha_2 = 310$, $\alpha_3 = 275$, $\beta_1 = 25$, $\beta_2 = 10$, $\beta_3 = 75$.

Как и для материала на основе кварцевой ткани, параметры определялись по диаграммам деформирования при сдвиге и при растяжении образцов с углами вырезки 0 и 90°. Расчетные и экспериментальные базовые диаграммы приведены на рис. 4. Контрольные диаграммы, полученные для образцов с углами

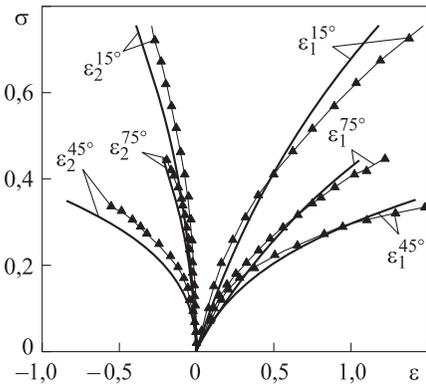


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования для материала на основе кварцевой ткани с различными углами вырезки (— — теория; -▲-▲- — эксперимент)

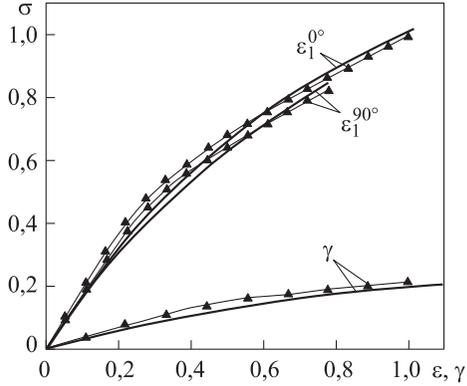


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные базовые диаграммы для УККМ (— — теория; -▲-▲- — эксперимент)

вырезки 15, 30, 45 и 75°, приведены на рис. 5. Числовые значения напряжений и деформаций также нормированы по максимальным напряжениям и деформациям для образцов УККМ с углом вырезки 0°.

Трубчатые образцы УККМ испытывались не только при одноосном, но и при сложном напряженном состояниях. Результаты этих испытаний также можно описать, используя предложенную модель. Проведены испытания при совместном действии осевой растягивающей нагрузки и крутящего момента. В процессе испытания отношение осевой силы и крутящего момента поддерживалось постоянным, что обеспечивало простое нагружение в рабочей части образца в соответствии с равенством $\sigma = k\tau$, где k — коэффициент пропорциональности. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования для этого вида нагружения при $k = 5,7$ приведены на рис. 6. Следует подчеркнуть,

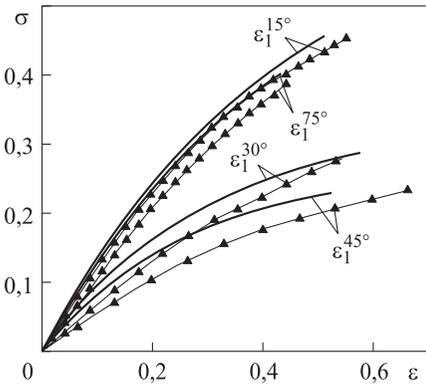


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования УККМ с различными углами вырезки (— — теория; -▲-▲- — эксперимент)

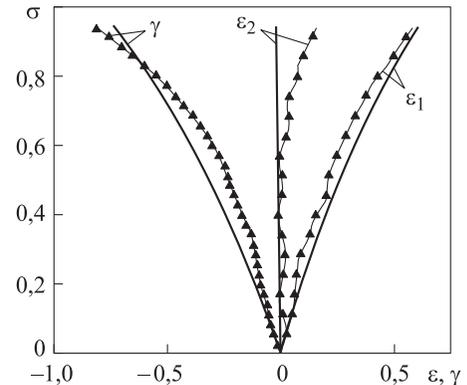


Рис. 6. Диаграммы деформирования УККМ при совместном растяжении и сдвиге (— — теория; -▲-▲- — эксперимент)

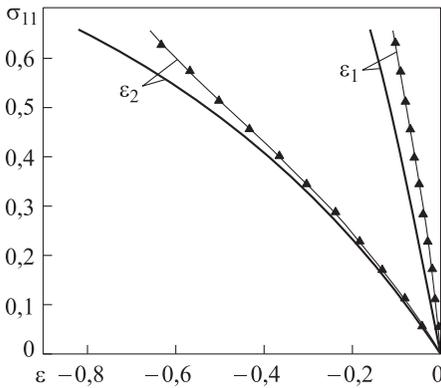


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования УККМ при двухосном сжатии (— — теория; -▲-▲- — эксперимент)

тальные диаграммы данного испытания.

Как следует из рис. 6 и 7, соответствие экспериментальных и теоретических результатов в целом удовлетворительное.

Выводы. Предложен вариант определяющих соотношений для композиционных материалов с тканым наполнителем, построенный на основе эндохронной теории пластичности ортотропного тела. При этом для описания деформирования при плоском напряженном состоянии использована экспериментально обоснованная гипотеза о независимости трех механизмов деформирования материала — механизмов деформирования при одноосном нагружении вдоль основы, утка и чистом сдвиге в плоскости армирования. Предложен также алгоритм численного интегрирования определяющих соотношений и численный способ идентификации материальных параметров. Соотношения удовлетворительным образом описывают экспериментально диаграммы, полученные при разных видах нагружения для композитов с тканым наполнителем. Предложенная модель деформирования композитов может быть применена для расчетов натурных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wu H.-C.* Continuum mechanics and plasticity. Chapman & Hall/CRC Press, 2005. 684 p.
2. *Tong W.* A plane stress anisotropic plastic flow theory for orthotropic sheet metals // International Journal of Plasticity. 2006. Vol. 22. No. 3. P. 497–535.
3. *Valanis K.C.* A theory of viscoplasticity without a yield surface // Arch. of Mech. 1971. Vol. 23. No. 4. P. 517–551.
4. *Бондарь В.С., Данишин В.В.* Теория неупругости без поверхности нагружения и ассоциированного закона течения // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 1. С. 43–57. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.04
URL: http://vestnik.pstu.ru/mechanics/archives/?id=&folder_id=4460

5. *Кадашевич Ю.И., Помыткин С.П.* Исследование одноосного и двуосного нагружения разупрочняющихся материалов по эндохронной теории неупругости // Вестник СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. 2012. № 1(26). С. 110–115. DOI:10.14498/vsgtu1007 URL: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=vsgtu&paperid=1007&option_lang=rus
6. *Kucher N.K.* A version of the endochronic theory of plasticity to describe the asymmetrical cyclic loading of materials // *Strength of Materials*. 1999. Vol. 31. No. 13. P. 13–17. DOI: 10.1007/BF02509735 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02509735>
7. *Pindera M.J., Herakovich C.T.* An endochronic model for the response of unidirectional composites under off-axis tensile load // *Mechanics of Composite Materials. Recent advances*. New York: Pergamon Press, 1983. P. 367–381.
8. *Зиновьев П.А., Сарбаев Б.С.* Эндохронная теория неупругого деформирования волокнистых композитов // *Механика композитных материалов*. 1985. № 3. С. 423–430.
9. *Сарбаев Б.С.* Эндохронная теория пластичности анизотропных сред // *Известия РАН. Механика твердого тела*. 1991. № 2. С. 106–116.
10. *Sarbayev B.S.* An endochronic theory of plastic deformation of fibrous composite materials // *Computational Materials Science*. 1995. Vol. 4. No. 3. P. 220–232. DOI: 10.1016/0927-0256(95)00039-S URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092702569500039S>
11. *Бобров А.В., Сарбаев Б.С., Ширшов Ю.Ю.* Нелинейное деформирование углерод-карбидного композиционного материала // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2014. № 4. С. 42–49.
12. *ASTM D 5379/D 5379M–98.* Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method.

Сарбаев Борис Сафиулович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Барышев Антон Николаевич — инженер лаборатории композитов НИИ специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сарбаев Б.С., Барышев А.Н. Расчет диаграмм деформирования композиционных материалов с тканым наполнителем посредством эндохронной теории пластичности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 4. С. 65–75. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-65-75

CALCULATION OF STRESS-STRAIN CURVES OF FABRIC REINFORCED COMPOSITE MATERIALS USING THE ENDOCHRONIC THEORY OF PLASTICITY

B.S. Sarbaev

A.N. Baryshev

abaryshev@inbox.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article gives a brief overview of mathematical models of orthotropic materials' nonlinear deformation. We propose an endochronic model of nonlinear deformation of fabric reinforced composite material in plane stress state. Experimental results made it possible to find three unrelated deformation mechanisms — deformation in warp direction, deformation in weft direction and in-plane shear. We give mathematical expressions and describe procedure of calculating model parameters. The study also shows the simulation results of nonlinear deformation of different fabric reinforced composites

Keywords

Composite material, fabric reinforcement, stress-strain curve, endochronic theory of plasticity, physical nonlinearity, parameter identification, plane stress state

REFERENCES

- [1] Wu H.-C. Continuum mechanics and plasticity. Chapman & Hall/CRC Press, 2005. 684 p.
- [2] Tong W. A plane stress anisotropic plastic flow theory for orthotropic sheet metals. *International Journal of Plasticity*, 2006, vol. 22, no. 3, pp. 497–535.
- [3] Valanis K.C. A theory of viscoplasticity without a yield surface. *Arch. of Mech.*, 1971, vol. 23, no. 4, pp. 517–551.
- [4] Bondar' V.S., Danshin V.V. Theory of inelasticity without loading surface and associated flow rule. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin], 2015, no. 1, pp. 43–57 (in Russ.). DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.04
Available at: http://vestnik.pstu.ru/mechanics/archives/?id=&folder_id=4460
- [5] Kadashevich Yu.I., Pomytkin S.P. Investigation of uniaxial and biaxial loadings of softening materials in endochronic theory of inelasticity. *Vestnik SamGTU. Ser. Fiz.-mat. Nauki*, 2012, no. 1(26), pp. 110–115 (in Russ.). DOI: 10.14498/vsgtu1007
Available at: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=vsgtu&paperid=1007&option_lang=rus
- [6] Kucher N.K. A version of the endochronic theory of plasticity to describe the asymmetrical cyclic loading of materials. *Strength of Materials*, 1999, vol. 31, no. 13, pp. 13–17.
DOI: 10.1007/BF02509735
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02509735>
- [7] Pindera M.J., Herakovich C.T. An endochronic model for the response of unidirectional composites under off-axis tensile load. In: *Mechanics of Composite Materials. Recent advances*. New York, Pergamon Press, 1983. Pp. 367–381.
- [8] Zinov'ev P.A., Sarbaev B.S. Endochronic theory of fiber composite non-elastic deformation. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1985, no. 3, pp. 423–430 (in Russ.).

[9] Sarbaev B.S. Endochronic theory of anisotropic continuum plasticity. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 1991, no. 2, pp. 106–116 (in Russ.).

[10] Sarbayev B.S. An endochronic theory of plastic deformation of fibrous composite materials. *Computational Materials Science*, 1995, vol. 4, no. 3, pp. 220–232.

DOI: 10.1016/0927-0256(95)00039-S

Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092702569500039S>

[11] Bobrov A.V., Sarbaev B.S., Shirshov Yu.Yu. Nonlinear deformation of carbide-derived carbon composite material. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2014, vol. 43, no. 4, pp. 287–293. DOI: 10.3103/S1052618814040025

Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1052618814040025>

[12] ASTM D 5379/D 5379M–98. Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method.

Sarbaev B.S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of Space and Launch Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Baryshev A.N. — engineer of Laboratory of Composites, Scientific Research Institute of Special Machinery, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Sarbaev B.S., Baryshev A.N. Calculation of Stress-Strain Curves of Fabric Reinforced Composite Materials using the Endochronic Theory of Plasticity. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 4, pp. 65–75. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-65-75