

Коэффициенты концентрации напряжений в слое тканого композита с локальными технологическими дефектами

Д. В. Дедков, А. В. Зайцев, А. А. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Кафедра механики композиционных материалов и конструкций
Комсомольский пр-т, 29, 614990, Пермь, Россия
Тел. / Факс: +7-342-2391294
denis.v.dedkov@gmail.com, zav@pstu.ru, rector@pstu.ru

10 октября 2012

Проблемы, возникающие при производстве тканых керамо-керамических композитов

- Композит создается вместе с элементом конструкции;
- Поликристаллические матрицы (углеродная, осаждаемая из газовой фазы или получаемая при карбонизации полимеров, терморасширенный графит или керамика);
- Возникновение локальных технологических дефектов, обнаруживаемых только на этапе выходного контроля изделий;
- Существенное влияние локальных технологических дефектов на концентрацию напряжений, прочность и живучесть элементов конструкций ответственного назначения

Локальные технологические дефекты

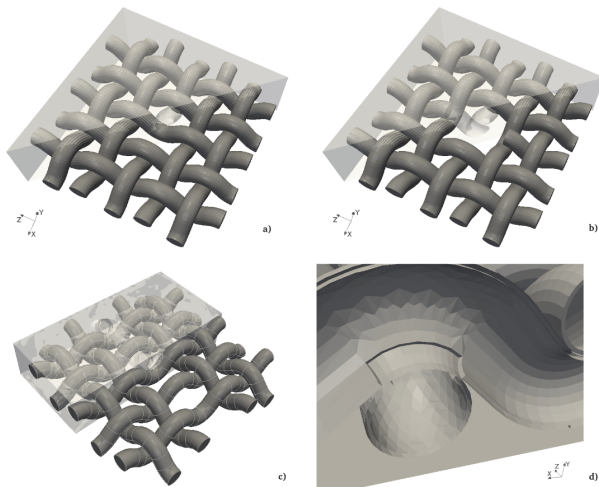
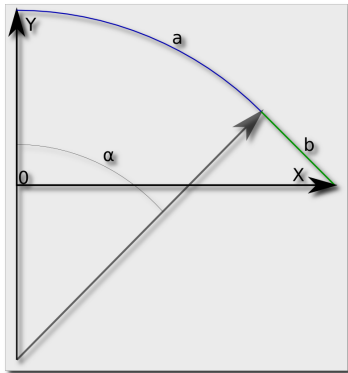


Рис. 1: Локальные технологические дефекты в слоях тканого композита:
а) разрыв волокна основы, б) разрыв волокон основы и утка, в) туннельная пора, д) внутренняя пора

Геометрия искривленных волокон слоя тканого композита



Описание геометрии

- 1 a — сегмент окружности;
- 2 $\alpha = 45^\circ$;
- 3 b — линейный участок.

Коэффициенты армирования

$$\alpha_x = \alpha_y = 0.14$$

Рис. 2: Участок искривленного волокна

Математическая модель слоя тканого композита с искривленными волокнами

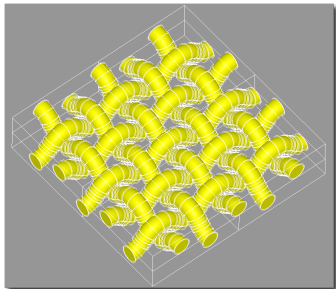


Рис. 3: Фрагмент слоя тканого композита периодической структуры

Гипотезы

- поликристаллическая матрица изотропна, линейно упруга ($E_m = 0.28\text{ГПа}$, $\nu_m = 0.4$);
- керамические волокна изотропны, линейно упруги ($E_f = 280\text{ГПа}$, $\nu_f = 0.2$);
- деформации бесконечно малы, взаимное расположение искривленных волокон, места и площади контакта неизменны в процессе нагружения слоя;
- волокна окружены гарантированным слоем матрицы (модель 1) или имеют контакт с трением (модель 2)

Математическая модель слоя тканого композита с искривленными волокнами

Уравнения равновесия в напряжениях

$$\sigma_{ij,j}(\mathbf{r}) = 0;$$

Геометрические соотношения Коши

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} [u_{i,j}(\mathbf{r}) + u_{j,i}(\mathbf{r})];$$

Индикаторная функция

$$\lambda = \begin{cases} 1, & \mathbf{r} \in V_f; \\ 0, & \mathbf{r} \in V_m \end{cases}$$

Определяющие соотношения

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = \left\{ C_{ijkl}^f \lambda(\mathbf{r}) + C_{ijkl}^m [1 - \lambda(\mathbf{r})] \right\} \varepsilon_{kl}(\mathbf{r})$$

Двухосное равнокомпонентное растяжение

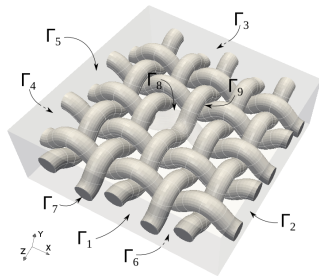
- $u_1(\mathbf{r})|_{\Gamma_2} = u_1^0; u_3(\mathbf{r})|_{\Gamma_1} = u_3^0;$
- $u_1(\mathbf{r})|_{\Gamma_4} = u_3(\mathbf{r})|_{\Gamma_3} = u_2(\mathbf{r})|_{\Gamma_5} = u_2(\mathbf{r})|_{\Gamma_6} = 0;$
- $\sigma_{12}(\mathbf{r})|_{\Gamma_4} = \sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_4} = \sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_3} = \sigma_{23}(\mathbf{r})|_{\Gamma_3} = 0;$
- $\sigma_{12}(\mathbf{r})|_{\Gamma_5} = \sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_5} = \sigma_{12}(\mathbf{r})|_{\Gamma_6} = \sigma_{13}(\mathbf{r})|_{\Gamma_6} = 0$

Идеальное сопряжение на межфазных поверхностях

- $[\sigma_{ij}(\mathbf{r})n_j(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^+} = [\sigma_{ij}(\mathbf{r})n_j(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^-}$
- $[u_i(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^+} = [u_i(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^-}$

Поверхность внутренней поры

- $[\sigma_{ij}(\mathbf{r})n_j(\mathbf{r})]_{\Gamma_8} = 0$



Контакт между волокнами основы и утка

если $[\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^+} < [f|\sigma_{nn}(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^-}$, то

$$[\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})n_n] |_{\Gamma_9^+} = [\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})n_n] |_{\Gamma_9^-}, \quad [u_n(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^+} = [u_n(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^-},$$

а, если $[\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^+} \geq [f|\sigma_{nn}(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^-}$, то

$$[\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^+} \geq [f|\sigma_{nn}(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^-}, \quad [u_n(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^+} = [u_n(\mathbf{r})] |_{\Gamma_9^-},$$

где индексы n и τ — определяют направление внешней нормали и касательной к поверхности Γ_9 .

Некоммерческая платформа численного моделирования SALOME

- Создание и редактирование геометрических моделей;
- Создание, редактирование, проверка качества конечно-элементной сетки;
- Задание физических свойств геометрическим элементам;
- Выполнение вычислений с помощью внешних решателей;
- Просмотр результатов вычислений.

Некоммерческий пакет Code-Aster

- Решение статических, квазистатических и динамических линейных и нелинейных задач;
- Моделирование разрушения и знакопеременного нагружения

Рис. 4: Топология конечноэлементной сетки волокон (a) и матрицы (b)

Модель 1: волокна окружены гарантированным слоем матрицы

	Тетраэдральные элементы	Гексаэдральные элементы
Идеальная структура	298 255	77 760
Туннельная пора	285 664	69 984
Разрыв волокна основы	285 466	75 168
Разрыв волокон основы и утка	279 276	72 576
Внутренняя пора	287 924	77 760

Модель 2: волокна основы и утка имеют контакт с трением

	Тетраэдральные элементы	Гексаэдральные элементы
Идеальная структура	405 480	77 760
Разрыв волокна основы	405 480	75 168
Разрыв волокон основы и утка	405 480	72 576

Поля напряжений в элементах структуры

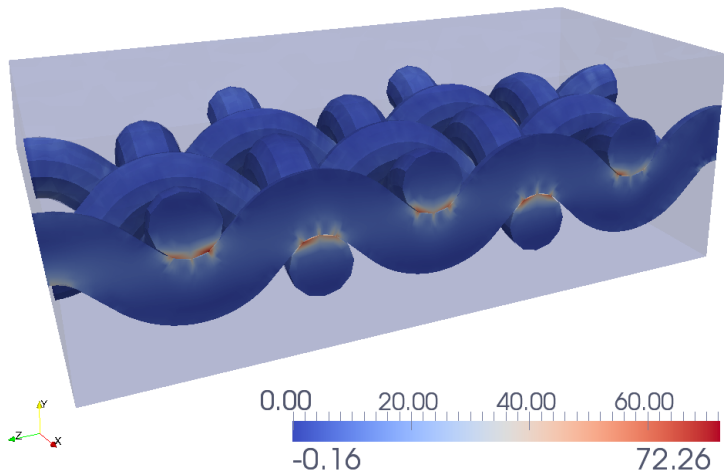


Рис. 5: Поля интенсивности напряжений (ГПа) в волокнах основы и утка (композит идеальной периодической структуры)

Максимальные безразмерные коэффициенты концентрации напряжений

Модель 1: волокна окружены гарантированным слоем матрицы

	$K_{\sigma_{11}}$	$K_{\sigma_{22}}$	$K_{\sigma_{33}}$	$K_{\sigma_{12}}$	$K_{\sigma_{13}}$	$K_{\sigma_{23}}$
Туннельная пора	1.34	2.11	1.53	1.36	2.50	1.42
Туннельная пора (доуплотнение)	1.28	1.77	1.31	1.29	2.43	1.23
Разрыв волокна основы	1.29	1.63	1.30	1.25	2.31	1.44
Разрыв волокна основы (доуплотнение)	1.26	1.49	1.27	1.35	2.20	1.32
Разрыв волокон основы и утка	1.50	1.92	1.56	1.58	2.53	1.70
Разрыв волокон основы и утка (доуплотнение)	1.35	1.68	1.41	1.41	2.21	1.50
Внутренняя пора	1.31	1.93	1.35	4.38	1.73	4.56

Модель 2: волокна основы и утка имеют контакт с трением

	$K_{\sigma_{11}}$	$K_{\sigma_{22}}$	$K_{\sigma_{33}}$	$K_{\sigma_{12}}$	$K_{\sigma_{13}}$	$K_{\sigma_{23}}$
Разрыв волокна основы	4.57	3.61	4.37	6.87	10.87	3.69
Разрыв волокон основы и утка	4.01	3.73	5.92	6.59	48.08	3.70

Безразмерные коэффициенты концентрации интенсивности напряжений. Модель 1: волокна окружены гарантированным слоем матрицы

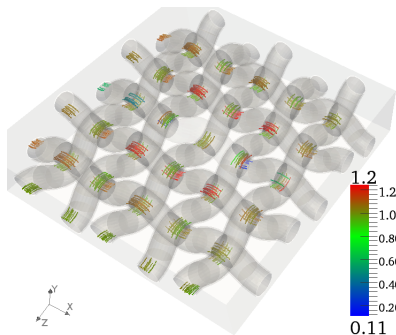


Рис. 6: Разрыв волокна основы

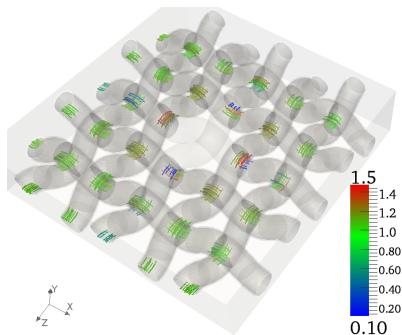


Рис. 7: Разрыв волокон основы и утка

Безразмерные коэффициенты концентрации интенсивности напряжений. Модель 2: волокна основы и утка имеют контакт с трением

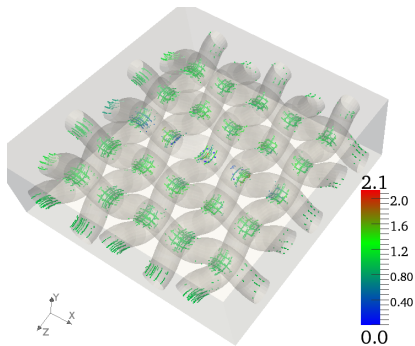


Рис. 8: Разрыв волокна основы

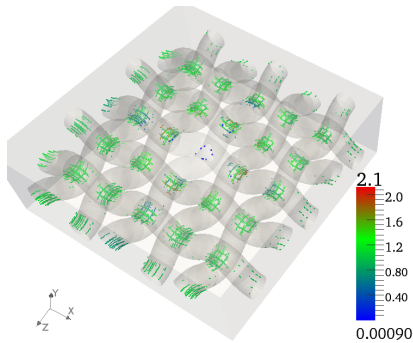


Рис. 9: Разрыв волокон основы и утка

- Разработана модель слоя тканого композита с искривленными волокнами и поликристаллической матрицей;
- При двухосном равнокомпонентном растяжении на основе численного решения краевых задач методом конечных элементов определены коэффициенты концентрации напряжений, вызванные наличием локальных технологических дефектов;
- Установлено, что главными механизмами, инициирующими разрушение поликристаллической матрицы, являются сдвиги;
- Для повышения способности тканым композитом сопротивляться внешнему силовому воздействию необходимо предусмотреть в технологическом процессе операции, обеспечивающие проникновение связующего в полости технологических локальных дефектов, дополнительную пропитку связующим, доуплотнение и карбонизацию, досаждение поликристаллической матрицы из газовой фазы в случае, если в результате ультразвукового контроля готового изделия обнаруживаются с внутренняя пористость и разрывы волокон

Спасибо за внимание!