

УДК 536.4 : 539.3

Моделирование предельного напряженного состояния матричного композита с ориентированными волокнами при термодинамических воздействиях*

В.В. Бардушкин¹, А.А. Кочетыгов¹, В.Б. Яковлев^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, 124498, Россия*

² *Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, 119991, Россия*

e-mail: bardushkin@mail.ru, aakchi@gmail.com, yakvb@mail.ru

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-3-118-124

Поступила в редакцию 17.01.2020

После доработки 29.01.2020

Принята к публикации 29.01.2020

Построена математическая модель прогнозирования напряженного состояния матричного композита с ориентированными волокнами, возникающего в результате неравномерного нагрева металлических волокон и диэлектрической матрицы при пропускании через неоднородный материал электрического тока. Рассматривается композит с матрицей диоксида кремния, армированный волокнами меди или алюминия. Полагается, что металлические волокна ориентированы вдоль осей x и y прямоугольной системы координат и имеют в этих направлениях одинаковые величины объемных концентраций. Проведены численные расчеты, учитывающие влияние состава, концентрации компонентов и различий в величине приращения температуры в волокнах и матрице на достижение композитом предельных прочностных показателей, приводящих к растрескиванию диэлектрика. Модель опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей и понятие оператора концентрации напряжений (тензора четвертого ранга), связывающего средние по материалу напряжения с их локальными значениями в пределах отдельного элемента неоднородности.

Ключевые слова: моделирование, композит, волокно, матрица, термический коэффициент линейного расширения, тензор напряжений, оператор концентрации напряжений, предел прочности.

Введение

При создании композитов с заданными эксплуатационными характеристиками необходимо оптимизировать состав компонентов, их концентрацию, а также форму и ориентацию включений. Поскольку экспериментальные методы оптимизации состава, концентрации и структуры компонентов композитов являются дорогостоящими, все большее значение для исследо-

вателей приобретают теоретические методы прогнозирования эффективных (эксплуатационных), локальных (внутренних) и предельных физико-механических свойств композитных материалов (упругих, тепло- и электропроводящих, магнитных и др.), а также изменение этих свойств при внешних воздействиях различного вида [1, 2]. Значительный интерес для разработчиков представляет также задача прогнозирования влияния внутренних изменений, происходящих в компонентах композитов, на предельное напряженное состояние неоднородных материалов. Эти внутренние изменения

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-70180 «Стабильность».

могут происходить, например, при неравномерном нагреве элементов неоднородности композитов и увеличении их объемов в результате термодинамических воздействий [3–5]. Решение данной задачи важно и актуально для микро- и нанoeлектроники, в частности, для преодоления проблем, возникающих при многоуровневой металлизации интегральных схем, когда при пропускании через них электрического тока может происходить разрушение диэлектрической матрицы [6–11].

1. Постановка задачи и построение модели

В работе рассматривается матричный композит, армированный волокнами, ориентированными параллельно фиксированной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Полагается, что компоненты композитного материала изотропны. Целью настоящей работы является:

а) построение модели, опирающейся на результаты работ [3–5] и позволяющей прогнозировать влияние локальных напряжений в матричном композите, обусловленных изменениями объемов элементов неоднородности, на его напряженно-деформированное состояние, приводящее к достижению и превышению предельных прочностных показателей материала;

б) проведение численных расчетов по определению предельного напряженного состояния композита с ориентированными волокнами при термодинамических воздействиях в зависимости от состава компонентов, их модулей упругости и термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР), объемного содержания волокон и матрицы, а также различий в величине изменения (скачке) температуры в элементах неоднородности.

При построении модели полагается, что волокна ориентированы в направлениях осей x и y лабораторной прямоугольной системы координат. В основе решения поставленной задачи лежит условие единственности и обратимости оператора концентрации напряжений $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ (\mathbf{r} – радиус-вектор произвольной точки среды) [3–5, 12]. Оператор $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ является тензором четвертого ранга, связывающим локальные напряжения $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ в каждом элементе неоднородности материала со средними напряжениями $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$ в композите

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle, \quad (1)$$

$$i, j, k, l = 1, 2, 3,$$

где угловые скобки означают усреднение по объему [13].

Для матричного композита с изотропными компонентами операция усреднения для некоторой случайной величины \mathbf{b} сводится к суммированию

$$\langle \mathbf{b} \rangle = \sum_s v_s \langle \mathbf{b}_s \rangle, \quad (2)$$

где v_s – объемное содержание компонента s -го типа, \mathbf{b}_s – соответствующая указанному компоненту случайная величина, $\sum_s v_s = 1$. В частности, для рассматриваемого в работе матричного композита с ориентированными волокнами

$$\langle \mathbf{b} \rangle = (v_v)_1 (\mathbf{b}_v)_1 + (v_v)_2 (\mathbf{b}_v)_2 + v_m \mathbf{b}_m.$$

Индекс «v» относится к волокнам, а индекс «m» – к матрице; значения нижнего индекса 1 и 2 соответствует волокнам, ориентированным, соответственно, в направлениях x и y ; $(v_v)_1 + (v_v)_2 + v_m = 1$.

Для приближений, учитывающих взаимодействие включений, оператор $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ можно получить, решая уравнение равновесия (систему дифференциальных уравнений второго порядка со случайными кусочно-однородными коэффициентами) [3–5, 12]. Используя метод функций Грина, с помощью обобщенного сингулярного приближения теории случайных полей [13] и специально вводимого однородного тела сравнения выражение для оператора концентрации напряжений имеет вид (индексы опущены) [3–5, 12]:

$$\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r}) = \mathbf{c}(\mathbf{r}) (\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r}) \mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \times \times \langle \mathbf{c}(\mathbf{r}) (\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{r}) \mathbf{c}''(\mathbf{r}))^{-1} \rangle^{-1}, \quad (3)$$

где $\mathbf{c}(\mathbf{r})$ – тензор модулей упругости; двойным штрихом определяется разность между величинами неоднородной среды и однородного тела сравнения, характеристики которого обозначаются верхним индексом «c»: $\mathbf{c}''(\mathbf{r}) = \mathbf{c}(\mathbf{r}) - \mathbf{c}^c$; \mathbf{I} – единичный тензор; $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ – интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия. Компоненты g_{ijkl} тензора $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ вычисляются следующим образом [13]:

$$g_{ijkl} = a_{i(kl)(j)}. \quad (4)$$

Здесь $a_{ijkl} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega$, где $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ – элемент телесного угла в сферической системе координат; t_{il}^{-1} – элементы матрицы, обратной матрице \mathbf{T} с элементами $t_{il} = c_{ijkl}^c n_k n_j$; n_k и n_j ($k, j = 1, 2, 3$) – компоненты вектора внешней нормали к поверхности включения. Для эллипсоидальных включений с главными полуосями l_1, l_2 и l_3 компоненты вектора нормали определяются следующими соотношениями:

$$n_1 = \frac{1}{l_1} \sin \theta \cos \varphi, \quad n_2 = \frac{1}{l_2} \sin \theta \sin \varphi, \\ n_3 = \frac{1}{l_3} \cos \theta.$$

По парам индексов i и j, k и l , заключенным в выражении (4) для компонент g_{ijkl} тензора $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ в круглые скобки, осуществляется операция симметризации. В качестве параметров тела сравнения в работе используются модули упругости матрицы [14].

Пусть фактором, приводящим к изменению напряженного состояния композита, является температурное расширение элементов неоднородности. Тогда

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = c_{ijkl}(\mathbf{r}) \alpha_{kl}(\mathbf{r}) \Delta T(\mathbf{r}),$$

где $\alpha_{kl}(\mathbf{r})$ – компоненты тензора температурного расширения, $\Delta T(\mathbf{r})$ – изменение температуры. В композите с изотропными компонентами

$$\alpha_{kl}(\mathbf{r}) = \alpha(\mathbf{r}) \delta_{kl},$$

где $\alpha(\mathbf{r})$ – ТКЛР элемента неоднородности, δ_{kl} – символ Кронекера.

Для рассматриваемого в работе композита $\Delta T(\mathbf{r}) = \Delta T_M$, $\alpha(\mathbf{r}) = \alpha_M$, если элементом неоднородности является матрица; $\Delta T(\mathbf{r}) = (\Delta T_B)_1$, $\alpha(\mathbf{r}) = (\alpha_B)_1$ или $\Delta T(\mathbf{r}) = (\Delta T_B)_2$, $\alpha(\mathbf{r}) = (\alpha_B)_2$, если элементы неоднородности – волокна, ориентированные вдоль x или y соответственно. Тогда, исходя из определения (1) оператора концентрации напряжений с учетом его невырожденности, для отдельных бесконечно малых объемов матрицы, а также волокон 1-го или 2-го типов вклады их локальных напряженных состояний в среднее напряженное состояние всего композита составят соответственно

$$\langle \sigma_M \rangle = (\mathbf{K}_M^\sigma)^{-1} \mathbf{c}_M \alpha_M \Delta T_M \delta_{kl}, \\ \langle \sigma_B \rangle_1 = (\mathbf{K}_B^\sigma)^{-1} (\mathbf{c}_B)_1 (\alpha_B)_1 (\Delta T_B)_1 \delta_{kl},$$

$$\langle \sigma_B \rangle_2 = (\mathbf{K}_B^\sigma)^{-1} (\mathbf{c}_B)_2 (\alpha_B)_2 (\Delta T_B)_2 \delta_{kl}.$$

Отсюда, учитывая (2), в начальный момент пропускания тока, когда металлические волокна сильно нагреваются, а матрица нагревается незначительно, среднее напряжение по всему неоднородному материалу, характеризуемое тензором средних напряжений $\langle \sigma \rangle$ с ненулевыми компонентами $\langle \sigma_{ii} \rangle$ ($i = 1, 2, 3$), имеет следующий вид [4, 5]:

$$\langle \sigma \rangle = \left((v_B)_1 (\mathbf{K}_B^\sigma)^{-1} (\mathbf{c}_B)_1 (\alpha_B)_1 (\Delta T_B)_1 + \right. \\ \left. + (v_B)_2 (\mathbf{K}_B^\sigma)^{-1} (\mathbf{c}_B)_2 (\alpha_B)_2 (\Delta T_B)_2 + \right. \\ \left. + v_M (\mathbf{K}_M^\sigma)^{-1} \mathbf{c}_M \alpha_M \Delta T_M \right) \delta_{kl}. \quad (5)$$

На границе макрообъема материала (т.е. в матрице) возникающее напряженно-деформированное состояние $\langle \sigma \rangle$ приводит к возникновению растягивающих напряжений. Поскольку, согласно (1), локальные напряжения σ_M в матрице вычисляются с помощью формулы

$$\sigma_M = \mathbf{K}_M^\sigma \langle \sigma \rangle,$$

то, определив по формулам (3), (5) оператор \mathbf{K}_M^σ и средние напряжения $\langle \sigma \rangle$ в композите, можно найти значения σ_{ii} ($i = 1, 2, 3$) тензора σ_M и выбрать среди них наибольшую по величине компоненту. Варьируя объемную концентрацию волокон v_B , значения $(\Delta T_B)_1, (\Delta T_B)_2$ и ΔT_M , можно прогнозировать напряженно-деформированное состояние композита при термодинамических воздействиях. Для оценки предельного напряженно-деформированного состояния рассматриваемого неоднородного материала, необходимо провести сравнение наибольшей по величине компоненты σ_{ii} ($i = 1, 2, 3$) в матрице с пределом прочности σ_p матрицы при растяжении. В случае выполнения неравенства $\max\{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}\} \geq \sigma_p$ достигается предельное напряженно-деформированное состояние композита, т.е. неоднородный материал разрушается в результате растрескивания матрицы.

2. Проведение модельных расчетов

Рассмотрим композиты с матрицей диоксида кремния, армированные волокнами меди или алюминия. При моделировании использовались

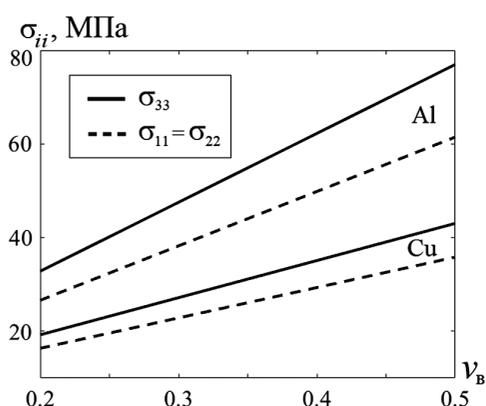


Рис. 1. Зависимости значений компонент σ_{ii} ($i = 1, 2, 3$) тензора $\sigma_{\mathbf{M}}$ от объемного содержания волокон ν_v при термодинамических воздействиях

следующие значения для термоупругих характеристик компонентов неоднородных материалов [15, 16]:

– волокна меди: модуль Юнга – 120 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.38, ТКЛР – $1.75 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$;

– волокна алюминия: модуль Юнга – 70 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.31, ТКЛР – $2.53 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$;

– матрица диоксида кремния: модуль Юнга – 73 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.17, ТКЛР – $0.61 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, предел прочности при растяжении $\sigma_p = 110 \text{ МПа}$.

При проведении расчетов в операциях над тензорами использовалась их матричная форма записи [13]. Полагалось, что волокна имеют одинаковую форму в виде сильно вытянутых эллипсоидов вращения (l_1, l_2 и l_3 – главные полуоси этих эллипсоидов) и ориентированы в пространстве композита в направлениях осей x и y лабораторной прямоугольной системы координат. Причем $l_1 \rightarrow \infty, l_2 = l_3 = 1$ для включений, ориентированных в направлении оси x ; $l_2 \rightarrow \infty, l_1 = l_3 = 1$ для включений, ориентированных в направлении оси y . Считалось, что объемные доли волокон в каждом из направлений x и y одинаковы, т.е. $(\nu_v)_1 = (\nu_v)_2$.

Вначале были исследованы зависимости компонент σ_{ii} ($i = 1, 2, 3$) тензора $\sigma_{\mathbf{M}}$ от объемного содержания волокон $\nu_v = (\nu_v)_1 + (\nu_v)_2$, а также от вариаций величин изменений температуры $(\Delta T_v)_1, (\Delta T_v)_2$ и ΔT_m . Было установлено, что для материалов рассматриваемой структуры $\max\{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}\} = \sigma_{33}$. На рис. 1 этот факт проиллюстрирован расчетами компонент σ_{ii} ($i = 1, 2, 3$) тензора $\sigma_{\mathbf{M}}$, проведенными при значениях $(\Delta T_v)_1 = (\Delta T_v)_2 = 20^\circ\text{C}$, $\Delta T_m = 5^\circ\text{C}$.

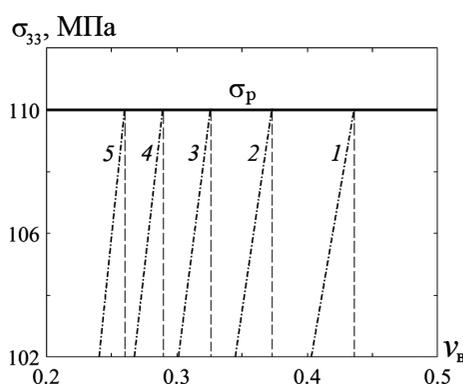


Рис. 2. Результаты численного моделирования предельного напряженного состояния матричного композита «диоксид кремния–медь» при термодинамических воздействиях. Штрихпунктирные линии – расчеты значений σ_{33} в матрице: 1 – $\Delta T_v = 60^\circ\text{C}$; 2 – 70°C ; 3 – 80°C ; 4 – 90°C ; 5 – 100°C

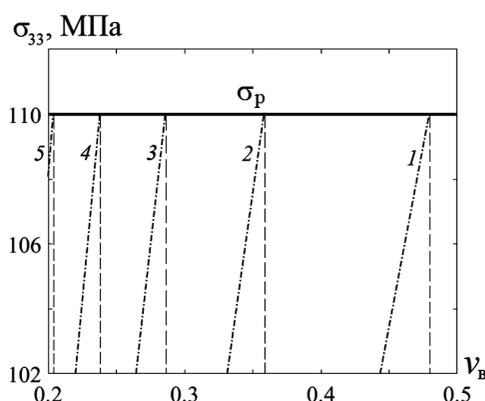


Рис. 3. Результаты численного моделирования предельного напряженного состояния матричного композита «диоксид кремния–алюминий» при термодинамических воздействиях. Штрихпунктирные линии – расчеты значений σ_{33} в матрице: 1 – $\Delta T_v = 30^\circ\text{C}$; 2 – 40°C ; 3 – 50°C ; 4 – 60°C ; 5 – 70°C

Затем было проведено численное моделирование предельного напряженного состояния рассматриваемых матричных структур. Результаты модельных расчетов зависимости предельных прочностных показателей композитов от объемной концентрации ν_v волокон и величины приращения температуры в волокнах $\Delta T_v = (\Delta T_v)_1 = (\Delta T_v)_2$ при $\Delta T_m = 5^\circ\text{C}$ представлены на рис. 2, 3.

Заключение

Перечислим основные результаты работы.

1. Построена математическая модель, позволяющая прогнозировать напряженное состояние (вплоть до предельного) матричного композита с ориентированными волокнами, возникающее в результате внутренних изменений его компонентов, обусловленных неравномерностью нагревания волокон и матрицы.

2. Опираясь на разработанную теоретическую модель, для композита с диэлектрической матрицей (диоксид кремния) и металлическими волокнами (медь, алюминий) проведены численные расчеты по определению его предельного напряженного состояния, возникающего при пропускании через неоднородный материал электрического тока и приводящего к растрескиванию диэлектрика.

3. Исследовано влияние состава компонентов, их модулей упругости и термического коэффициента линейного расширения, объемной доли волокон, а также различий в величине изменения (скачка) температуры в волокнах и матрице на достижение композитом предельного напряженного состояния. Результаты расчетов показали, что все учитываемые в модели факторы вносят существенные вклады в напряженно-деформированное состояние матричного композита рассмотренной структуры, а значит, их необходимо учитывать при многоуровневой металлизации интегральных схем.

Таким образом, разработанный в статье теоретический подход к прогнозированию предельных состояний матричных композитов с ориентированными волокнами при термодинамических воздействиях позволяет уже на стадии проектирования материалов предотвращать ситуации, которые могут приводить к выходу из строя изделий электронной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимов Н.Н., Канович М.З., Карташов Э.М., Натрусов В.И., Пономаренко А.Т., Шевченко В.Г., Соколов В.И., Симонов-Емельянов И.Д. Физика композиционных материалов (в 2-х томах). М.: Мир, 2005. Т. 1. 456 с.; Т. 2. 344 с.
2. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2018. 640 с.
3. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П., Яковлев В.Б. Влияние термоупругих характеристик компонентов, формы и ориентации неизометричных включений на средние напряжения в матричных структурах // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 5. С. 43–47.
4. Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Кочетыгов А.А., Петров Н.И. Напряженное состояние матричных структур в условиях воздействия термодинамических факторов // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2019. № 1. С. 61–66.
5. Бардушкин В.В., Колесников В.И., Кочетыгов А.А., Сычев А.П., Яковлев В.Б. Влияние состава, термоупругих характеристик и концентрации компонентов на средние напряжения в матричных композитах, армированных ориентированными волокнами // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2019. Т. 16. № 3. С. 16–22. DOI: 10.31429/vesnik-16-3-16-22.
6. Громов Д.Г. Материалы и процессы формирования многослойной металлизации кремниевых СБИС. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2000. 271 с.
7. Климовицкий А.Г., Громов Д.Г., Евдокимов В.Л., Личманов И.О., Мочалов А.И., Сулимин А.Д. Материалы для металлизации кремниевых СБИС // Электронная промышленность. 2002. № 1. С. 60–66.
8. Климовицкий А.Г. Разработка материалов и процессов для формирования системы металлизации СБИС субмикронного уровня. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 138 с.
9. Смолин В.К. Особенности применения алюминиевой металлизации в интегральных схемах // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 1. С. 10–16.
10. Громов Д.Г., Мочалов А.И., Сулимин А.Д., Шевяков В.И. Металлизация ультрабольших интегральных схем. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 277 с.
11. Стоянов А.А., Зенин В.В., Новокрещенова Е.П., Грибанов М.А. Сборка изделий микроэлектроники с использованием металлизации и проволоки из меди // Вестник ВГТУ. 2014. Т. 10. № 5-1. С. 98–104.
12. Колесников В.И., Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Сычев А.П. О прогнозировании распределений локальных упругих полей в неоднородных средах на основе обобщенного сингулярного приближения // Вестник Южного научного центра РАН. 2015. Т. 11. № 3. С. 11–17.
13. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
14. Хорошун Л.П., Маслов Б.П., Лещенко П.В. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. Киев: Наукова думка, 1989. 207 с.
15. Физические величины: Справочник. / Под ред. И.С. Григорьевой, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
16. Деменко В.Ф. Таблицы механических свойств конструкционных материалов. Харьков: Изд-во ХАИ, 2014. 7 с.

Modeling of the limit stress state of a matrix composite with oriented fibers under thermodynamic influences

V.V. Bardushkin¹, A.A. Kochetygov¹, V.B. Yakovlev^{1,2}

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, 124498, Russia

²Institute of Nanotechnology Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia
e-mail: bardushkin@mail.ru, aakcht@gmail.com, yakvb@mail.ru

A mathematical model is created that allows predicting the stress state (up to the ultimate) of a matrix composite with oriented fibers, which occurs as a result of internal changes in its com-

ponents due to uneven heating of the fibers and the matrix. The model is based on the generalized singular approximation of random field theory and the concept of the stress concentration operator (fourth-rank tensor), which connects the material average stresses with their local values within a single inhomogeneity element. Based on the developed theoretical model, for a composite with a dielectric matrix (silicon dioxide) and metal fibers (copper, aluminum), numerical calculations were carried out to determine its ultimate stress state, which appears when an electric current is passed through an inhomogeneous material and leads to cracking of the dielectric. The influence of the composition of the components, their elastic moduli and thermal linear expansion coefficients, the volume fraction of fibers, as well as the differences in the magnitude of the change (jump) in the temperature in the fibers and the matrix on the reaching the ultimate stress state of the composite is studied. The calculation results showed that all factors taken into account in the model make significant contributions to the stress-strain state of the matrix composite of the structure under consideration, which means that they must be taken into account in multilevel metallization of integrated circuits.

The theoretical approach developed in the article to predicting the limiting states of matrix composites with oriented fibers under thermodynamic effects makes it possible at the stage of designing materials to prevent situations that could lead to failure of electronic products.

Keywords: modeling, composite, fiber, matrix, thermal coefficient of linear expansion, stress tensor, stress concentration operator, tensile strength.

REFERENCES

1. **Trofimov N.N., Kanovich M.Z., Kartashov E.M., Natrusov V.I., Ponomarenko A.T., Shevchenko V.G., Sokolov V.I., Simonov-Yemelyanov I.D.** *Fizika kompozitsionnykh materialov* [Physics of composite materials (in two volumes)]. Moscow: Mir, 2005, vol. 1, 456 p.; vol. 2, 344 p. In Russ.
2. **Kerber M.L.** *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya* [Polymer composite materials: structure, properties, technology]. –St. Petersburg: Profession, 2018. 640 p. In Russ.
3. **Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Sorokin A.I., Sychev A.P., Yakovlev V.B.** Effect of thermoelastic characteristics of components, shape of non-isometric inclusions, and their orientation on average stresses in matrix structures. *Physical Mesomechanics*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 258–262. DOI: 10.1134/S1029959918030104
4. **Bardushkin V.V., Yakovlev V.B., Kochetygov A.A., Petrov N.I.** Napryazhennoe sostoyanie matrichnykh struktur v usloviyakh vozdejstviya termodinamicheskikh faktorov [Stressed state of matrix structures in the conditions of exposure to thermodynamic factors]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3. Mikroelektronika – Electronic Technology. Series 3. Microelectronics*, 2019, no. 1, pp. 61–66. In Russ.
5. **Bardushkin V.V., Kolesnikov V.I., Kochetygov A.A., Sychev A.P., Yakovlev V.B.** Vliyanie sostava, termouprugikh kharakteristik i kontsentratsii komponentov na srednie napryazheniya v matrichnykh kompozitakh, armirovannykh orientirovannymi voloknami [Influence of composition, thermoelastic characteristics and concentration of components on average stresses in matrix composites reinforced by oriented fibers]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva – Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 16–22. In Russ. DOI: 10.31429/vestnik-16-3-16-22
6. **Gromov D.G.** *Materialy i protsessy formirovaniya mnogoslojnoj metallizatsii kremnievykh SBIS*. Dr. tech. sci diss. [Materials and processes for the formation of multilayer metallization of silicon VLSIC. Doct. diss]. Moscow, 2000. 271 p. In Russ.
7. **Klimovitsky A.G., Gromov D.G., Evdokimov V.L., Lichmanov I.O., Mochalov A.I., Sulimin A.D.** Materialy dlya metallizatsii kremnievykh SBIS [Materials for metallization of silicon VLSIC]. *Elektronnaya promyshlennost' – Electronic industry*, 2002, no. 1, pp. 60–66. In Russ.
8. **Klimovitsky A.G.** *Razrabotka materialov i protsessov dlya formirovaniya sistemy metallizatsii SBIS submikronnogo urovnya*. Cand. tech.sci diss. [Development of materials and processes for the formation of a metallization system for super-large integrated circuits of the submicron level. Cand. diss.] Moscow, 2004. 138 p. In Russ.
9. **Smolin V.K.** Osobennosti primeneniya alyuminievoj metallizatsii v integral'nykh skhemakh [Features of the use of aluminum metallization in integrated circuits]. *Mikroelektronika – Microelectronics*, 2004, vol. 33, No. 1, pp. 10–16. In Russ.
10. **Gromov D.G., Mochalov A.I., Sulimin A.D., Shevyakov V.I.** *Metallizatsiya ul'trabort'shikh integral'nykh skhem* [Metallization of ultra-large integrated circuits]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2009. 277 p. In Russ.
11. **Stoyanov A.A., Zenin V.V., Novokreschenova E.P., Gribanov M.A.** Sborka izdelij mikroelektroniki s ispol'zovaniem metallizatsii i provoloki iz medi [The assembly of microelectronic devices using metallization and copper wire]. *Vestnik VGTU – Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2014, vol. 10, no. 5-1, pp. 98–104. In Russ.
12. **Kolesnikov V.I., Yakovlev V.B., Bardushkin V.V., Sychev A.P.** O prognozirovanii raspredelenij lokal'nykh uprugikh polej v neodnorodnykh sredakh na osnove obobshhennogo singulyarnogo priblizheniya [On the prediction of local elastic fields' distributions in non-uniform media on the basis of a generalized singular approximation]. *Vestnik*

- Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN – Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 11, no. 3, pp. 11–17. In Russ.
13. **Shermergor T.D.** *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Micromechanics of inhomogeneous medium]. Moscow: Nauka, 1977. 399 p. In Russ.
 14. **Khoroshun L.P., Maslov B.P., Leshchenko P.V.** *Prognozirovanie ehffektivnykh svoystv p'ezoaktivnykh kompozitnykh materialov* [Predicting of the effective properties of piezoelectric composite materials]. Kiev: Naukova Dumka, 1989. 207 p. In Russ.
 15. **Fizicheskie velichiny: Spravochnik.** Pod. red. Grigor'eva I.S., Meilikhova E.Z. [Physical Quantities: Handbook. Ed. Grigor'ev I.S., Meilikhov E.Z.]. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1232 p. In Russ.
 16. **Demenko V.F.** *Tablitsy mekhanicheskikh svoystv konstruktsionnykh materialov* [Tables of mechanical properties of structural materials]. Khar'kov: KhAI Publ., 2014. 7 p. In Russ.