

МЕХАНИКА

УДК 539.3

DOI: 10.31429/vestnik-16-3-16-22

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА, ТЕРМОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК
И КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ НА СРЕДНИЕ
НАПРЯЖЕНИЯ В МАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТАХ,
АРМИРОВАННЫХ ОРИЕНТИРОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ**

**Бардушкин В. В., Колесников В. И., Кочетыгов А. А., Сычёв А. П.,
Яковлев В. Б.**

INFLUENCE OF COMPOSITION, THERMOELASTIC CHARACTERISTICS
AND CONCENTRATION OF COMPONENTS ON AVERAGE STRESSES IN MATRIX
COMPOSITES REINFORCED BY ORIENTED FIBERS

V. V. Bardushkin¹, V. I. Kolesnikov², A. A. Kochetygov¹, A. P. Sychev³, V. B. Yakovlev^{1,4}

¹ National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

² Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

³ Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russia

⁴ Institute of Nanotechnology Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: alekc_sap@mail.ru

Abstract. A model is constructed in the work that allows predicting the influence of local stresses caused by changes in the volumes of the heterogeneity elements of two-component matrix composites with orthogonal reinforced (parallel to a fixed plane) fibers on average stresses over the material. The model is based on a generalized singular approximation of random field theory, used in solving a system of stochastic differential equilibrium equations for an elastic medium. When constructing the model, the concept of the stress concentration operator (fourth-rank tensor) is used, which connects the material average stresses with their local values within a single heterogeneity element. The generalized singular approximation allows you to obtain an explicit expression for the concentration operator, with the help of which a calculated relation is derived for determining average stresses in the considered matrix structures. The ratio allows you to take into account a number of factors. These include the composition and thermoelastic characteristics of the components of the composites, the volume concentration and orientation of the fibers in the matrix, as well as the difference factor in the magnitude of the change (jump) in temperature in various elements of the inhomogeneity of the material – the fibers and the matrix.

For model composites with a silicon dioxide matrix and oriented fibers (copper, aluminum), numerical calculations were carried out to determine the values of the average material stresses in the directions of the axes of the laboratory coordinate system. The dependences of the indicated values on the volumetric content of fibers, as well as on variations in the magnitude of the temperature jump in the fibers and matrix, are studied. Model calculations showed that the difference in the magnitude of the temperature jump in the elements of heterogeneity and the volumetric concentration of fibers in the composites have a significant effect on the values of average stresses over the material.

Keywords: matrix composite, thermoelastic properties, average stresses, simulation.

Бардушкин Владимир Валентинович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Высшая математика №2» Национального исследовательского университета «МИЭТ»; e-mail: bardushkin@mail.ru.

Колесников Владимир Иванович, президент, заведующий кафедрой «Теоретическая механика» Ростовского государственного университета путей сообщения; e-mail: kvi@rgups.ru.

Кочетыгов Андрей Александрович, аспирант кафедры «Высшая математика №2» Национального исследовательского университета «МИЭТ»; e-mail: aakcht@gmail.com.

Сычёв Александр Павлович, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией транспорта и новых композиционных материалов Федерального исследовательского центра Южный научный центр Российской академии наук; e-mail: alekc_sap@mail.ru.

Яковлев Виктор Борисович, д-р физ.-мат. наук, профессор РАН, профессор кафедры «Высшая математика №2» Национального исследовательского университета «МИЭТ», главный научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники РАН; e-mail: yakvb@mail.ru.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (17-08-01374-а).

Введение

Проектирование композитных материалов с заданными свойствами ведется, как правило, при помощи включений неизометричной формы (волокна, диски и др.). В зависимости от требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам композитов, эти включения ориентируются в пространстве материала друг относительно друга определенным образом [1, 2]. Актуальной задачей, возникающей при разработке и создании таких композитов, является задача прогнозирования значений локальных (внутренних) напряжений в неоднородном материале при внешних воздействиях различного вида. Однако не меньший интерес для исследователей представляет и обратная задача — определение напряжений на границе макрообъема материала от вариаций значений локальных напряжений, обусловленных изменениями объемов его элементов неоднородности. Эти изменения могут быть вызваны различными факторами, например, термодинамическими [3–5]. Решение данной задачи является важным для электронной техники, машиностроения и других отраслей промышленного производства. Интерес к решению этой задачи в микро- и наноэлектронике в первую очередь обусловлен проблемами, возникающими при многоуровневой металлизации интегральных схем, когда при пропускании тока может происходить разрушение диэлектрической матрицы. Такое разрушение может быть вызвано различием термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) металлических волокон и диэлектрика, резким нагревом волокон в матрице, температура которой в начальный период времени (с момента начала пропускания тока) увеличивается не столь значительно, а также особенностями структуры композита, связанными с объемной концентрацией волокон [6–13].

Задача оценки влияния внутренних изменений, происходящих в компонентах композитов при увеличении температуры, на средние (внешние) напряжения для матричных структур различных типов рассматривалась в работах [3–5]. Полученные в [3–5] результаты были использованы при исследовании проблемы влияния термоупругих свойств компонентов на температуру плавления металлических нитевидных нанокристаллов, электрохимически осажденных в поры анодного оксида алюминия [14, 15]. Однако основным недостатком

подхода, использованного в [3–5], являлось то, что в этих моделях не учитывалась неравномерность нагревания отдельных компонентов композитов. В работе [16] в рамках структурной модели двухкомпонентного матричного композита с ориентированными неизометричными включениями, рассмотренной в [5], получена усовершенствованная формула для расчета средних по материалу напряжений, с помощью которой возможен учет неравномерности нагревания включений и матрицы. Однако в [16] не было уделено внимания важному для практики варианту армирования композита, а именно случаю, когда включения представляют собой волокна.

1. Постановка задачи и построение модели

В работе рассматривается двухкомпонентный матричный композит с ортогонально армированными параллельно фиксированной плоскости волокнами. Полагается, что компоненты указанного неоднородного материала изотропны. Целью настоящей работы является:

а) построение модели, опирающейся на результаты работы [16] и позволяющей оценить влияние локальных напряжений в композите, обусловленных изменениями объемов элементов неоднородности, на средние по материалу напряжения;

б) проведение численных расчетов по определению значений средних по материалу напряжений в направлениях осей лабораторной системы координат в зависимости от состава компонентов композита, объемной доли волокон, а также от вариаций величины скачка температуры в волокнах и матрице.

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 обратности оператора концентрации напряжений $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ (здесь и далее \mathbf{r} — радиус-вектор произвольной точки среды) [3–5, 17]. Оператор $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ является тензором четвертого ранга, связывающим локальные напряжения $\sigma_{ij}(\mathbf{r})$ в каждом элементе неоднородности материала с внешними (средними) напряжениями $\langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$, приложенными к композиту

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = K_{ijkl}^\sigma(\mathbf{r}) \langle \sigma_{kl}(\mathbf{r}) \rangle, \quad (1.1)$$

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

где угловые скобки означают усреднение по объему [18].

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

$$\langle \mathbf{b} \rangle = \sum_s v_s \langle \mathbf{b}_s \rangle, \quad (1.2)$$

где v_s — объемное содержание компонента s -го типа, а \mathbf{b}_s — соответствующая указанному компоненту случайная величина, $\sum_s v_s = 1$.

В частности, для рассматриваемого в работе композита (здесь и далее индекс «в» соответствует волокнам, индекс «м» — матрице)

$$\langle \mathbf{b} \rangle = (v_{\text{в}})_1 \langle \mathbf{b}_{\text{в}} \rangle_1 + (v_{\text{в}})_2 \langle \mathbf{b}_{\text{в}} \rangle_2 + v_{\text{м}} \mathbf{b}_{\text{м}},$$

где значение нижнего индекса 1 соответствует волокнам, ориентированным в направлении x , а значение нижнего индекса 2 — в направлении y ; $(v_{\text{в}})_1 + (v_{\text{в}})_2 + v_{\text{м}} = 1$.

Для приближений, учитывающих взаимодействие включений, оператор $\mathbf{K}^\sigma(\mathbf{r})$ можно получить, решая систему стохастических дифференциальных уравнений равновесия [3–5, 17]. Используя метод функций Грина, с помощью обобщенного сингулярного приближения теории случайных полей [18] и специально вводимого однородного тела сравнения, выражение для оператора концентрации напряжений имеет вид (индексы опущены) [3–5, 17]

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

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 «с»: $\mathbf{c}''(\mathbf{r}) = \mathbf{c}(\mathbf{r}) - \mathbf{c}^{\text{с}}$; \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 [18]:

$$g_{ijkl} = a_i(kl)(j). \quad (1.3)$$

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 $t_{il} = c_{ijkl}^{\text{с}} n_k n_j$; 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 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 (1.3) для компонент g_{ijkl} тензора $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ в круглые скобки, осуществляется операция симметризации. В качестве параметров тела сравнения в работе используются упругие модули матрицы [19].

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 $\Delta T(\mathbf{r}) = \Delta T_{\text{м}}$, $\alpha(\mathbf{r}) = \alpha_{\text{м}}$, если элементом неоднородности является матрица, $\Delta T(\mathbf{r}) = (\Delta T_{\text{в}})_1$, $\alpha(\mathbf{r}) = (\alpha_{\text{в}})_1$ или $\Delta T(\mathbf{r}) = (\Delta T_{\text{в}})_2$, $\alpha(\mathbf{r}) = (\alpha_{\text{в}})_2$, если элементы неоднородности — волокна, ориентированные вдоль x или y соответственно. Тогда, исходя из определения (1.1) 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

$$\langle \sigma_{\text{м}} \rangle = (\mathbf{K}_{\text{м}}^\sigma)^{-1} \mathbf{c}_{\text{м}} \alpha_{\text{м}} \Delta T_{\text{м}} \delta_{kl},$$

$$\langle \sigma_{\text{в}} \rangle_1 = (\mathbf{K}_{\text{в}}^\sigma)_1^{-1} (\mathbf{c}_{\text{в}})_1 (\alpha_{\text{в}})_1 (\Delta T_{\text{в}})_1 \delta_{kl},$$

$$\langle \sigma_{\text{в}} \rangle_2 = (\mathbf{K}_{\text{в}}^\sigma)_2^{-1} (\mathbf{c}_{\text{в}})_2 (\alpha_{\text{в}})_2 (\Delta T_{\text{в}})_2 \delta_{kl}.$$

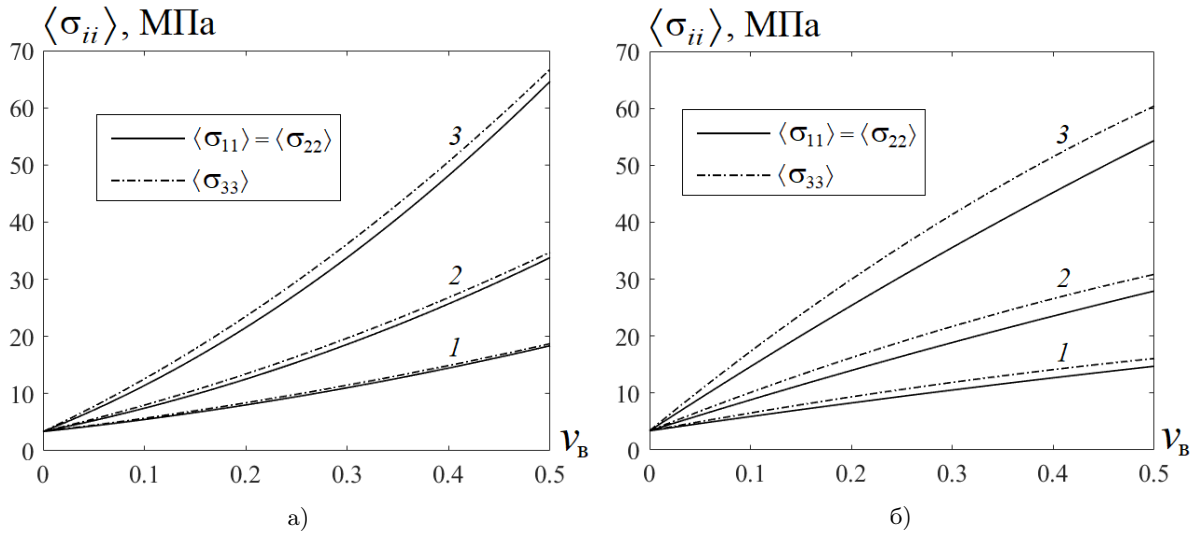


Рис. 1. Зависимости значений компонент $\langle \sigma_{ii} \rangle$ ($i = 1, 2, 3$) тензора $\langle \sigma \rangle$ от изменений объемного содержания v_B волокон меди (а), алюминия (б) и величины $(\Delta T_B)_1 = (\Delta T_B)_2$ °C при $\Delta T_M = 5^\circ\text{C}$: 1 — $(\Delta T_B)_1 = (\Delta T_B)_2 = 5^\circ\text{C}$; 2 — $(\Delta T_B)_1 = (\Delta T_B)_2 = 10^\circ\text{C}$; 3 — $(\Delta T_B)_1 = (\Delta T_B)_2 = 20^\circ\text{C}$

Отсюда, учитывая (1.2), среднее напряжение по всему неоднородному материалу будет определяться формулой

$$\begin{aligned} \langle \sigma \rangle = & \left((v_B)_1 (\mathbf{K}_B^\sigma)^{-1} (\mathbf{c}_B)_1 (\alpha_B)_1 (\Delta T_B)_1 + \right. \\ & + (v_B)_2 (\mathbf{K}_B^\sigma)^{-1} (\mathbf{c}_B)_2 (\alpha_B)_2 (\Delta T_B)_2 + \\ & \left. + v_M (\mathbf{K}_M^\sigma)^{-1} \mathbf{c}_M \alpha_M \Delta T_M \right) \delta_{kl}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Соотношение (1.4) учитывает не только состав, ориентацию волокон в матрице, термоупругие характеристики и объемные доли компонентов композитов, но и такой фактор как отличие в величине изменения (скачка) температуры для волокон и матрицы.

2. Проведение модельных расчетов

В работе по соотношению (1.4) были проведены модельные расчеты компонент $\langle \sigma_{ii} \rangle$ ($i = 1, 2, 3$) тензора $\langle \sigma \rangle$ для двух видов композитов с ориентированными волокнами. Первый вид — композиты с волокнами меди (модуль Юнга $E = 120$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,38$, $\alpha = 1,75 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$), второй — с волокнами алюминия ($E = 70$ ГПа, $\nu = 0,31$, ТКЛР $\alpha = 2,53 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). Матрицей в обоих случаях выступал диоксид кремния ($E = 73$ ГПа, $\nu = 0,17$, $\alpha = 0,61 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) [20, 21]. При проведении расчетов в операциях над тензорами использовалась их матричная форма записи [18].

Были исследованы зависимости компонент $\langle \sigma_{ii} \rangle$ тензора $\langle \sigma \rangle$ от объемного содержания

волокон $v_B = (v_B)_1 + (v_B)_2$, а также от вариаций величины изменения температуры $\Delta T(\mathbf{r})$. 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. $(v_B)_1 = (v_B)_2$.

Результаты модельных расчетов компонент $\langle \sigma_{ii} \rangle$ ($i = 1, 2, 3$) тензора $\langle \sigma \rangle$ представлены на рис. 1. При этом на рис. 1а расчетные зависимости приведены для композитов первого вида (диоксид кремния — медь), а на рис. 1б — для второго (диоксид кремния — алюминий). Отметим, что при расчетах выполнялось соотношение $\langle \sigma_{11} \rangle = \langle \sigma_{22} \rangle$ в силу структуры рассматриваемых материалов.

Заключение

В работе построена модель, позволяющая прогнозировать влияние локальных (внутренних) напряжений, обусловленных изменениями объемов элементов неоднородности двухкомпонентных матричных композитов с ортогонально армированными (параллельно фиксированной плоскости) волокнами, на

средние по материалу напряжения. Разработанная модель позволяет учитывать состав, ориентацию волокон в матрице, термоупругие характеристики и концентрацию элементов неоднородности композита, а также такой фактор как отличие в величине изменения (скачка) температуры для волокон и матрицы.

Используя построенную модель, для композитов с матрицей диоксида кремния и ориентированными волокнами (медь, алюминий) в работе проведены численные расчеты по определению значений средних по материалу напряжений в направлениях осей лабораторной системы координат. Исследованы зависимости указанных значений от объемной доли волокон, а также от вариаций величины скачка температуры в волокнах и матрице. Результаты расчетов показали, что все рассмотренные в модели факторы оказывают существенное влияние на значения компонент $\langle \sigma_{ii} \rangle$ ($i = 1, 2, 3$) тензора $\langle \sigma \rangle$. Увеличение концентрации волокон v_v и величины $\Delta T(\mathbf{r})$ приводит к значительному росту значений $\langle \sigma_{ii} \rangle$, причем характер изменения нелинеен. Кроме того, при рассмотренном способе армирования средние напряжения $\langle \sigma_{33} \rangle$ в направлении вертикальной оси z превышают аналогичные значения напряжений $\langle \sigma_{11} \rangle = \langle \sigma_{22} \rangle$ вдоль горизонтальной плоскости xy . Особенно сильно указанные отличия проявляются в композитах, армированных волокнами алюминия. Это необходимо учитывать при многоуровневой металлизации интегральных схем.

Опираясь на построенную модель, в дальнейшем возможна разработка теоретического подхода к прогнозированию предельных состояний композитов, возникающих в результате термодинамических воздействий. Это позволит уже на стадии проектирования предотвращать ситуации, приводящие в выходу из строя изделий электронной техники.

Литература

1. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2018. 640 с.
2. Шевченко В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов. М.: Изд-во МГУ, 2010. 99 с.
3. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Сычев А.П., Яковлев В.Б. Напряженное состояние композитных материалов в условиях воздействия термодинамических факторов // Вестник Южного научного центра РАН. 2005. Т. 1. №4. С. 9–13.
4. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Сычев А.П., Яковлев В.Б. Влияние микроструктуры и термоупругих характеристик компонентов на средние напряжения в волокнистых композитных материалах // Материалы, технологии, инструменты. 2009. Т. 14. №2. С. 12–15.
5. 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. (Переводная версия: Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Sorokin A.I., Sychev A.P., and 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. P. 258–262. DOI: 10.1134/S1029959918030104)
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., Ебдокимов В.Л., Личманов И.О., Мочалов А.И., Сулиммин 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., Климовицкий А.Г., Мочалов А.И., Сулиммин А.Д. Использование эффекта понижения температуры плавления тонких пленок меди в процессе заполнения канавок и контактных окон для технологии многоуровневой металлизации кремниевых ИС // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2004. №6. С. 3–9.
11. Громов Д.Г., Мочалов А.И., Сулиммин А.Д., Шевяков В.И. Металлизация ультрабольших интегральных схем. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 277 с.
12. Патент РФ 2420827. Способ изготовления медной многоуровневой металлизации СБИС / Красников Г.Я., Валеев А.С., Шелепин Н.А., Гуцин О.П., Воротилов К.А., Васильев В.А., Аверкин С.Н. Заявл. 11.01.2010. Опубл. 10.06.2011. Бюлл. №16.
13. Стоянов А.А., Зенин В.В., Новокрещенова Е.П., Грибанов М.А. Сборка изделий микроэлектроники с использованием металлиза-

- ции и проволоки из меди // Вестник ВГТУ. 2014. Т. 10. №5-1. С. 98–104.
14. Шилыева Ю.И., Бардушкин В.В., Гаврилов С.А., Силибин М.В., Яковлев В.Б., Боргардт Н.И., Волков Р.Л., Смирнов Д.И. О прогнозировании температуры плавления металлических нитевидных нанокристаллов, электрохимически осажденных в поры анодного оксида алюминия // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2014. №3. С. 84–94.
 15. Бардушкин В.В., Кириллов Д.А., Шилыева Ю.И., Гаврилов С.А., Яковлев В.Б., Силибин М.В. Влияние термоупругих свойств компонентов на температуру плавления нитевидных наночастиц Cu, Ag и Au в матрице анодного Al₂O₃ // Журнал физической химии. 2017. Т. 91. №6. С. 1030–1036. DOI: 10.7868/S0044453717060048 (Переводная версия: Bardushkin V.V., Kirillov D.A., Shilyaeva Yu.I., Gavrilov S.A., Yakovlev V.B., and Silibin M.V. Effect of the thermoelastic properties of components on the melting point of filamentary nanoparticles of Cu, Ag, and Au in the matrix of anodic Al₂O₃ // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2017. Vol. 91. No. 6. P. 1099–1104. DOI: 10.1134/S0036024417060036)
 16. Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Кочетыгов А.А., Петров Н.И. Напряженное состояние матричных структур в условиях воздействия термодинамических факторов // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2019. №1. С. 61–66.
 17. 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.
 18. Шермергор Т.Д. Теория упругости микроненодородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
 19. Хорошун Л.П., Маслов Б.П., Лещенко П.В. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. Киев: Наукова думка, 1989. 207 с.
 20. Физические величины: Справочник. / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
 21. Деменко В.Ф. Таблицы механических свойств конструкционных материалов. Харьков: Издво ХАИ, 2014. 7 с.
 2. Shevchenko, V.G. *Fundamentals of the physics of polymer composite materials*. MSU Publ., Moscow, 2010. (In Russian)
 3. Kolesnikov, V.I., Bardushkin, V.V., Sychev, A.P., Yakovlev, V.B. Stress condition of composite materials under influence of thermodynamic factors. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2005, vol. 1, no. 4, pp. 9–13. (In Russian)
 4. Kolesnikov, V.I., Bardushkin, V.V., Sychev, A.P., Yakovlev, V.B. Influence of the microstructure and thermoelastic characteristics of components on average stresses in fibrous composites. *Materialy, tekhnologii, instrumenty* [Materials, technologies, tools], 2009, vol. 14. no. 2, pp. 12–15. (In Russian)
 5. 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 (In Russian)
 6. Gromov, D.G. *Materials and processes for the formation of multilayer metallization of silicon VLSIC*, tech. sci. doct. diss. Moscow, 2000. (In Russian)
 7. Klimovitsky, A.G., Gromov, D.G., Evdokimov, V.L., Lichmanov, I.O., Mochalov, A.I., Sulimin, A.D. Materials for metallization of silicon VLSIC. *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic industry], 2002, no. 1, pp. 60–66. (In Russian)
 8. Klimovitsky, A.G. *Development of materials and processes for the formation of a metallization system for super-large integrated circuits of the submicron level*, tech. sci. cand. diss. Moscow, 2004. (In Russian)
 9. Smolin, V.K. Features of the use of aluminum metallization in integrated circuits. *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2004, vol. 33, no. 1, pp. 10–16. (In Russian)
 10. Gromov, D.G., Klimovitsky, A.G., Mochalov, A.I., Sulimin, A.D. The use of the effect of lowering the melting temperature of thin films of copper in the process of filling the grooves and contact windows for the technology of multilevel metallization of silicon IC. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of Higher Educational Institutions. Electronics], 2004, no. 6, pp. 3–9. (In Russian)
 11. Gromov, D.G., Mochalov, A.I., Sulimin, A.D., Shevyakov, V.I. *Metallization of ultra-large integrated circuits*. BINOM. Laboratoriya znaniy, Moscow, 2009. (In Russian)
 12. Patent RU 2420827. Manufacturing method of multi-level copper metallisation of VLSIC / Krasnikov, G.Ya., Valeev, A.S., Shelepin, N.A., Gushchin, O.P., Vorotilov, K.A., Vasiliev, V.A.,

References

- Averkin, S.N. Ann. 11.01.2010. Publ. 10.06.2011. Bull. no. 16. (In Russian)
13. Stoyanov, A.A., Zenin, V.V., Novokreschenova, E.P., Griбанov, M.A. Assembly of microelectronics products using metallization and copper wire. *Vestnik VGTU* [Bulletin of VSTU], 2014, vol. 10, no. 5-1, pp. 98–104. (In Russian)
 14. Shilyaeva, Yu.I., Bardushkin, V.V., Gavrilov, S.A., Silibin, M.V., Yakovlev, V.B., Borgardt, N.I., Volkov, R.L., Smirnov, D.I. About the prediction of melting temperature of metal nanowires electrochemically deposited into the pores of anodic aluminum oxide. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2014, no. 3, pp. 84–94. (In Russian)
 15. Bardushkin, V.V., Kirillov, D.A., Shilyaeva, Yu.I., Gavrilov, S.A., Yakovlev, V.B., Silibin, M.V. Effect of the thermoelastic properties of components on the melting point of filamentary nanoparticles of Cu, Ag, and Au in the matrix of anodic Al₂O₃. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2017, vol. 91, no. 6, pp. 1099–1104. DOI: 10.1134/S0036024417060036 (In Russian)
 16. Bardushkin, V.V., Yakovlev, V.B., Kochetygov, A.A., Petrov, N.I. 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 Russian)
 17. Kolesnikov, V.I., Yakovlev, V.B., Bardushkin, V.V., Sychev, A.P. 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 Russian)
 18. Shermergor, T.D. *Micromechanics of inhomogeneous medium*. Nauka, Moscow, 1977. (In Russian)
 19. Khoroshun, L.P., Maslov, B.P., Leshchenko, P.V. *Predicting of the effective properties of piezoelectric composite materials*. Naukova Dumka, Kiev, 1989. (In Russian)
 20. Grigor'ev, I.S., Meilikhov, E.Z. (eds.) *Physical Quantities: A Handbook*. Energoatomizdat, Moscow, 1991. (In Russian)
 21. Demenko, V.F. *Tables of mechanical properties of structural materials*. KhAI Publ., Khar'kov, 2014. (In Russian)