

УДК 539.3:620.172/.178.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТРЕХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Ю.И. Димитриенко¹, Н.Н. Федонюк², Е.А. Губарева¹,
С.В. Сборщиков¹, А.А. Прозоровский¹, В.С. Ерасов³, Н.О. Яковлев³

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: dimit@bmstu.ru; gubareva_ea@pochta.ru; servasbor@gmail.com;
prozorovsky@yandex.ru

²ФГУП “Крыловский государственный научный центр”, Санкт-Петербург,
Российская Федерация
e-mail: fednik46@yahoo.com

³ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных
материалов” ГНЦ РФ, Москва, Российская Федерация
e-mail: nick_62@mail.ru

Разработана математическая модель многоуровневой структуры трехслойного материала с сотовым наполнителем на основе тканевого композита, позволяющая рассчитывать эффективные упругие и прочностные характеристики материала. Модель основана на использовании метода асимптотического осреднения иерархических периодических структур. Представлены примеры численных конечно-элементных расчетов сотовых структур. Разработана технология изготовления трехслойного сотового композиционного материала на основе стеклотканей, модифицированного винилэфирного связующего и стеклосотопласта с применением метода инфузии. Проведено детальное компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния панели из трехслойного сотового материала при четырехточечном изгибе, которое позволило выявить особенности разрушения такого типа конструкций вследствие локальных напряжений сдвига в зонах прилегания нагрузки.

Ключевые слова: трехслойный сотовый композиционный материал, метод асимптотического осреднения, многоуровневая структура, компьютерное моделирование, метод конечного элемента, физико-механические характеристики, четырехточечный изгиб, метод инфузии.

MODELING AND DEVELOPMENT OF THREE-LAYER SANDWICH COMPOSITE MATERIALS WITH HONEYCOMB CORE

Yu.I. Dimitrienko¹, N.N. Fedonyuk², E.A. Gubareva¹,
S.V. Sbornichikov¹, A.A. Prozorovskiy¹, V.S. Erasov³, N.O. Yakovlev³

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: dimit@bmstu.ru; gubareva_ea@pochta.ru; servasbor@gmail.com;
prozorovsky@yandex.ru

²Federal State Unitary Enterprise “Krylov State Research Center”, St. Petersburg,
Russian Federation
e-mail: fednik46@yahoo.com

³Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of
Aviation Materials” State Research Center RF, Moscow, Russian Federation
e-mail: nick_62@mail.ru

Mathematical model of multi-level structure of three-layer sandwich material with honeycomb core based on woven composite are developed. This model allows calculating the effective elastic and the strength characteristics of the material. Model is based on the use of asymptotic homogenization method of hierarchical periodic structures. Samples of numerical finite element computations of honeycomb structures are presented. The manufacture technology of sandwich honeycomb composite material based on glass-fiber clothes, modified vinyl-aether binder and glass-fiber-reinforced honeycomb is developed using infusion method. The detailed computer simulation of stress-strain state for panel made of three-layer honeycomb material at four-point bending was performed. It allowed revealing destruction features of such type of constructions due to local shear stresses within working area of power load.

Keywords: sandwich honeycomb composite material, asymptotic homogenization method, multi-level structure, computer modeling, finite element method, physical and mechanical properties, four-point bending, infusion technology.

Введение. Трехслойные (сэндвичевы) конструкции [1, 2], состоящие из внешних силовых обшивок и облегченного заполнителя, в качестве которого используются сотовые элементы, пенопласты, подкрепляющие элементы различной геометрической формы широко применяются в различных областях техники (в авиации, судостроении, машиностроении и др.). Как правило, при проектировании трехслойных конструкций требуется подобрать такое соотношение толщин обшивок и заполнителя, которое обеспечило бы заданные значения изгибной жесткости при минимальной плотности материала и выполнение требований по отсутствию разрушений в конструкции при комплексном воздействии изгибных напряжений и напряжений сдвига. В настоящее время расчет напряженно-деформированного состояния трехслойных сотовых конструкций осуществляется на основе теории изгиба трехслойных пластин [3, 4], а расчет жесткостей и прочности — на основе приближенных аналитических методов, реализованных на нескольких допущениях относительно характера распределения напряжений и деформаций в обшивке и заполнителе. Указанные подходы не могут обеспечить требуемой точности результатов расчетов, особенно прочности на межслойные сдвиг и изгиб. Цель настоящей работы — разработка методики расчета упруго-прочностных характеристик трехслойных сотовых конструкций (ТСК), проектирование с ее помощью ТСК на основе стеклопластиковых обшивок и стеклосотопласта, а также разработка технологии изготовления ТСК с учетом рекомендаций по результатам моделирования конструкции.

Модель многоуровневой структуры ТСК. Трехслойная сотовая конструкция на основе стеклосотопласта имеет ярко выраженную трехуровневую структуру (рис. 1). Первый уровень представляет многослойный материал, состоящий из слоев внешней и внутренней обшивок, а также сотового заполнителя. Второй структурный уровень образован ячейками периодичности (ЯП) сотового заполнителя ЯП2а, а также ячейками периодичности тканевых обшивок ЯП2б, третий

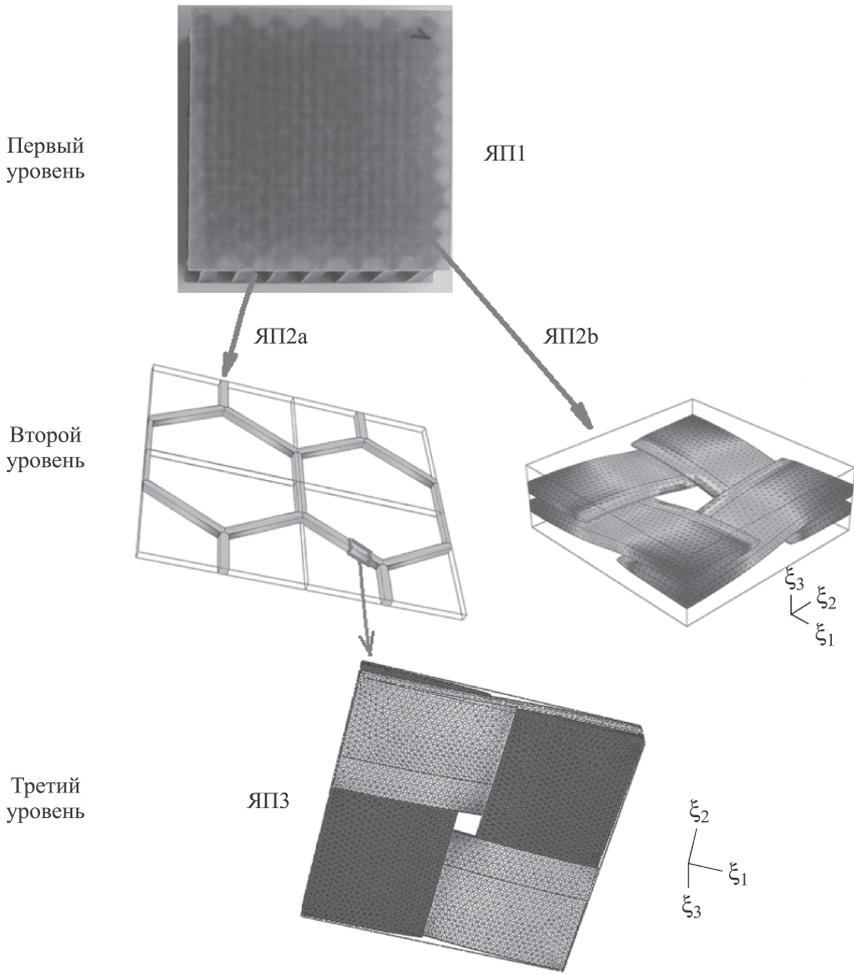


Рис. 1. Модель трехуровневой структуры ТСК

уровень — ячейками периодичности тканевого композита ЯПЗ, образующего стенки сотового заполнителя.

Согласно методу асимптотического осреднения (МАО) для вычисления эффективных упругих и прочностных характеристик многоуровневых структур каждой ЯП решается специальная локальная задача теории упругости.

Локальная задача L_{pq} для ЯПЗ V_1^ξ , представляющей собой фрагмент ткани, образованный переплетением двух систем волокон (см. рис. 1), имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{ij(pq)/j} &= 0 \text{ в } \tilde{V}_\xi; \\
 \sigma_{ij(pq)} &= C_{ijkl}(\xi_s)\varepsilon_{kl(pq)} \text{ в } \tilde{V}_\xi \cup \Sigma'_s \cup \Sigma_s; \\
 \varepsilon_{ij(pq)} &= \frac{1}{2} (U_{i(pq)/j} + U_{j(pq)/i}) \text{ в } \tilde{V}_\xi; \\
 [U_{i(pq)}] &= 0, \quad [\sigma_{ij(pq)}]n_j = 0 \text{ на } \tilde{\Sigma}_{\xi\alpha N},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где p, q — индексы локальных задач, изменяющиеся в пределах от 1 до 3 (всего девять различных задач L_{pq}); $\sigma_{ij(pq)}, \varepsilon_{kl(pq)}$ — компоненты тензоров напряжений и деформаций в \tilde{V}_ξ ; $U_{i(pq)}(\xi_s)$ — компоненты векторов перемещений (искомые неизвестные функции задачи); ξ_s — “локальные” безразмерные декартовы координаты в 1/8 ЯП, значения которых изменяются на отрезке $0 \leq \xi_s \leq 0,5$; $/_i = \partial/\partial\xi_i$ — операторы дифференцирования по локальным координатам; $[U_{i(pq)}]$ — скачки функций на поверхностях раздела $\tilde{\Sigma}_{\xi\alpha N}$ компонентов композита, $\alpha = 1, \dots, N - 1$ — номер слоя; $C_{ijkl}(\xi_s)$ — компоненты тензоров модулей упругости структурных компонентов композита (армирующих нитей и матрицы).

Компоненты тензора модулей упругости нити в единой системе координат $O\xi_i$ ЯПЗ вычисляются по формулам

$$C_{ijkl}^{(\alpha)}(\xi^l) = C_{ijkl}^{(\alpha)l} Q_i^{(\alpha)m}(\xi_k) Q_j^{(\alpha)n}(\xi_k) Q_k^{(\alpha)s}(\xi_k) Q_l^{(\alpha)r}(\xi_k),$$

где $Q_i^{(\alpha)m}(\xi_k)$ — матрицы поворота на угол $\varphi_\alpha(\xi_k)$ из единой системы координат к собственной системе $O\xi'_i$, связанной с ориентацией нити; $C_{ijkl}^{(\alpha)l}$ — компоненты тензора модулей упругости прямолинейной нити.

Система (1) дополняется граничными условиями на торцевых поверхностях $\Sigma'_s = \{\xi_s = 0,5\}$ 1/8 ЯПЗ [5, 6]:

$$\begin{aligned} \text{на } \Sigma'_i: \quad & U_{i(pp)} = \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_{pp} \delta_{ip}, \quad U_{j(pp)/i} = 0, \quad U_{k(pp)/i} = 0, \quad i \neq j \neq k \neq i; \\ \text{на } \Sigma'_j: \quad & U_{i(pq)} = \frac{1}{4} \bar{\varepsilon}_{pq} \delta_{ip}, \quad U_{j(pq)/j} = 0, \quad U_{k(pq)} = 0, \quad i, j = \{p, q\}; \\ \text{на } \Sigma'_k: \quad & U_{i(pq)/k} = 0, \quad U_{j(pq)/k} = 0, \quad U_{k(pq)} = 0, \quad i \neq j \neq k \neq i, \quad p \neq q. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\bar{\varepsilon}_{pq}$ — заданные компоненты осредненного тензора деформации, являющиеся входными данными для задачи L_{pq} . Граничные условия на плоскостях симметрии $\Sigma_s = \{\xi_s = 0\}$ аналогичны соотношениям (2), в которых следует принять $\bar{\varepsilon}_{pq} = 0$.

После численного решения задач L_{pq} находим поля перемещений $U_{i(pq)}^\alpha$ и напряжений $\sigma_{ij(pq)}(\xi_k)$ в ЯПЗ при заданных значениях средних деформаций $\bar{\varepsilon}_{kl}$. С их помощью можно определить компоненты тензора эффективных модулей упругости для ЯПЗ $\bar{C}_{ijpq} = \bar{\sigma}_{ij(pq)}/\bar{\varepsilon}_{pq}$ (по p и q суммирования нет), средние напряжения в ЯПЗ составляют

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \sum_{p,q}^3 \bar{\sigma}_{ij(pq)},$$

$$\text{где } \bar{\sigma}_{ij(pq)} = \langle \sigma_{ij(pq)} \rangle = \int_{\tilde{V}_\xi} \sigma_{ij(pq)}(\xi_k) dV_\xi.$$

Далее рассчитываем эффективный тензор упругих податливостей $\bar{\Pi}_{ijpq}$, являющийся обратным к тензору \bar{C}_{ijpq} .

Компоненты тензоров концентраций напряжений B_{ijkl}^α , связывающие микронапряжения в матрице и нитях со средними напряжениями в композите $\sigma_{ij}^{(\alpha)}(\xi_k) = B_{ijkl}^{(\alpha)}(\xi_k)\bar{\sigma}_{kl}$, $\xi_k \in \tilde{V}_{\xi\alpha}$, $\alpha = 1, \dots, 3$, вычисляются по следующим формулам [7–10]:

$$B_{ijpq}^{(\alpha)}(\xi_k) = \sigma_{ij(kl)}^{(\alpha)}(\xi_k)\bar{\Pi}_{klpq}, \quad \xi_k \in \tilde{V}_{\xi\alpha}, \quad \alpha = 1, \dots, 3,$$

где $\sigma_{ij}^{(\alpha)}(\xi_k) = \sum_{p,q}^3 \sigma_{ij(pq)}^{(\alpha)}(\xi_k)$. Напряжения в нитях $\sigma_{ij}^{(\alpha)'}(\xi_k)$ в собственной системе координат $O\xi_i^l$ находят с помощью матриц поворота: $\sigma_{ij}^{(\alpha)'}(\xi_k) = \sigma_{ln}^{(\alpha)}(\xi_k)Q_i^{(\alpha)l}(\xi_k)Q_j^{(\alpha)n}(\xi_k)$.

Критерий прочности изотропной матрицы в составе ЯПЗ (вне нитей) выберем в виде модифицированного критерия прочности типа Писаренко – Лебедева [10], который образован совокупностью трех отдельных критериев разрушения: при разрушении и сжатии прочность описывается критерием Мизеса; при совместном нагружении – критерием типа Ягна:

$$\sigma_u^{(3)} = \sigma_{Tm}, \quad \text{если } \sigma^{(3)} > \sigma_{Tm}; \quad \sigma_u^{(3)} = \sigma_{Cm}, \quad \text{если } \sigma^{(3)} < -\sigma_{Cm};$$

$$B_1\sigma^{(3)} + B_0\sigma^{(3)2} + B_2\sigma_u^{(3)2} = 1, \quad \text{если } -\sigma_{Cm} < \sigma^{(3)} < \sigma_{Tm},$$

где $B_1 = \frac{\sigma_{Cm} - \sigma_{Tm}}{\sigma_{Cm}\sigma_{Tm}}$, $B_0 = \frac{1}{\sigma_{Cm}\sigma_{Tm}} - \frac{1}{3\sigma_{Sm}^2}$, $B_2 = \frac{1}{3\sigma_{Sm}^2}$ – коэффициенты; $\sigma^{(3)} = \sigma_{ii}^{(3)}$ и $\sigma_u^{(3)}$ – первый и второй инварианты тензора напряжений [11]; $\sigma_{Cm}, \sigma_{Tm}, \sigma_{Sm}$ – пределы прочности матрицы на сжатие, растяжение и сдвиг.

Критерий прочности α нити формулируется в собственной системе координат [12]: $z_1^{(\alpha)}(\sigma_{ij}^{(\alpha)'}) = 1$ или $z_2^{(\alpha)}(\sigma_{ij}^{(\alpha)'}) = 1$, где $z_1^{(\alpha)}$, $z_2^{(\alpha)}$ – параметры, описывающие накопление повреждений вследствие разрыва отдельных моноволокон в нити и растрескивания матрицы в составе нити без разрушения моноволокон соответственно,

$$z_1^{(\alpha)} = \frac{|\sigma_{\alpha\alpha}^{(\alpha)'}| + \sigma_{\alpha\alpha}^{(\alpha)'}}{2\sigma_{Tl}} + \frac{|\sigma_{\alpha\alpha}^{(\alpha)'}| - \sigma_{\alpha\alpha}^{(\alpha)'}}{2\sigma_{Cl}}, \quad \alpha = 1, 2;$$

$$z_2^{(\alpha)} = \frac{1}{12\sigma_{St}^2} (Y_2^2 + 12k_Y Y_4^2 + 3Y_3^2) + \left(\frac{1}{\sigma_{Ct}^2} - \frac{1}{3\sigma_{St}^2} \right) Y_-^2 + \left(\frac{1}{\sigma_{Tt}^2} - \frac{1}{3\sigma_{St}^2} \right) Y_+^2. \quad (3)$$

Здесь обозначены инварианты тензора напряжений $\sigma_{ij}^{(\alpha)'}$ относительно

группы трансверсальной изотропии [13]

$$Y_2 = \sigma_{33}^{(\alpha)'} + \sigma_{\beta\beta}^{(\alpha)'}; \quad Y_3^2 = \left(\sigma_{33}^{(\alpha)'} - \sigma_{\beta\beta}^{(\alpha)'} \right)^2 + 4\sigma_{3\beta}^{(\alpha)2'}; \quad Y_4^2 = \sigma_{3\alpha}^{(\alpha)2'} + \sigma_{12}^{(\alpha)2'}; \quad (4)$$

$$Y_{\pm} = \frac{|Y_2| \pm Y_2}{2}; \quad k_Y = \left(\frac{B_{m3}}{B_{m1}} \right)^2.$$

В формулах (3) σ_{Tt} , σ_{Ct} , σ_{St} , σ_{Sl} , σ_{Cl} , σ_{Tl} — прочности нити при поперечном растяжении; поперечном сжатии, поперечном сдвиге, продольном сдвиге, продольном сжатии, при продольном растяжении. Перечисленные величины определяют по формулам, приведенным в работе [12].

Для предельных значений средних напряжений $\bar{\sigma}_{kl}$, при которых происходит первое микроразрушение в матрице или в нитях в какой-либо одной точке $\xi_{k*} \in V_{\xi\alpha}$ в момент времени t^* , реализуем процесс линейного нагружения $\bar{\sigma}_{kl}(t) = \tilde{\sigma}_{kl}t$ композита, где $\tilde{\sigma}_{kl}$ — компоненты тензора скоростей изменения напряжений. Тогда из (3) и (4) получаем условие первоначального разрушения композита

$$\begin{aligned} \max\{ & z_1^{(\alpha)}(Q_i^{(\alpha)l}(\xi_r^*)Q_j^{(\alpha)n}(\xi_r^*)B_{lnkm}^{(\alpha)}(\xi_r^*)\bar{\sigma}_{km}(t^*)), \\ & z_2^{(\alpha)}(Q_i^{(\alpha)l}(\xi_r^*)Q_j^{(\alpha)n}(\xi_r^*)B_{lnkm}^{(\alpha)}(\xi_r^*)\bar{\sigma}_{km}(t^*), \\ & z^{(3)}(B_{lnkm}^{(3)}(\xi_r^*)\bar{\sigma}_{km}(t^*))\} = 1, \end{aligned} \quad (5)$$

где ξ_r^* — координаты точки в ЯП, в которой происходит выполнение условия (5); t^* — момент времени, при котором впервые выполняется условие (5); $\bar{\sigma}_{km}(t^*)$ — предельные напряжения, при которых происходит первичное разрушение композита. По мере дальнейшего увеличения значений средних напряжений $\bar{\sigma}_{km}(t)$ условие разрушения (5) выполняется в большем числе точек ξ_r^* ЯП, т.е. происходит процесс распространения микроразрушения. При тех значениях $\bar{\sigma}_{km}(t^{**})$, при которых реализуется условие

$$\max\{z_2^{(\alpha)}(Q_i^{(\alpha)l}(\xi_r^{**})Q_j^{(\alpha)n}(\xi_r^{**})B_{lnkm}^{(\alpha)}(\xi_r^{**})\bar{\sigma}_{km}(t^{**}))\} = 1,$$

происходит частичное разрушение нитей за счет разрушения находящейся в них части матрицы. При значениях $\bar{\sigma}_{km}(t^{***})$, при которых выполняется условие

$$\max\{z_1^{(\alpha)}(Q_i^{(\alpha)l}(\xi_r^{***})Q_j^{(\alpha)n}(\xi_r^{***})B_{lnkm}^{(\alpha)}(\xi_r^{***})\bar{\sigma}_{km}(t^{***}))\} = 1,$$

происходит полное разрушение композита вследствие разрыва моноволокон в нитях.

Нагружаем композит по девяти различным лучам нагружения: по трем главным направлениям в пространстве напряжений $\tilde{\sigma}_{\alpha\alpha} > 0$ (положительное и отрицательное направления), остальные $\tilde{\sigma}_{kl} = 0$,

$\alpha = 1, \dots, 3$; и по трем направлениям сдвига $\tilde{\sigma}_{\alpha\beta} \neq 0$ ($\alpha \neq \beta$), остальные $\tilde{\sigma}_{kl} = 0$, $\alpha = 1, \dots, 3$. Рассчитывая с учетом методики, приведенной выше, предельные значения соответствующих напряжений $\bar{\sigma}_{km}(t^{***})$ вдоль каждого луча, находим девять эффективных пределов прочности тканевого композита, соответствующего ЯПЗ:

$$\begin{aligned} \sigma_{T\alpha} &= \bar{\sigma}_{\alpha\alpha}(t^{***}) \text{ при } \tilde{\sigma}_{\alpha\alpha} > 0; \\ \sigma_{C\alpha} &= |\bar{\sigma}_{\alpha\alpha}(t^{***})| \text{ при } \tilde{\sigma}_{\alpha\alpha} < 0, \quad \sigma_{S\alpha\beta} = \bar{\sigma}_{\alpha\beta}(t^{***}). \end{aligned}$$

Методика расчета упругих и прочностных характеристик тканевых обшивок МПКМ ДКЗ для ЯП2b совершенно аналогична изложенной методике для ЯПЗ.

Для расчета эффективных упругих характеристик для ЯП2a также используется решение локальной задачи (1), (2), в которой вместо поротового заполнителя рассматривается фиктивная упругая изотропная среда с модулем упругости, в 3 раза меньшим модуля упругости матрицы тканевого сотового заполнителя. Алгоритм решения локальных задач аналогичен представленному выше.

Результаты численного моделирования. Численные расчеты упруго-прочностных характеристик проводились для тканевого композита с простейшим сатиновым типом переплетения. Матрица композита — эпоксидная с характеристиками [12] $\sigma_{mT} = 0,016$ ГПа, $\sigma_{mC} = 0,025$ ГПа, $\sigma_{mS} = 0,015$ ГПа, $E_m = 3,3$ ГПа; $\nu_m = 0,35$. Моноволокна в нитях — стеклянные со характеристиками [12, 14] $\bar{\sigma}_f = 2,2$ ГПа, $\gamma = 1$, $\beta = 3,7$, $H_0 = 3,0$, $\omega_f = 0,33$, $s_f = 0,07$, $r_f = 0,25$, $E_f = 250$ ГПа, $\nu_f = 0,25$.

Расчетная диаграмма деформирования стеклопластиковой обшивки при растяжении в направлении основы показана на рис. 2. На диаграмме наблюдается излом, обусловленный появлением микротрещин в матрице, экспериментально эти поперечные к направлению растяжения микротрещины хорошо обнаруживаются (рис. 3). После растрескивания матрица воспринимает нагрузки только в направлении, ортогональном к направлению плоскости трещин. Согласно рис. 2, имеет место хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Результаты компьютерного моделирования компонент тензора концентрации напряжений B_{1111} и B_{1212} в сотовом заполнителе приведены на рис. 4, а, результаты расчетов параметра повреждаемости в сотовом заполнителе — на рис. 4, б. При поперечном растяжении сотового заполнителя его разрушение происходит в зонах искривления заполнителя вблизи места склейки гофр. При продольном сдвиге разрушение происходит в месте соединения двух склеенных гофр, а при поперечном сдвиге — в месте их искривления.

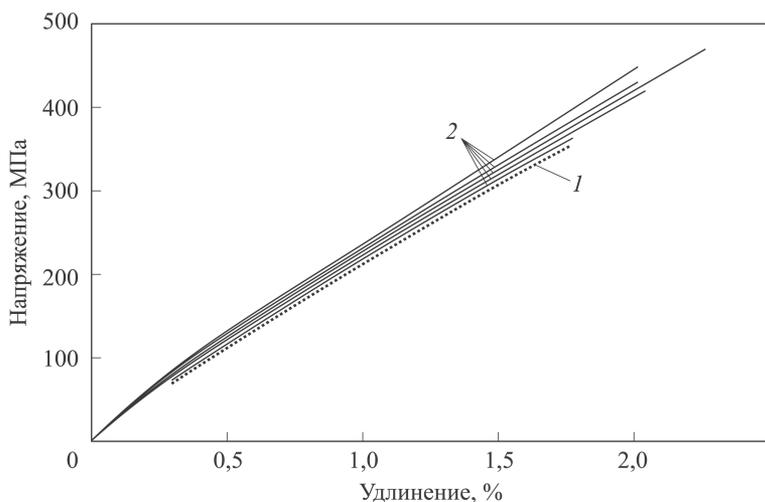


Рис. 2. Расчетная (1) и экспериментальные (2) диаграммы деформирования образцов стеклопластиковых обшивок при растяжении в направлении основы



Рис. 3. Образцы стеклопластиковых обшивок после испытаний на растяжение

Программное обеспечение, на котором проводилось многомасштабное компьютерное моделирование материала МПКС ДКЗ, разработано в Научно-образовательном центре “Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка программных комплексов” (НОЦ СИМПЛЕКС) МГТУ им. Н.Э. Баумана [7, 9, 10].

Разработка технологии изготовления ТСК. Для изготовления панелей ТСК был выбран метод вакуумной инфузии, который широко применяется для создания композитных конструкций, в том числе сложной геометрии. Этот метод заключается в заполнении жидким полимерным связующим пространства в предварительно откачанном армирующем материале.

В качестве внешних силовых обшивок разрабатываемой ТСК было решено изготовить методом вакуумной инфузии стеклопластик

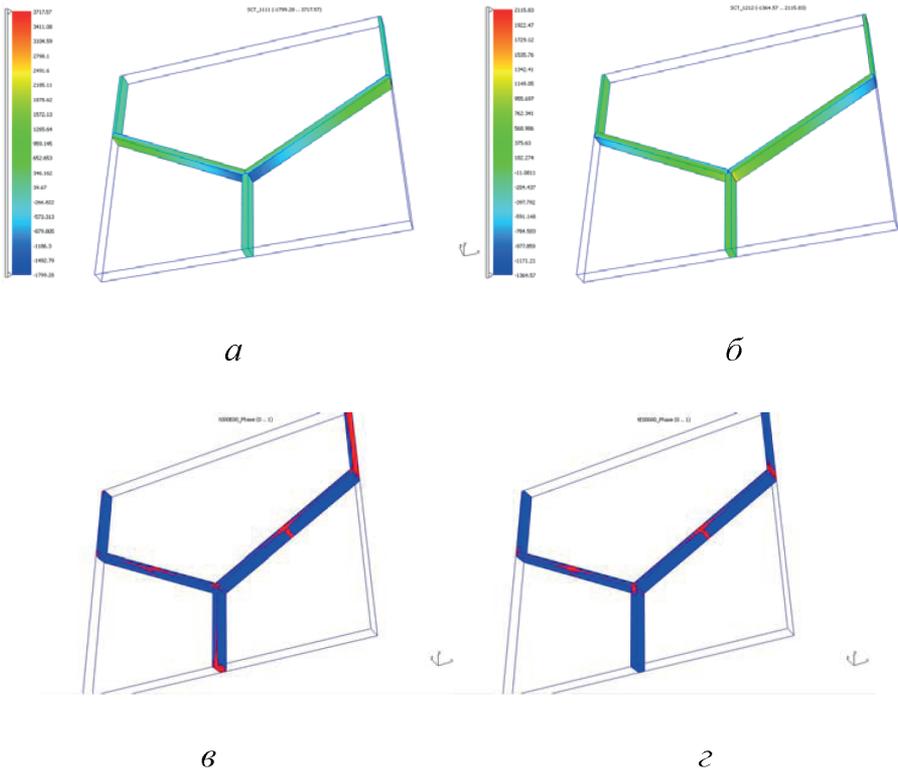


Рис. 4. Компонента тензора концентрации напряжений B_{1111} (а) и B_{1212} (б) для сотового заполнителя из стеклопластика и области разрушения сотового заполнителя из стеклопластика (концентрация 0,04) при растяжении по направлению $O\xi_1$ (в) и при сдвиге в плоскости $\xi_1\xi_2$ (г)

на основе стеклорогожи STR 024/500/125 и модифицированного винилэфирного связующего. В качестве дискретно-ортотропного заполнителя был выбран сотовый заполнитель — стеклосотопласт ССП-1-4,2 с открытыми ячейками. Технология изготовления ТСК состояла из двух этапов:

- 1) методом вакуумной инфузии изготавливали стеклопластиковые обшивки толщиной 2...3 мм (четыре слоя стеклорогожи);
- 2) с помощью вакуумного мешка обшивки приклеивали к сотовым панелям различными способами:
 - тем же связующим, которое применялось при изготовлении обшивок методом вакуумной инфузии, за одну технологическую операцию;
 - тем же связующим за две технологические операции (сначала приклеивалась обшивка с одной стороны, для чего собирался вакуумный мешок, затем приклеивалась обшивка с другой стороны, для чего собирался новый вакуумный мешок);
 - с помощью клея ВК-27 за одну технологическую операцию.

Клей ВК-27 использовали как клей холодного отверждения, представляющий собой эпоксидную композицию, состоящую из смеси эпоксидных и полиамидных смол, наполнителя, каучука со сшивающим агентом, модифицированных кремнийорганических соединений. Этот клей был выбран для приклеивания обшивок к сотовым панелям, поскольку склеивает при температуре окружающей среды, что важно при изготовлении крупногабаритных изделий и рекомендован для клеевых соединений, работающих в диапазоне температур $-60 \dots +80^\circ\text{C}$.

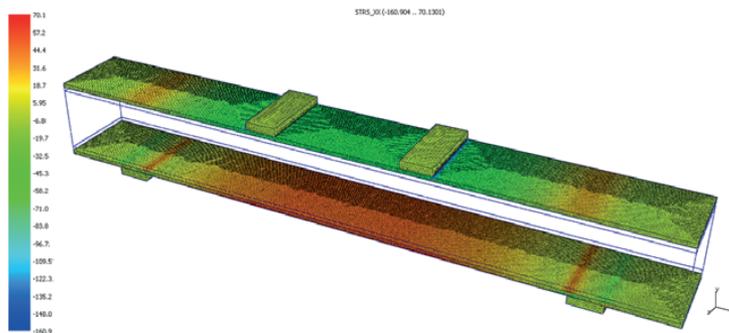
По указанной технологии были получены панели из ТСК габаритами 500×500 мм (рис. 5), за одну технологическую операцию на этапе 1 изготавливали 10 силовых обшивок, а за одну операцию на этапе 2 — пять панелей ТСК. Далее из панелей были вырезаны плоские образцы для проведения испытаний на четырехточечный изгиб.

Компьютерное моделирование испытаний панели ТСК при четырехточечном изгибе. Для идентификации результатов испытаний было проведено компьютерное моделирование трехмерного напряженно-деформированного состояния панели ТСК при четырехточечном изгибе. Точечное приложение нагрузки, которое реализуется в эксперименте в этом виде испытаний, в расчетах моделировалось распределенной нагрузкой, действующей на площадке шириной 2 мм, соответствующей толщине обшивки. Конечно-элементная сетка, сгенерированная для задачи о четырехточечном изгибе, а также поля продольного (изгибного) напряжения σ_{xx} и напряжения сдвига σ_{xy} в панели из ТСК показаны на рис. 6.

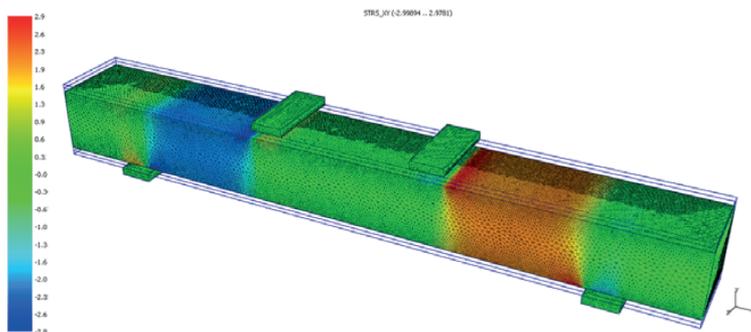
Результаты трехмерного компьютерного моделирования показали, что максимальные значения изгибных и касательных напряжений σ_{xx} реализуются в зоне приложения нагрузки и действия опор (рис. 5 и рис. 6, а), причем эти локальные максимумы напряжений превосходят “инженерные теоретические” (балочные) значения изгибающих напряжений σ_{xx} и касательных напряжений σ_{xy} , возникающих в середине панели, примерно в 2,3 раза. Это означает, что разрушение



Рис. 5. Панель ТСК на этапе сборки обшивок и сотового наполнителя перед вакуумированием



a



б

Рис. 6. Поле продольного напряжения σ_{xx} (*a*) в обшивках ТСК (сотовый наполнитель не показан) и поле напряжения сдвига σ_{xy} (*б*) в сотовом наполнителе ТСК (показан только наполнитель без обшивок) при четырехточечном изгибе

панели из ТСК в испытаниях на четырехточечный изгиб происходит не вследствие отслоения обшивки от сотового наполнителя в середине панели, а в результате локального нарушения адгезии в зоне контакта с опорой. Полученные в эксперименте значения изгибной прочности от растяжения σ_{B1} и от сдвига σ_{BS1} панели из ТСК не являются характеристиками материала. Они относятся только к конкретной панели с конкретными размерами при испытаниях на четырехточечный изгиб, и при переходе к испытаниям панелей иных размеров и при другом нагружении должны определяться из дополнительных экспериментов, либо рассчитываться по разработанной компьютерной модели. Таким образом, разработка компьютерной модели материала и ее применение для расчета прочностных характеристик материала в составе крупногабаритных конструкций — составная часть общего процесса проектирования изделий из ТСК.

Сравнительные экспериментальные и расчетные диаграммы деформирования (зависимость нагрузки P от прогиба w) панели из

ТСК (склейка клеем ВК-27) при четырехточечном изгибе приведена на рис. 7. Результаты компьютерного моделирования обеспечивают достаточно хорошее совпадение с экспериментом как по самому наклону диаграммы $P(w)$, так и по предельным значениям нагрузки, при которых происходит разрушение панели. Расчетные значения укладываются в диапазон статистического разброса экспериментальных значений.

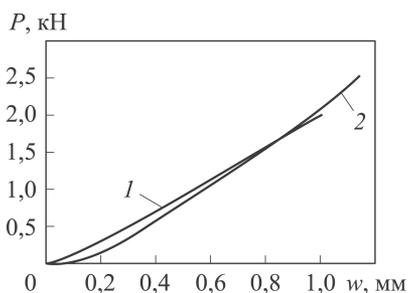


Рис. 7. Расчетная (1) и экспериментальная (2) диаграммы деформирования ТСК при четырехточечном изгибе

Выводы. Разработана математическая модель многоуровневой структуры трехслойного материала с стеклосотовым наполнителем и обшивками на основе тканевого композита. Модель, основанная на МАО иерархических многоуровневых периодических структур, позволяет определять эффективные упругие и прочностные характеристики трехслойного материала. В целях валидации указанной модели приведены примеры численных конечно-элементных расчетов сотовых структур. Создана технология изготовления трехслойного сотового композиционного материала на основе стеклотканей, модифицированного винилэфирного связующего и стеклосотопласта с использованием метода инфузии. Проведенное компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния панели из трехслойного сотового материала при четырехточечном изгибе позволило выявить особенности разрушения такого типа конструкций, вызванного локальными напряжениями сдвига в зонах приложения нагрузки. Сравнение расчетной диаграммы деформирования ТСК при изгибе с экспериментальной диаграммой показало достаточно высокую точность математической модели и разработанной вычислительной технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fleck N.A., Deshpande V.S. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading // J. Appl Mech 2004. Vol. 71. P. 386–401.
2. Xue Z., Hutchinson J.W. Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads // Int. J. Mech. Sci. 2003. Vol. 45. P. 687–705.
3. Расчет трехслойных конструкций: Справочник / В.Н. Кобелев, Л.М. Коварский, С.И. Тимофеев; под общ. ред. В.Н. Кобелева. М.: Машиностроение, 1984. 304 с.
4. Александров А.Я., Бородин М.Я., Павлов В.В. Конструкции с наполнителями из пенопластов. М.: Машиностроение, 1972. 212 с.
5. Димитриенко Ю.И., Соколов А.П. Многомасштабное моделирование упругих композиционных материалов // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 5. С. 3–20.

6. Димитриенко Ю.И., Кашкаров А.И. Расчет эффективных характеристик композитов с периодической структурой методом конечных элементов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. № 2. 2002. С. 95–108.
7. Димитриенко Ю.И., Соколов А.П. Система автоматизированного прогнозирования свойств композиционных материалов // Информационные технологии. 2008. № 8. С. 31–38.
8. Численное и экспериментальное моделирование прочностных характеристик сферопластиков / Ю.И. Димитриенко, С.В. Сборщиков, А.П. Соколов, Д.Н. Садовничий, Б.Р. Гафаров // Композиты и наноструктуры. 2013. № 3. С. 35–51.
9. Димитриенко Ю.И., Сборщиков С.В., Соколов А.П. Численное моделирование микроразрушения и прочностных характеристик пространственно-армированных композитов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2013. Т. 19. № 3. С. 365–383.
10. Димитриенко Ю.И., Сборщиков С.В., Соколов А.П., Шпакова Ю.В. Численное моделирование процессов разрушения тканевых композитов // Вычислительная механика сплошной среды. 2013. Т. 6. № 4. С. 389–402. DOI: 10.7242/1999-6691/2013.6.4.43.
11. Димитриенко Ю.И. Тензорный анализ. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. 463 с.
12. Димитриенко Ю.И. Механика композиционных материалов при высоких температурах. М.: Машиностроение. 1997. 366 с.
13. Димитриенко Ю.И. Основы механики твердого тела. Механика сплошной среды. Т. 4. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. 624 с.
14. Dimitrienko Yu.I. A structural thermo-mechanical model of textile composite materials at high temperatures // *Composites Science and Technology*. 1999. Vol. 59. No. 7. P. 1041–1053.

REFERENCES

- [1] Fleck N.A., Deshpande V.S. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading. *J. Appl. Mech.*, 2004, vol. 71, pp. 386–401.
- [2] Xue Z., Hutchinson J.W. Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads. *Int. J. Mech. Sci.*, 2003, vol. 45, pp. 687–705.
- [3] Kobelev V.N. (ed.), Kovarskij L.M., Timofeev S.I. Raschet trehslojnyh konstrukcij: Spravochnik [Calculation of sandwich structures: A Handbook]. Moscow, Mashinostroiye Publ., 1984. 304 p.
- [4] Aleksandrov A.Ja., Borodin M.Ja., Pavlov V.V. Konstrukcii s zapolniteljami iz penoplastov [Design with fillers from foams]. Moscow, Mashinostroiye Publ., 1972. 212 p.
- [5] Dimitrienko Yu.I., Sokolov A.P. Multiscale modeling of elastic composite materials. *Mat. Model. [Math. Models Comput. Simul.]*, 2012, vol. 24, no. 5, pp. 3–20 (in Russ.).
- [6] Dimitrienko Yu.I., Kashkarov A.I. The calculation of the effective characteristics of composite materials with periodic structure by finite element method]. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2013, no. 2, pp. 95–108 (in Russ.).
- [7] Dimitrienko Yu.I., Sokolov A.P. Automated forecasting of composite material properties by means of homogenization method]. *Informacionnye tehnologii* [Information Technologies], 2008, no. 8, pp. 31–38 (in Russ.).
- [8] Dimitrienko Yu.I., Sborshnikov S.V., Sokolov A.P., Sadovnichij D.N., Gafarov B.R. Computer and experimental study modeling of failure of micro-sphere filled composite. *Kompozity i nanostruktury* [Composites and nanostructures], 2013, no. 3, pp. 35–51 (in Russ.).

- [9] Dimitrienko Yu.I., Sborshnikov S.V., Sokolov A.P. Computational modeling of microdestruction and strength of multidimensional reinforced composites. *Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij* [Composite mechanics and design], 2013, vol. 19, no. 3. pp. 365–383 (in Russ).
- [10] Dimitrienko Yu.I., Sborshnikov S.V., Sokolov A.P., Shpakova Yu.V. Computational modeling of processes of destruction of textile composites. *Vychislitel'naja mehanika sploshnoj sredy* [Computational Continuum Mechanics], 2013, vol. 6, no. 4, pp. 389–402 (in Russ). DOI: 10.7242/1999-6691/2013.6.4.43
- [11] Dimitrienko Yu.I. Tenzornyy analiz. Mekhanika sploshnoy sredy. V 4 t. [Tensorial analysis. Continuum mechanics. In 4 volumes]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2011. 463 p. (Vol. 1).
- [12] Dimitrienko Yu.I. Mehanika kompozicionnyh materialov pri vysokih temperaturah [Mechanics of composite materials at high temperatures]. Moscow, Mashinostroiye Publ., 1997. 366 p.
- [13] Dimitrienko Yu.I. Osnovy mehaniki tverdogo tela. Mehanika sploshnoj sredy. T. 4 [Fundamentals of solid mechanics. Continuum Mechanics]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., vol. 4, 2013. 624 p.
- [14] Dimitrienko Yu.I. A structural thermo-mechanical model of textile composite materials at high temperatures. *Composites Science and Technology*, 1999, vol. 59, no. 7, pp. 1041–1053.

Статья поступила в редакцию 28.05.2014

Юрий Иванович Димитриенко — д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 280 научных работ в области механики сплошных сред, вычислительной механики, механики и термомеханики композитов, математического моделирования в науке о материалах, вычислительной газодинамике. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Yu.I. Dimitrienko — Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, head of “Computational Mathematics and Mathematical Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 280 publications in the field of mechanics of continua, computational mechanics, mechanics and thermomechanics of composites, mathematical simulation in the science of materials, computational gas dynamics. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Николай Николаевич Федонюк — канд. техн. наук, начальник лаборатории ОАО “Крыловский государственный научный центр”. Автор более 40 научных работ в области полимерных композиционных материалов и разработки судовых конструкций из композитов.

ОАО “Крыловский государственный научный центр”, Российская Федерация, 196158, Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44.

N.N. Fedonyuk — Cand. Sci. (Eng.), head of laboratory of the Federal State Unitary Enterprise “Krylov State Research Center”. Author of more than 40 publications in the field of polymer composite materials and development of ship constructions based on composites.

FSUE “Krylov State Research Center”, Moskovskoe sh. 44, St. Petersburg, 196158 Russian Federation.

Елена Александровна Губарева — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 15 научных работ в области механики сплошных сред, механики контактного взаимодействия, математического моделирования.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

E.A. Gubareva — Cand. Sci. (Phys.-Math.), assoc. professor “Computational Mathematics and Mathematical Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 15 publications in the field of mechanics of continua, mathematical simulation, mechanics of contact interaction.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Сергей Васильевич Сборщиков — аспирант кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, младший научный сотрудник научно-образовательного центра СИМПЛЕКС МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор семи научных работ в области механики композитов и численного моделирования.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

S.V. Sbornichikov — post-graduate of “Computational Mathematics and Mathematical Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University, junior researcher of the Scientific and Educational Centre SIMPLEX of the Bauman Moscow State Technical University. Author of seven publications in the field of mechanics of composites and numerical simulation.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Александр Александрович Прозоровский — ассистент кафедры “Вычислительная математика и математическая физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, младший научный сотрудник научно-образовательного центра СИМПЛЕКС МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 15 научных работ в области механики композитов, надежности конструкций ядерных реакторов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

A.A. Prozorovskiy — assistant lecturer of “Computational Mathematics and Mathematical Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University, junior researcher of the Scientific and Educational Centre SIMPLEX of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 15 publications in the field of mechanics of composites, constructions reliability of nuclear reactors.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Владимир Сергеевич Ерасов — канд. техн. наук, начальник лаборатории “Прочность и надежность материалов воздушного судна” ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов” ГНЦ РФ. Автор более 105 научных работ в области механики материалов и физики прочности.

ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов” ГНЦ РФ, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17.

V.S. Erasov — Cand. Sci. (Eng.), head of “Durability and reliability of the aircraft materials” laboratory of the Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”. Author of more than 105 publications in the field of mechanics of materials and physics of strength.

Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”, ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation.

Николай Олегович Яковлев — канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории “Прочность и надежность материалов воздушного судна” ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов” ГНЦ РФ. Автор более 20 научных работ в области прочности и надежности материалов, методов механических испытаний полимерных, полимерных композиционных и металлических материалов.

ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов” ГНЦ РФ, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17.

N.O. Yakovlev — Cand. Sci. (Eng.), researcher of “Durability and reliability of the aircraft materials” laboratory of the Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”. Author of more than 20 publications in the field of durability and reliability of the materials, techniques of mechanical tests of polymer, polymer composite and metallic materials.

Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”, ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation.