

УДК 519.63:681.51:539.5

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полатов А.М.

Национальный Университет Узбекистана, г. Ташкент, Республика Узбекистан

РЕЗЮМЕ

В работе на основе упрощенной деформационной теории пластичности, предложенной проф. Б.Е.Победря, и МКЭ разработаны компьютерное моделирование и специализированный программный комплекс по расчету физически нелинейного деформирования волокнистых композитных материалов. Исследовано влияние объемного содержания и механических параметров волокна и матрицы на упругопластическое деформированное состояние волокнистых композитных материалов. Определен диапазон значений соотношения волокна и матрицы, в пределах которого обеспечивается их эффективная совместная работа. Изучена концентрация напряжений в конструкциях, ослабленных различного рода концентраторами напряжений.

Ключевые слова: волокнистые композиты; компьютерное моделирование; пластичность; интенсивность напряжения; МКЭ; программный комплекс

COMPUTER MODELING OF ELASTIC-PLASTIC FIBER MATERIALS

Polatov A.M.

National University of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

SUMMARY

In paper on the basis of the simplified deformation theory of the plasticity offered by prof. B.E. Pobedrya, and FEM the computer modeling and specialized software by calculation of physically nonlinear deformation of fibrous composite materials are developed. Influence of the volume content and mechanical parameters of fiber and matrix on the elastic-plastic deformed condition of fibrous composite materials is investigated. The range of ratio values of the fiber and the matrix where ensured their effective joint functioning is determined. The concentration of stresses in constructions weakened by various types of stress concentrators is studied.

Key words: fibrous composites; computer modeling; plasticity; intensity of stresses; FEM; software

ВВЕДЕНИЕ

В современных технологиях широкое распространение получили композитные материалы, армированные высокопрочными и высокомодульными непрерывными волокнами, несущими основную нагрузку, при этом, напряжение волокнам передаётся матрицей. Механическое поведение композита определяется свойствами матрицы и армирующих элементов, а также прочностью соединения между ними. Широкое применение материалы получили практически во всех

отраслях промышленности, а именно: в машиностроении, судостроении, автомобилестроении, авиастроении и т.д. Механические свойства определяются не только свойствами самих волокон, но и их ориентацией, объёмным содержанием, способностью матрицы передавать волокнам приложенную нагрузку. Композиты могут обладать высокой удельной прочностью и жесткостью, что позволяет создавать принципиально новые пространственные элементы конструкций. Исследование процессов деформирования конструкций, выполненных из композитных материалов, в расчетах на прочность и надежность элементов является актуальным для решения задач инженерной практики [1].

Часто при создании различных композитных элементов конструкций по конструкционным или технологическим соображениям необходимо нарушить их целостность, т.е. включить различного рода полости, отверстия или вырезы. Такие включения становятся своего рода концентраторами напряжений. В непосредственной близости от концентраторов возникают области с повышенными напряжениями, которые существенно влияют на прочность и несущую способность конструкций. В связи с этим исследование проблемы прочности конструкций при наличии областей с повышенной концентрацией напряжений является чрезвычайно важным при эксплуатации сооружений [2]. Изучение распределения напряжений и деформаций в композите дает возможность определить наличие зон пластичности, их месторасположение, выявить форму, размеры, а также получить количественную характеристику напряженного состояния. Оценка поведения материалов при деформировании позволяет более точно и рационально проектировать конструкции. В связи с этим исследование влияния различных типов концентраторов на поведение композитных материалов и поиск способов снижения концентрации напряжений является одним из главных направлений современной механики.

Одним из способов, применяемых к решению задач деформирования волокнистых композитов, является сведение неоднородной по составу среды к эквивалентной ей однородной среде с эффективными механическими параметрами. Это позволяет достаточно точно описать квазистатическое состояние конструкций, все геометрические размеры которых существенно превышают характерный размер структурной неоднородности исследуемого композита. При этом также учитывается фактор структурной неоднородности материалов, который существенно влияет на поведение элементов конструкций [3,4]. Такой подход создает возможность посредством компьютерного моделирования решить задачу нелинейного деформирования волокнистых композитных материалов и исследовать напряженно-деформированное состояние конструкции.

Компьютерное моделирование позволяет: по заранее заданным физическим свойствам проектируемых материалов определить необходимые соотношения и механические параметры волокна и матрицы волокнистых композитов; исследовать влияние механических и геометрических характеристик волокнистых композитов на прочность конструкций; визуализировать результаты расчета.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Рассматривается упругопластическая среда, которая представляет собой неоднородный сплошной материал, состоящий из двух компонент: армирующих

элементов и матрицы (или связующего), которая обеспечивает совместную работу армирующих элементов.

При исследовании армированного композита, жесткость армирующих элементов которого существенно превышает жесткость связующего, появляется возможность использования упрощенной деформационной теории пластичности для трансверсально-изотропных сред, предложенной в работе [5]. Упрощенная теория позволяет применить теорию малых упругопластических деформаций для решения конкретных прикладных задач [6]. В основу упрощения положено предположение о том, что при простом растяжении композита в направлении оси трансверсальной изотропии и направлении, перпендикулярном к ней, пластических деформаций не возникает. Применение упрощенной теории основывается на том, что у рассматриваемого армированного композита жесткость армирующих элементов существенно превышает жесткость связующего. Вследствие этого интенсивность напряжений и деформаций определяется отдельно как по главной оси трансверсальной изотропии (Q_u, q_u), так и по перпендикулярно расположенной плоскости (P_u, p_u). Предполагается, что ось трансверсальной изотропии совпадает с осью OZ .

Краевая задача теории упругости для анизотропных тел состоит из уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} + X_i = 0, \quad x_i \in V \quad (1)$$

обобщенного закона Гука

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2)$$

соотношений Коши

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

и краевых условий

$$u_i|_{\Sigma_1} = u_i^o, \quad x_i \in \Sigma_1 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} n_j|_{\Sigma_2} = S_i^o, \quad x_i \in \Sigma_2, \quad (5)$$

где: u_i – компоненты вектора перемещений; X_i, S_i – объёмные и поверхностные силы; Σ_1, Σ_2 – части поверхности Σ объёма V ; n_j – внешняя нормаль к поверхности Σ_2 объёма V ; C_{ijkl} – тензор упругих констант.

Определяющее соотношение (2), в случае деформационной теории пластичности трансверсально-изотропных сред, заменяется соотношением, которое представляется в форме разложения тензора напряжений на шаровую и девиаторную части [5]

$$\sigma_{ij} = \tilde{\sigma} (\delta_{ij} - \delta_{i3} \delta_{j3}) + \sigma_{33} \delta_{i3} \delta_{j3} + \frac{P_u}{P_u} p_{ij} + \frac{Q_u}{Q_u} q_{ij} \quad (6)$$

где

$$\tilde{\sigma} = (\lambda_2 + \lambda_4) \tilde{\theta} + \lambda_3 \varepsilon_{33}, \quad \sigma_{33} = \lambda_3 \tilde{\theta} + \lambda_1 \varepsilon_{33}, \quad (7)$$

$$P_u = 2\lambda_4 (1 - \pi) p_u, \quad Q_u = 2\lambda_5 (1 - \chi) q_u \quad (8)$$

В соотношениях (6-8) приняты следующие обозначения:

λ_i – упругие постоянные трансверсально-изотропных материалов [5], π, χ – экспериментально определяемые функции,

$$p_u = \sqrt{\frac{1}{2} p_{ij} p_{ij}}, \quad q_u = \sqrt{\frac{1}{2} q_{ij} q_{ij}}, \quad P_u = \sqrt{\frac{1}{2} P_{ij} P_{ij}}, \quad Q_u = \sqrt{\frac{1}{2} Q_{ij} Q_{ij}} \quad (9)$$

где

$$p_{ij} = \varepsilon_{ij} + \frac{\tilde{\theta}}{2} (\delta_{i3} \delta_{j3} - \delta_{ij}) + \varepsilon_{33} \delta_{i3} \delta_{j3} - (\varepsilon_{i3} \delta_{j3} + \varepsilon_{3j} \delta_{i3})$$

$$q_{ij} = \varepsilon_{i3} \delta_{j3} + \varepsilon_{3j} \delta_{i3} - 2\varepsilon_{33} \delta_{i3} \delta_{j3}, \quad \tilde{\theta} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} \quad (10)$$

$$P_{ij} = \sigma_{ij} + \tilde{\sigma} (\delta_{i3} \delta_{j3} - \delta_{ij}) + \sigma_{33} \delta_{i3} \delta_{j3} - (\sigma_{i3} \delta_{j3} + \sigma_{3j} \delta_{i3})$$

$$Q_{ij} = \sigma_{i3} \delta_{j3} + \sigma_{3j} \delta_{i3} - 2\sigma_{33} \delta_{i3} \delta_{j3}, \quad \tilde{\sigma} = (\sigma_{11} + \sigma_{22}) / 2. \quad (11)$$

Для упрощенной трансверсально-изотропной теории пластичности соотношения между инвариантами тензоров напряжений и деформаций записывается в виде [5]

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\sigma} &= (\lambda_2 + \lambda_4) \tilde{\theta} + \lambda_3 \varepsilon_{33} \\ \sigma_{33} &= \lambda_3 \tilde{\theta} + \lambda_1 \varepsilon_{33} \\ P &= P(p), \quad Q = Q(q) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Здесь функции P и Q имеют вид

$$P = 2\lambda_4 (1 - \pi(p)) p, \quad Q = 2\lambda_5 (1 - \chi(q)) q \quad (13)$$

где $\pi(p)$ и $\chi(q)$ – функции пластичности типа Ильюшина, значения которых в упругой зоне равны нулю.

Механические параметры трансверсально-изотропного материала связаны с модулями λ_i следующими соотношениями

$$\lambda_1 = E'(1 - \nu) / l; \quad \lambda_2 = E(\nu + kv'^2) / [(1 + \nu) / l]; \quad \lambda_3 = Ev' / l;$$

$$\lambda_4 = G = E / [2(1 + \nu)]; \quad \lambda_5 = G'; \quad l = 1 - \nu - 2v'^2 k; \quad k = E / E'$$

Здесь ν и ν' – коэффициенты Пуассона матрицы и волокна, E и E' – модули упругости матрицы и волокна.

Задача решается на основе метода конечных элементов в перемещениях [7,8].

2. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Вычислительный алгоритм решения задачи включает следующие этапы:

- построение конечноэлементной модели, рассматриваемого тела;
- вычисление эффективных механических параметров композитов;
- формирование системы линейных уравнений;
- решения системы уравнений;
- определения компонент упругого напряженного состояния;
- решение нелинейной задачи;
- вычисление результирующих параметров;
- визуализация результатов расчета.

Вышеописанные этапы алгоритма соответствуют расчетной схеме метода конечных элементов и необходимы для автоматизации процессов обработки, упаковки и хранения большого массива данных, используемых в процессе вычисления. Кроме того, такой подход позволяет свести решение поставленной задачи к поэтапному решению ряда самостоятельных задач.

Для исследования нелинейного деформирования волокнистых элементов конструкций разработан специализированный программный комплекс АРПЭК, состоящий из набора функционально связанных программных модулей: АПКЭМ - автоматизация построения конечноэлементной дискретной модели, НЕРПЭК - построения и решения разрешающей системы нелинейных уравнений, ТАСВИР - визуализация результатов расчета. Кроме того, проработаны способы взаимодействия между программными модулями. Модули могут легко компоноваться между собой, а также быстро настраиваться к конкретным условиям задачи, что существенно сокращает сроки разработки программного комплекса. Модульная структура комплекса позволяет развивать и совершенствовать отдельные модули, и использовать их на различных этапах решения задачи. Такая структура комплекса позволяет автоматизировать процесс вычислений, начиная с постановки задачи и кончая визуализацией результатов расчета.

Моделирование нелинейного поведения композиционных материалов, дает возможность:

- проектировать новые композитные материалы;
- исследовать поведение композитов;
- визуализировать результаты компьютерного моделирования.

Для апробации вычислительного алгоритма и программного комплекса результаты решения тестовых задач сверялись с ранее известными результатами [9,10], а также с результатами, полученными посредством пакета COSMOS/M [11].

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Задача 1.

Исследование напряженно-деформированного состояния трехмерных композитных материалов с конструкционными особенностями позволяет получить качественные и количественные характеристики прочностного расчета различных пространственных элементов конструкций.

Для апробации разработанного алгоритма и программного комплекса, а также проверки адекватности однородной модели была решена упругая задача об одноосном растяжении квадратной пластинки (2см*2см) из волокнистого композитного материала бороалюминий Д-16 с круговым отверстием (R=0.4 см) в центре. Материалом для матрицы является алюминиевый сплав Д16 с упругими постоянными: $E=7.1 \cdot 10^4$ МПа, $\mu=0.32$. Для борного волокна: $E'=39.7 \cdot 10^4$ МПа, $\mu'=0.21$ [12]. В качестве эффективных механических параметров для бороалюминия использованы следующие значения [13]: $E=160 \cdot 10^3$ МПа, $\mu=0.32$, $G=65 \cdot 10^3$ МПа, $E'=260 \cdot 10^3$ МПа, $\mu'=0.254$, $G'=51 \cdot 10^3$ МПа.

Пластина с 60% содержанием волокна, растягивается по направлению волокон равномерно-распределенной нагрузкой равной 10 МПа. Распределение параметров напряженно-деформированного состояния сравнивались с результатами, полученными основе решения вышеописанной задачи по волокнистой модели в [13]. На рис.1 представлена волокнистая конструкция бороалюминия.

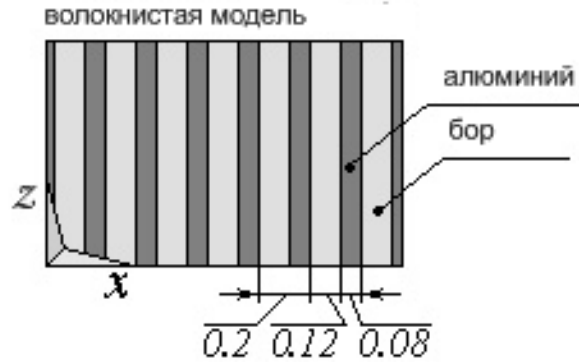


Рис.1. Волокнистая конструкция бороалюминия [13].

Сравнение результатов расчета напряженного состояния по однородной и волокнистой модели согласуются между собой. В частности, на рис.2 представлены поля напряжений σ_{xx} и τ_{xz} в окрестности отверстия, которые являются наиболее характерными параметрами для анализа и сопоставления.

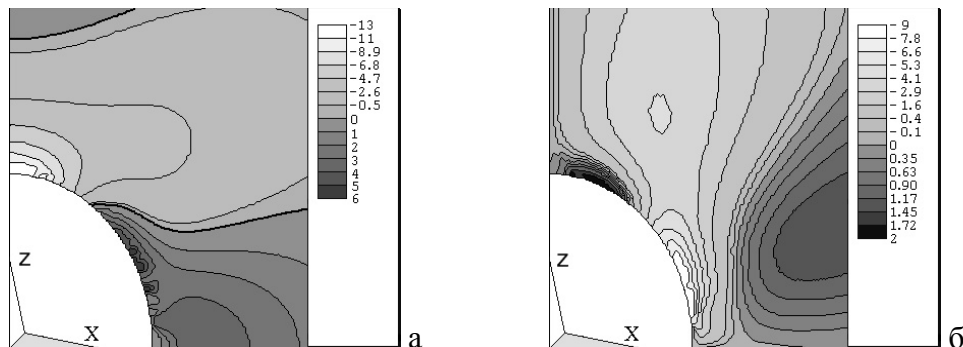


Рис.2. Распределение полей напряжения σ_{xx} (а) и τ_{xz} (б) [13].

Совпадение результатов расчета по волокнистой и однородной модели с эффективными механическими параметрами позволяет утверждать, что однородная модель адекватна исходной постановке задачи.

С целью дальнейшей апробации программного комплекса, в трехмерной постановке рассматривается упругопластическая задача об одноосном равномерно-распределенном растяжении ($P_{zz}=85$ МПа) прямоугольной пластины из волокнистого композита (высота – 1 см, ширина – 0.5 см, толщина – 0.1 см) с изолированным круговым отверстием (радиус – 0.1 см) в центре конструкции. Волокна материала расположены параллельно оси OZ.

В качестве волокнистого композита рассматривается бороалюминий. Материал матрицы из алюминиевого сплава Д16 с упругими постоянными $E=7.1 \cdot 10^4$ МПа, $\mu=0.32$, коэффициентом упрочнения $\bar{\lambda}=0.5$ и пределом упругости $\sigma_s=2.13 \cdot 10^2$ МПа. Для борного волокна $E'=39.7 \cdot 10^4$ МПа, $\mu'=0.21$, предел прочности при растяжении $\sigma'_s=2.5 \cdot 10^3$ МПа [13]. Объемное содержание волокна составляет 35%. Для этого случая эффективные механические характеристики имеют следующие значения: $E=99.64 \cdot 10^3$ МПа, $G=43.11 \cdot 10^3$ МПа, $\mu=0.1558$, $E'=185.32 \cdot 10^3$ МПа, $\mu'=0.2762$; $G'=38.02 \cdot 10^3$ МПа.

Изучаются упругие и пластические характеристики напряженно-деформированного состояния. Повышенные растягивающие значения компоненты нормальных напряжений σ_{xx} (рис.3а) сконцентрированы по бокам

контура отверстия. Нулевая зона формирует полосу подобно букве "X" с центром, совпадающим с центром отверстия.

Исследование полей распределения компоненты нормальных напряжений σ_{zz} (рис.3.б) показывает, что максимальные растягивающие напряжения концентрируются по боковым частям, а незначительные сжимающие – по верхней и нижней части отверстия.

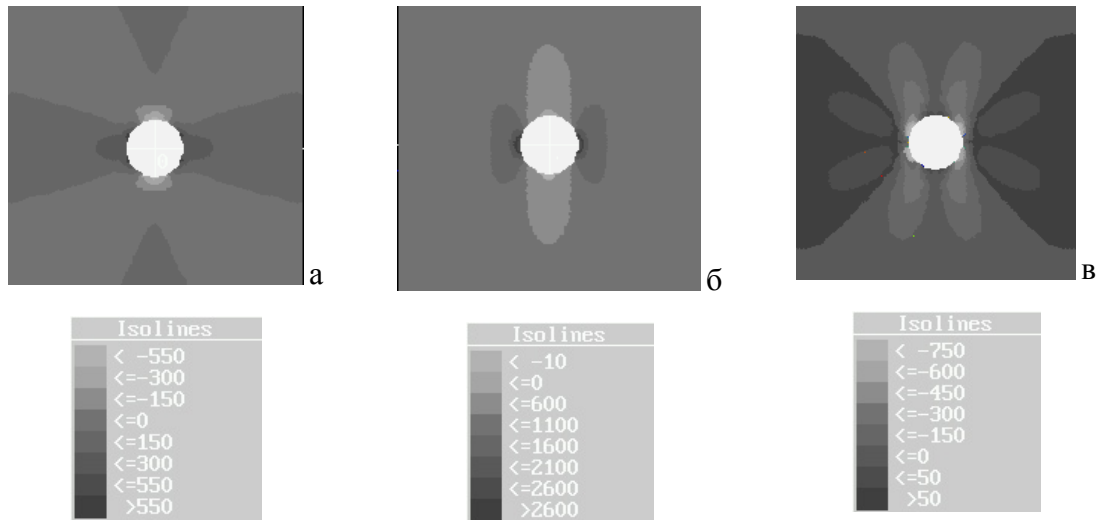


Рис.3. Распределение значений σ_{xx} (а) , σ_{zz} (б) и τ_{xz} (в).

Картина распределения касательной напряжений τ_{xz} приведена на рис.3.в. Отрицательные значения напряжений сконцентрированы непосредственно у боковой части контура отверстия. Далее формируется нулевая зона, вслед за которой появляется область в форме "ушей" с положительными значениями. Интересно отметить, что у контура отверстия в верхней и нижней части формируются незначительные по размерам зоны с положительными значениями τ_{xz} .

На рис.4.а,б представлены распределения по плоскости изотропии значений интенсивности деформаций p_u и напряжений P_u . Эти значения характеризуют деформацию матрицы материала, то есть алюминиевого сплава. Максимальные значения интенсивности деформаций p_u концентрируются по верхней и нижней части отверстия (рис.4.а). Аналогичная картина распределения по значениям интенсивности напряжений P_u представлена на рис.4.б.

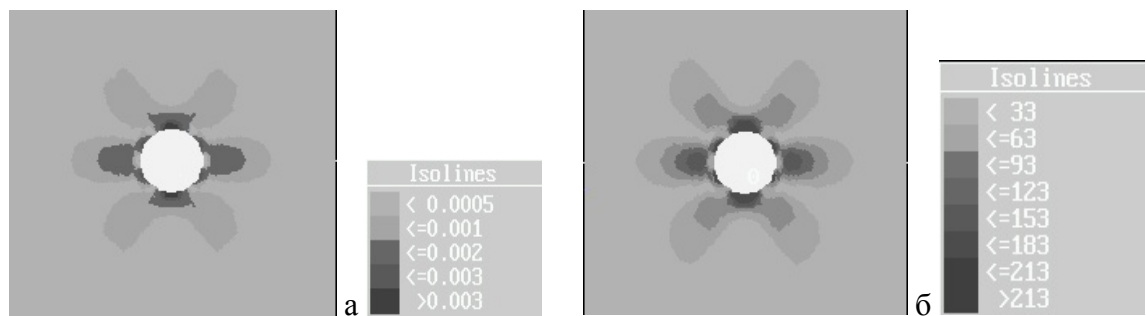


Рис.4. Распределение интенсивности деформаций p_u (а) и напряжений P_u (б).

Распределения значений интенсивности деформаций q_u и напряжений Q_u по направлению главной оси изотропии представлено на рис.5.а,б. Эти значения

характеризуют деформацию борного волокна материала. Максимальные значения в обоих случаях концентрируются на боках отверстия, вместе с тем, в окрестностях горизонтального диаметрального сечения отверстия выявлены пониженные значения интенсивностей q_u и Q_u . Области с повышенными значениями локализованы и представляют собой вертикальные полосы у боков отверстия.



Рис.5. Распределение интенсивности деформаций q_u (а) и напряжений Q_u (б).

На основе вышеприведенных исследований установлено, что наличие отверстия приводит к перераспределению напряженного состояния в окрестности концентратора. Нагрузку на себя принимают волокна, находящиеся непосредственно у боков отверстия, конфигурация которых сгибаются внутрь конструкции. За счет сужения центральной части пластины пластическим деформациям в основном подвергается часть матрицы волокнистого композита, расположенная в окрестности верхней и нижней частей отверстия.

3.2. Задача 2.

В трехмерной постановке рассматриваются упругопластические задачи об одноосном равномерно-распределенном растяжении ($P_{zz}=300$ МПа) прямоугольной пластины (высота – 1 см, ширина – 0.5 см, толщина – 0.1 см) с:

- а) центральной прямолинейной изолированной трещиной;
- б) боковыми прямолинейными трещинами.

Волокна композиционного материала расположены параллельно оси OZ. В качестве волокнистого композита используется бороалюминий. Материал матрицы из алюминиевого сплава Д16. Объемные доли бора и дюралюминия в материале соотносятся как 3:2.

Рассматривается задача об одноосном растяжении пластины с горизонтально расположенной центральной изолированной прямолинейной трещиной длиной $l=0.1$ см в центре. На рис.6 приведены поля распределения значений интенсивности деформаций p_u и q_u для упругой и упругопластической задачи на деформированной конечноэлементной сетке. В случае упругой задачи (рис.6а) повышенные значения интенсивности деформации p_u располагаются в окрестности трещины, причем максимальные значения наблюдаются в центра берегов трещины. В окрестностях вершин трещин так же наблюдаются повышенные значения интенсивности деформаций, однако их значения в 1.52 раза меньше. Для исследования напряженно-деформированного состояния пластины в окрестностях трещины в Табл.1 приводятся значения компонент напряжений и обобщенные значения интенсивности деформаций p_u и напряжений P_u по плоскости изотропии, перпендикулярной оси трансверсальной изотропии

OZ. Анализ решений упругопластической задачи (рис.6.в) показывает, что пластическая зона формируется в центре трещины.

Максимальные значения интенсивности деформаций q_u концентрируются в окрестностях вершин трещины, но не достигают предела прочности при растяжении волокон заданной нагрузкой P_{zz} (рис.6.б).

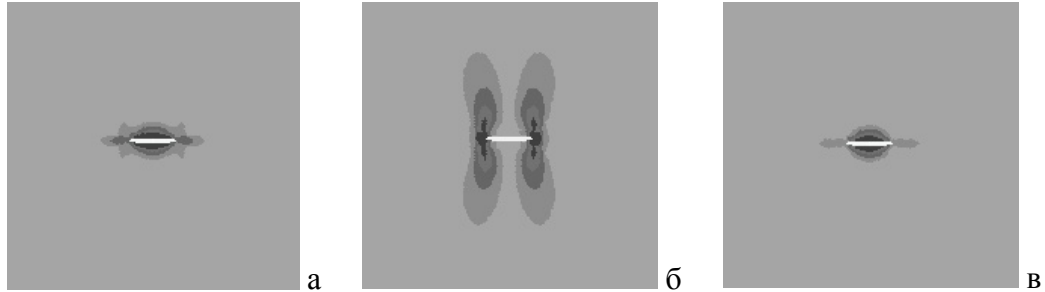
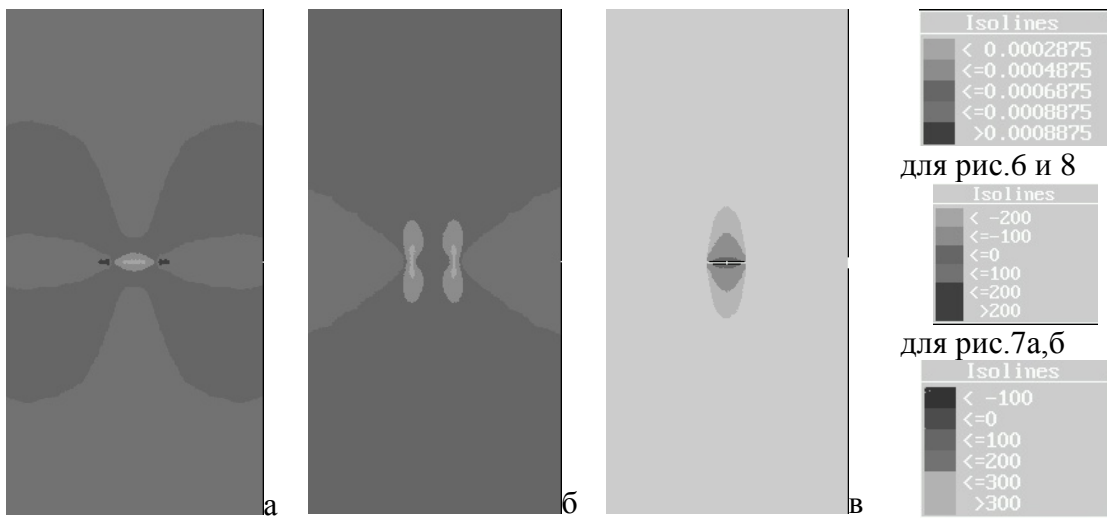


Рис.6. Интенсивность деформации по p_u (а) и q_u (б)(упруг.), по p_u (в) (пласт.)

Таблица 1.

Точка	Состояние	p_u	P_u [МПа]	τ_{xz} [МПа]	σ_{xx} [МПа]	σ_{zz} [МПа]
в центре берегов трещины	упругое	0.001308	158.6	-16.29	-274.8	-17.2
	пластич.	0.001209	127.0	-19.48	-234.3	-11.1
в окрестности и вершины	упругое	0.000620	75.2	-8.10	282.0	977.4
	пластич.	0.000390	47.2	-15.89	188.2	805.4

На рис.7 приведены поля распределения значений компонент напряжений σ_{xx} , τ_{xz} и σ_{zz} . Максимальные растягивающие значения компоненты σ_{xx} (рис.7а) наблюдаются в окрестностях вершин трещины.



для рис.6 и 8

для рис.7а,б

для рис.7в

Рис.7. Распределение значений компонент напряжений σ_{xx} (а), τ_{xz} (б) , σ_{zz} (в).

Сжимающие напряжения, формируя область в форме эллипса с центром на середине трещины, концентрируются в окрестностях берегов трещины. Положительные значения касательных напряжений τ_{xz} (рис.7б) концентрируются в окрестностях вершин трещины и распространяются в направлении боков пластины, что соответствует изгибу боковых областей. Отрицательные напряжения концентрируются в окрестности вершин трещины. Наконец, незначительные сжимающие значения σ_{zz} (рис.7в) наблюдаются у кромки берегов трещины, а остальная часть пластины находится под влиянием заданных растягивающих нагрузок. Количественная картина напряженно-деформированного состояния приведена в Табл.2. Обобщая вышеизложенные факты, можно заключить, что если прямолинейная трещина расположена перпендикулярно направлению волокон композиционного материала, то она формирует зону пластических деформаций по p_u в окрестностях берегов трещины.

Таблица 2.

Результаты	p_u	P_u [МПа]	τ_{xz} [МПа]	σ_{xx} [МПа]	σ_{zz} [МПа]
упругие	0.001684	204.2	-106.5	450.8	767.7
пластические	0.001468	142.8	-174.0	361.8	769.4

Далее рассматривается задача об одноосном растяжении пластины с горизонтальными прямолинейными трещинами ($l=0.05$ см), расположенными по бокам пластины. На рис.8а,б приведены распределения полей интенсивности деформаций p_u и q_u для упругой задачи. Если обратить внимание на конфигурацию деформированной конечноэлементной сетки в окрестностях боковых трещин, то можно отметить выпучивание боков конструкции вследствие раскрытия берегов трещин. Максимальные значения интенсивности деформаций наблюдаются в окрестностях вершин трещины, однако, если по p_u повышенные значения наблюдаются в области между трещинами, то по q_u – поля распространяются вертикально. Анализ состояния упругопластического деформирования (рис.8.в) указывает на то, что пластические деформации формируются у вершины трещин, а при дальнейшем увеличении внешней нагрузки происходит объединение пластических областей, что может привести к потере прочностных характеристик конструкции.

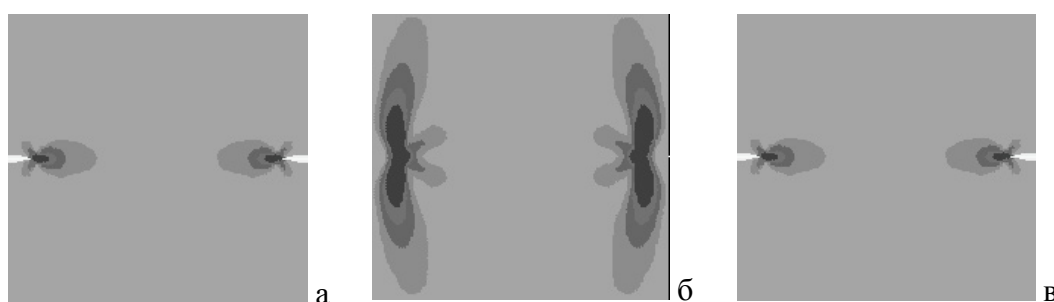


Рис.8. Интенсивность деформации p_u (а)и q_u (б) (упругость), по p_u (в) (пластичность).

Количественная характеристика напряженно-деформированного состояния одноосного растяжения пластины с боковыми трещинами в окрестностях вершины трещины приведена в Табл.2. Интересно отметить, что при решении упругопластической задачи в окрестностях вершины трещин значения касательной компоненты напряжений τ_{xz} в 1.63 раза больше, чем в упругой

задаче. Это объясняется тем, что пластическая область, образованная в окрестностях вершины трещин, благоприятствует дальнейшему раскрытию берегов трещин.

3.3. Задача 3.

Для исследования значений обобщенных параметров напряженно-деформированного состояния волокнистых композиционных материалов необходимо определить эффективные механические характеристики материала. Вычисление эффективных характеристик однонаправленных волокнистых композитов осуществляется на основе выражений, полученных посредством асимптотических методов расчета композиционных материалов [14]. Данная методика расчета дает возможность учитывать радиальное взаимодействие компонент, вызванных различием коэффициентов Пуассона матрицы и волокна.

В Табл.3 приведены значения эффективных параметров однонаправленного композита бороалюминия для различных значений объемного содержания волокна в композите. В качестве материала матрицы используется алюминиевый сплав Д16. Для исследования влияния объемного содержания волокна в композиционном материале проведен вычислительный эксперимент, при варьировании значений объемного содержания волокна в композите.

В трехмерной постановке рассматривается упругопластическая задача об одноосном равномерно-распределенном растяжении по направлению волокон ($P_{zz}=85$ МПа) прямоугольной пластины с изолированным отверстием в центре. Размеры пластины: высота – 1 см, ширина – 0.5 см, толщина – 0.1 см, радиус отверстия 0.1 см. Волокна материала расположены параллельно оси OZ. В качестве волокнистого композита используется бороалюминий с различным содержанием волокна, эффективные механические параметры которых приведены в Табл.3.

Таблица 3.

ν	E' [МПа]	E [МПа]	G' [МПа]	G [МПа]	μ'	μ
25%	$1.5271 \cdot 10^5$	$0.8934 \cdot 10^5$	$0.3401 \cdot 10^5$	$0.3720 \cdot 10^5$	0.2881	0.2011
35%	$1.8532 \cdot 10^5$	$0.9964 \cdot 10^5$	$0.3802 \cdot 10^5$	$0.4311 \cdot 10^5$	0.2762	0.1558
45%	$2.1797 \cdot 10^5$	$1.1261 \cdot 10^5$	$0.4312 \cdot 10^5$	$0.5053 \cdot 10^5$	0.2646	0.1144
55%	$2.5056 \cdot 10^5$	$1.2948 \cdot 10^5$	$0.4979 \cdot 10^5$	$0.5991 \cdot 10^5$	0.2537	0.0806
60%	$2.6682 \cdot 10^5$	$1.3992 \cdot 10^5$	$0.5396 \cdot 10^5$	$0.6551 \cdot 10^5$	0.2480	0.0682

Для иллюстрации влияния объемного содержания волокна в композите на деформационное состояние на рис.9а,б приведены поля распределения значений интенсивности деформаций по плоскости изотропии p_{ii} (алюминия) в окрестности отверстия. При $\nu=25\%$ (рис.9а) области пластических деформаций расположены в окрестности верхней и нижней частей отверстия. Незначительные пластические зоны также наблюдаются у краев отверстия между 30° и 40° , относительно горизонтального диаметрального сечения. Увеличение объемного содержания до $\nu=35\%$ приводит к уменьшению зон пластических деформаций по вертикали и их исчезновению по боковым краям полости. Дальнейшее увеличение объемного содержания от 45% до 60% приводит к дальнейшему уменьшению областей с пластическими деформациями, которые при достижении $\nu=60\%$ практически исчезают. Это подтверждают и значения интенсивности деформаций, приведенные в точке расположенной непосредственно у края отверстия по вертикальному диаметральному сечению (Табл.4). На рис.10 приведена диаграмма деформирования по плоскости изотропии (алюминиевого сплава) для различных значений объемного содержания волокна в композите.

Таблица 4.

ν	упругость		пластичность	
	p_u	P_u [МПа]	p_u	P_u [МПа]
25%	0.006118	455.1	0.005941	332.6
35%	0.005191	447.4	0.004929	341.8
45%	0.004435	448.1	0.004040	355.7
55%	0.003801	455.5	0.003314	378.3
60%	0.003522	461.5	0.003048	396.2

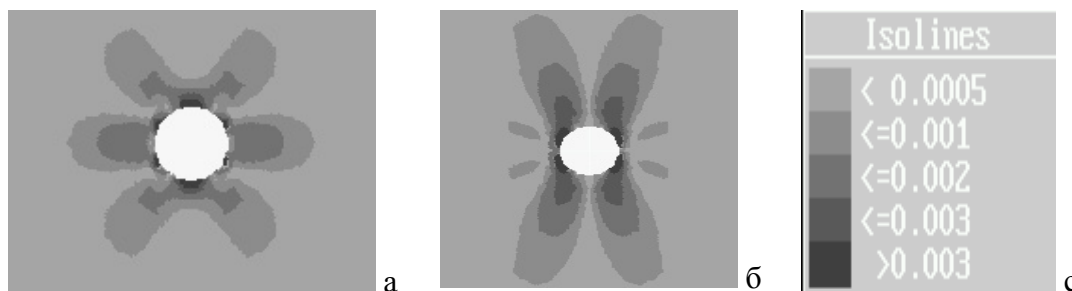


Рис.9. Распределение значений интенсивности деформаций.

Распределение значений интенсивности деформаций по главной оси трансверсальной изотропии Q_u (волокна) при $\nu=35\%$ приведено на рис.9б. Повышенные значения упругих деформаций формируются по бокам отверстия, а в окрестностях диаметрального сечения - они минимальны (тон закраски соответствует удвоенным значениям интенсивности деформаций по плоскости изотропии, приведенным на рис.9с). Волокнистый композит плохо сопротивляется сдвигу, поэтому по бокам отверстия под углом 20° могут появляться небольшое расслоение материала [15].

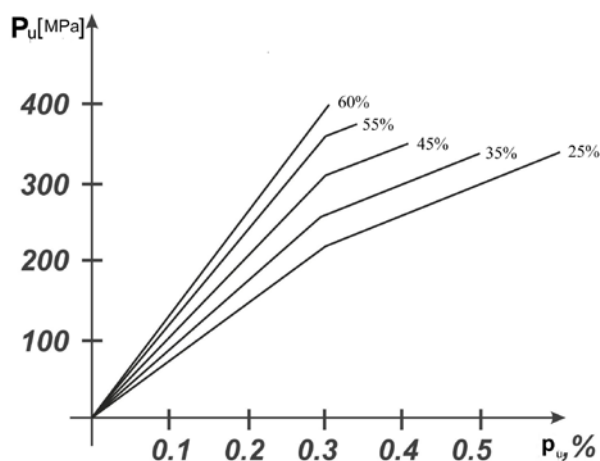


Рис.10. Диаграмма деформирования.

Проведение вычислительного эксперимента позволило исследовать напряженно-деформированное состояние однонаправленных композиционных материалов и определить закономерности, связанные с влиянием объемного содержания волокон в композите. Волокнистые композиты обладают упругопластическими характеристиками при объемном содержании волокна в интервале от 30% до 60%.

ВЫВОДЫ

1. Компьютерное моделирование и проведение вычислительного эксперимента позволило исследовать напряженно-деформированное состояние волокнистого композитного материала Д16 и определить закономерности, связанные с влиянием объемного содержания волокна в композите. На основе вычислительного эксперимента установлено, что волокнистые композиты обладают упругопластическими характеристиками при объемном содержании волокна от 30% до 60%.
2. На основе исследований упругопластического напряженно-деформированного состояния волокнистого композитного материала при одноосном растяжении по главной оси изотропии пластины, ослабленной центральным отверстием, установлено, что наличие концентратора приводит к перераспределению напряженного состояния в его окрестностях. Нагрузку на себя принимают волокна, находящиеся непосредственно у боков контура отверстия, которыегибаются внутрь конструкции. Пластические деформации подвергается области матрицы, расположенные в окрестности нижней и верхней части отверстия.
3. При одноосном растяжении волокнистого композитного материала по оси изотропии, когда изолированная прямолинейная трещина расположена перпендикулярно направлению волокон, формируется зона пластических деформаций матрицы в окрестностях берегов трещины. Максимальные значения интенсивности деформаций наблюдаются в окрестностях вершин трещины, однако, если по p_u повышенные значения выявлены в области между трещинами, то по q_u – распространяются по вертикали. Анализ упругопластического деформирования указывает на то, что области пластических деформаций в матрице формируются у вершин трещины. Наличие в волокнистых материалах изолированной горизонтальной трещины вызывает пластическую деформацию матрицы по всему контуру трещины.
4. Наличие боковых трещин вызывает выпучивание областей, занятых трещинами, увеличением значений и расширением зоны пластических деформаций матрицы в окрестностях вершин трещин. Дальнейшее увеличение внешней нагрузки приводит к объединению пластических областей, что может привести к потере прочностных характеристик конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kaminsky M.M.* Computational mechanics of composite materials. – Springer, 2007. – 240 p.
2. *Zeng Z., Fatemi A.* Elastic-plastic stress and strain behavior at notch roots under monotonic and cyclic loading // J. Strain Analysis. – 2001. – N36. – P.287-300.
3. *Khaldjigitov A., Adambaev U.I.* Numerical and mathematical modeling of elastic plastic transversally isotropic materials / 11th European Conference of Composite materials. – Greece, Rhodes, 2004. – P.252.
4. *Livieri P., Nicoletto G.* Elasto-plastic strain concentration factors in finite thickness plates // J. Strain Analysis. – 2003. – Vol.38. – P.31-36.
5. *Победра Б.Е.* Механика композиционных материалов. – М.: МГУ, 1984. – 336 с.
6. *Ильюшин А.А.* Пластичность. – М.: Гостехиздат, 1948. – 376 с.
7. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

8. *Морозов Е.М., Никишков Г.П.* Метод конечных элементов в механике разрушений. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
9. *Капустин С.А., Горохов В.А., Чурилов Ю.А., Слепнев Ю.Г.* Численное моделирование поведения конструкций из трансверсально-изотропных материалов в условиях квазистатических силовых и терморadiационных воздействий / Проблемы прочности и пластичности: Межвуз.сб. – Н.-Новгород, 2006. – Вып.68. – С.53-61.
10. *Карпов Е.В.* Влияние волокнистой структуры на концентрацию напряжений вблизи кругового отверстия в боралюмине / Новосибирск: Институт гидродинамики. Динамика сплошной среды. – 2002. – Вып.120. – С.137-144.
11. *Nedelou D., Manescu S.N., Campian C.V.* Finite element analysis through COSMOS/M Design STAR // FME Transactions. – 2004. – Vol.32. – N1. – P.36-42.
12. *Исупов Л.П., Работнов Ю.Н.* О законе пластичности для композитной среды // Известия АН СССР. МТТ. – 1985. – №1. – С.121-127.
13. *Карпов Е.В.* Концентрация напряжений и разрушение вблизи круговых отверстий в композитных элементах конструкций / Дисс канд. наук. – Новосибирск, 2002. – 119 с.
14. *Большаков В.И., Андрианов И.В., Данишевский В.В.* Асимптотические методы расчета композитных материалов с учетом внутренней структуры. – Днепропетровск: «Пороги», 2008. – 196 с.
15. *Работнов Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.

Поступила в редакцию 9 декабря 2014 года.

Сведения об авторе:

Полатов Асхад Мухамеджанович – к.ф.-м.н., доц., Национальный Университет Узбекистана, г. Ташкент, Республика Узбекистан; e-mail: asad3@yandex.ru