

УДК 539.3

EDN HFFTKC (<https://elibrary.ru/hfftkc>)

DOI 10.33113/mkmk.ras.2025.31.02.02



ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВИСКЕРИЗОВАННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ*

Кривень Г.И.¹, Сенина Е.С.¹, Устенко А.Д.²¹ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)», г. Москва, Россия²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе исследуется устойчивость модифицированных слоистых композитных пластин, в которых используются модифицированные волокна, содержащие дополнительный вискеризованный слой. Предполагается, что волокна модифицированы углеродными нанотрубками, выращенными перпендикулярно поверхности волокон. Модифицированные так композиты имеют несколько повышенные трансверсальные прочностные характеристики, что делает их привлекательными с точки зрения накопления повреждений. В работе дается сравнение устойчивости пластин, выполненных из модифицированных композитов, с соответствующими оценками устойчивости слоистых пластин из традиционных волокон. Предварительно определялись эффективные механические свойства модифицированного композита с использованием метода трех фаз Кристенсена-Эшелби. В общем случае рассматривались слоистые пластины, свободно опертые по контуру под действием усилий, действующих в направлении одной из осей. Исследуется зависимость устойчивости слоистого композита, образованного традиционными и модифицированными волокнами, от угла укладки волокон и от объемного содержания включения. Приводится прямой численный расчет устойчивости пластин методом конечных элементов для двух видов слоистых пластин: для пластины, армированной углеродным волокном, и для пластины, армированной модифицированным углеродным волокном. Для этих же пластин проводится расчет с использованием формул, позволяющих оценить влияние поперечной сдвиговой деформации на критическую силу потери устойчивости. Расхождения в результатах аналитического анализа и численного анализа методом конечных элементов составили не более 10%. Различия в численных и аналитических значениях растут в случае увеличения объемного содержания волокон. Оценивается возможность повышения механических свойств композитной пластины за счет вискеризации волокон. Расчеты показывают, что исследуемые пластины, созданные с использованием модифицированных волокон, способны выдерживать большие нагрузки по сравнению с пластинами из традиционных волокон.

Ключевые слова: композитный материал; углеродные нанотрубки; эффект вискеризации; эффективные свойства монослоя

BUCKLING ANALYSIS OF MODIFIED COMPOSITE PLATES WITH WHISKERIZED FIBERS

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код проекта FSFF-2023-0004).

ABSTRACT

An analytical and numerical investigation of the buckling behavior of modified layered composite plates reinforced with fibers containing whiskers layer. The fibers are believed to be modified with carbon nanotubes grown in normal direction to one's surface. From the perspective of damage accumulation such modified composites that demonstrate slightly enhanced transverse strength characteristics become particularly appealing. The paper provides a comparison of buckling problem of modified composites with the corresponding results obtained from layered plates reinforced with traditional fibers. The effective mechanical properties of modified composite were determined using the three-phase method by Christensen-Eshelby. In general case, layered plates were considered, edged freely supported and loaded by force acting along one of the principal axes. We also perform a finite element analysis and explore an impact of fiber's layup angle and volume fraction on the buckling resistance of layered composite reinforced with traditional or modified fibers. In addition, an assessment of influence of transverse shear deformation on the critical buckling load was carried out. A discrepancy between the analytical and numerical results were no more than 10%. Differences in numerical and analytical values rise with an increasing fibers volume fraction. The possibility of enhancing mechanical properties of composite plate through fiber whiskerization was estimated. It was shown modified composites withstand greater loads far better than traditional ones.

Keywords: composite material; carbon nanotubes; whiskerization effect; effective properties of monolayer

ВВЕДЕНИЕ

Композитные материалы (КМ) широко применяются при создании легких и прочных структур в самолетах и космических аппаратах, кузовных деталях и компонентах, спортивных товарах, медицинских имплантах и протезах, а также различных деталей антенной техники [1-3]. При создании различных конструкций к материалам предъявляются особые требования по механическим свойствам, прочности, жесткости, коррозионной стойкости.

Одними из самых перспективных композитов являются композиты на основе углерода, так как они обладают низкой плотностью и соответственно малой массой, а также отрицательным значением термического коэффициента линейного расширения, что обеспечивает их работоспособность в условиях резких перепадов температур. Волокнистые КМ несмотря на свои достоинства обладают существенным недостатком – низкой сдвиговой прочностью, которую можно повысить благодаря модификации поверхности волокна [4-7] или создания специального межфазного слоя между волокном и матрицей, например, вискеризованного слоя [8-29].

Выделяют два вида вискеризованного слоя в зависимости от типа связи между волокном и нитевидным кристаллом: 1) связь между волокнами и нитевидными кристаллами осуществляется самим связующим, 2) связи образуются выращиванием нитевидных кристаллов на самих волокнах, ориентированных преимущественно нормально поверхности [8]. Было показано, что модификация поверхности волокна за счет выращивания нитевидных

кристаллов на волокнах приводит к повышению эффективных жесткостных свойств [9,10], прочности [9-12], демпфирующих характеристик [13-15], теплопроводности [16,17-19] и устойчивости композитов [20,21]. Помимо углеродных нанотрубок (УНТ) на углеродном волокне могут быть выращены вискерсы из оксида кремния, цинка, алюминия [22,23].

УНТ широко используются для улучшения свойств углеродного волокна благодаря их исключительным механическим и физическим свойствам. Выращивание УНТ на поверхности волокна позволяет увеличить прочность связи между волокном и матрицей, что способствует повышению механических свойств и устойчивости композитных материалов [20,24-30]. Например, модификация углеродного волокна УНТ увеличивает модуль упругости более чем в 1,5 раза (с 390 ГПа до 600 ГПа) и прочность при растяжении вдоль волокна более чем в 1,1 раза [26-28]. Испытания продемонстрировали, что вискеризация волокна УНТ увеличивает межфазную прочность вискеризованного композита по сравнению с традиционным при продольном сдвиге на 206% [29]. В исследовании [25] был проведен эксперимент по растяжению традиционных и модифицированных волокон, результаты которого показали увеличение межфазной прочности вискеризованного композита по сравнению с традиционным на 134%. В работе [24] за счет вискеризации поверхности волокна удалось достичь увеличения межфазной прочности на 150%. Эффект вискеризации также был доказан экспериментально на примере вытягивания стальных пластин из слоя эпоксидной матрицы [31]. В качестве образцов исследовались стальные пластины марки 30ХГСА. Одна из пластин была модифицирована УНТ, выращенными на ее поверхности. Результаты эксперимента показали, что модификация стальной пластины УНТ повышает межфазную прочность более чем в 2,5 раза.

Исследования, проведенные в работах [20,21], показали увеличение продольной и поперечной прочности вискеризованного композита на 43% и 94% соответственно и аналитически и численно доказали, что локальная устойчивость модифицированного композита может быть увеличена более чем в 2 раза по сравнению с устойчивостью аналогичного классического композита.

Большинство несущих форм различных конструкций можно свести к таким элементам, как стержни, пластины и оболочки. В этой работе в качестве конструктивного элемента будет исследована свободно опертая пластина, нагруженная сжимающей распределенной нагрузкой в плоскости пластины.

В данной работе предполагается, что использование модифицированного волокна вместо традиционного позволит повысить устойчивость свободно опертой пластины, подверженной сжимающим нагрузкам в одном из направлений в плоскости пластины. Так как невозможно достичь для модифицированного композита такого же объемного содержания углеродного волокна, как в традиционном композите, то ведется сравнение критических нагрузок для композитных пластин, у которых, в случае традиционного композита под объемным содержанием включения подразумевается объемное содержание волокна, а в случае модифицированного композита – объемное содержание волокна с вискеризованным слоем. В результате получается заниженная граница критических нагрузок для пластин, выполненных из модифицированных композитов, поскольку реальное содержание объемного содержания углеродного волокна в модифицированных композитах меньше, чем объемное содержание углеродного волокна в традиционных композитах.

Для определения необходимых для анализа устойчивости эффективных свойств вискеризованного и традиционного композитов использовался метод трех фаз. Наряду с методом Мори-Тонака, метод трех фаз использует идею эффективного поля, что позволяет с достаточной точностью распространить эти методы для оценки эффективных свойств композитов с большими объемными содержаниями включений. Показано прямыми численными расчетами, что использование метода трех фаз дает небольшую погрешность при расчете эффективных свойств композитов с большими объемными содержаниями [32]. Эффективные свойства композита используются для проведения численного анализа на устойчивость аналитическим методом и методом конечных элементов (МКЭ). Эффективные характеристики слоистой пластины определялись через свойства монослоя, учитывающего микроструктуру – физические и геометрические свойства связующего и модифицированных и традиционных волокон.

Также в работе дана оценка влияния различных ориентаций волокон в структуре композита на критическую нагрузку.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведем анализ критических нагрузок, выдерживаемыми слоистыми квадратными пластинами, изготовленными из модифицированного композитного материала с вискеризованными волокнами. Полученные результаты сравним с критическими нагрузками, выдерживаемыми слоистыми пластинами, изготовленными из композитного материала с традиционными волокнами. Проведем оценку влияния объемного содержания включения на устойчивость исследуемых пластин. Исследуем влияния укладок волокон в слоях под углами $0^\circ/90^\circ$ и $+45^\circ/-45^\circ$ на критическую нагрузку, выдерживаемую исследуемыми пластинами. Для этого рассмотрим слоистые квадратные пластины, свободно опертые по периметру, к двум параллельным кромкам которых приложена сжимающая нагрузка.

Модифицированный композитный материал представляет собой углепластик, в котором перпендикулярно поверхности углеродного волокна выращены УНТ. Радиусы базового углеродного волокна композитов фиксированы и составляют 2,5 мкм для модифицированного композита и 3,5 мкм для традиционного. Также для модифицированного композита фиксирована длина вискерсов – 1 мкм [34].

Классический композит рассматривается как композит, состоящий из двух фаз – волокна радиусом r_2 и матрицы радиусом r_3 , а модифицированный композит рассматривается как композит, состоящий из трех фаз – волокна радиусом r_1 , вискеризованного межфазного слоя толщиной l_w и матрицы радиусом r_3 .

Объемное содержание включения в композите определяется как отношение площади поперечного сечения включения к площади поперечного сечения матрицы и рассчитывается по формуле

$$c_{вкл} = r_2^2 / r_3^2, \quad (1)$$

где r_2 – радиус включения (для модифицированного волокна $r_2 = r_1 + l_w$, r_3 – радиус связующего (матрицы)).

Для нахождения эффективных свойств слоистого композита используется аналитическое решение задачи в рамках теории Тимошенко, заимствованное из работы [35]. В работе численно сравнивается критическая нагрузка, полученная аналитическим методом и МКЭ.

Аналитическое решение получается при использовании формул, учитывающих влияние поперечной сдвиговой деформации и позволяющей определить критическую силу потери устойчивости при одноосном нагружении свободно опертой пластины

$$N_0 = \frac{1}{\alpha^2} \left(\frac{\hat{c}_{33} + \left(\frac{\alpha^2}{KA_{44}} + \frac{\beta^2}{KA_{55}} \right) c_1}{1 + \frac{c_1}{K^2 A_{44} A_{55}} + \frac{c_2}{KA_{55}} + \frac{c_3}{KA_{44}}} \right), \quad (2)$$

где $\hat{c}_{33} = D_{11}d^4 + 2(D_{12} + 2D_{66})\alpha^2\beta^2 + D_{22}\beta^2$, $c_1 = c_2c_3 - c_4^2$, $c_2 = D_{11}\alpha^2 + D_{66}\beta^2$, $c_3 = D_{66}\alpha^2 + D_{22}\beta^2$, $c_4 = (D_{12} + D_{66})\alpha\beta$, $\alpha = \pi m/a$, $\beta = \pi n/b$, $m = n = 1$ – количество полусинусоидальных волн в направлении x и y соответственно для квадратной пластины, $K = 5/6$ – коэффициент поправки на сдвиг по теории Тимошенко, D_{ij} – изгибная характеристика.

Наряду с (2) использовалась иная формула, в которой не учитывается эффект поперечной сдвиговой деформации

$$N_0 = \frac{\hat{c}_{33}}{\alpha^2}. \quad (3)$$

Согласно формулам (2)-(3) для определения критической силы потери устойчивости рассматриваемой слоистой пластины в глобальной системе координат необходимо знать жесткость пластины при растяжении A_{ij} и изгибную жесткость пластины D_{ij} , которые определяются по формулам:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^T (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}), \quad D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^T (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3), \quad \text{где } z_k - \text{толщина слоя слоистой пластины, } T - \text{количество слоев пластины, отсчитанное от срединной поверхности, } c = \cos \theta, \quad s = \sin \theta, \quad \theta - \text{угол укладки волокна по отношению к глобальной системе координат в слое, } \bar{Q}_{ij} - \text{осредненные компоненты преобразованной матрицы жесткости слоя,}$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})c^2s^2 + Q_{22}s^4, \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})c^2s^2 + Q_{12}(c^4 + s^4), \quad \bar{Q}_{22} = Q_{11}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})c^2s^2 + Q_{22}c^4, \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})c^2s^2 + Q_{66}(c^4 + s^4), \quad \bar{Q}_{44} = Q_{44}c^2 + Q_{55}s^2, \\ \bar{Q}_{55} &= Q_{55}c^2 + Q_{44}s^2, \quad Q_{11} - \text{компоненты матрицы жесткости монослоя.} \end{aligned}$$

Рассмотрим монослой и его эффективные характеристики как некоего сплошного ортотропного материала, определенные по формулам: $Q_{11} = E_1/(1 - \nu_{12}\nu_{21})$, $Q_{12} = \nu_{12}E_2/(1 - \nu_{12}\nu_{21}) = Q_{21}$, $Q_{22} = E_2/(1 - \nu_{12}\nu_{21})$, $Q_{66} = G_{12}$, $Q_{55} = Q_{66}$, где E_1 – модуль упругости вдоль волокна, E_2 – модуль упругости поперек волокна, ν_{12} , $\nu_{21} = \nu_{21}E_2/E_1$ – коэффициенты Пуассона в плоскости пластины, определенные в локальной системе координат.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ КЛАССИЧЕСКИХ И МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

Для проведения численного анализа МКЭ необходимо знать эффективные свойства композитной ячейки волокнистого композита, определенные в локальной системе координат. Кроме эффективных свойств в плоскости слоя $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$, композит также имеет свойства поперек слоя $E_3, G_{13}, G_{23}, \nu_{13}, \nu_{23}$, где E_1 – модуль упругости вдоль волокна, модуль упругости в плоскости поперек волокна $E_2 = E_3$, модуль сдвига вдоль волокна $G_{12} = G_{13}$, модуль сдвига в плоскости поперек волокна G_{23} , коэффициент Пуассона в плоскости слоя ν_{12} .

На эффективные свойства модифицированного композита с вискеризованными волокнами влияют следующие геометрические и механические параметры элементов структуры композита: объемное содержание вискерсов в вискеризованном слое, длина вискерсов, радиус вискерсов, модули упругости волокна, матрицы, вискерсов и коэффициенты Пуассона волокна, матрицы и вискерсов. Поэтому для определения всех необходимых эффективных свойств используется процедура двухэтапной гомогенизации, основанной на методе трех фаз, который позволяет учесть влияние каждого из этих параметров на эффективные свойства вискеризованного композита, а также является достаточно точным для определения эффективных свойств классического волокнистого композита. На первом этапе гомогенизации определяются эффективные свойства вискеризованного межфазного слоя, а на втором этапе – эффективные свойства всего модифицированного композита. Для определения эффективных свойств классического волокнистого композита используется только один этап осреднения. Метод трех фаз основан на разрешающих уравнениях классической теории упругости. Выражения, определяющие перемещения во включении, матрице и эквивалентной гомогенной среде определяются из уравнения равновесия. Используя дифференциальные соотношения Коши, находятся выражения для деформаций.

На основе условий непрерывности перемещений и напряжений на границе фаз и условия на бесконечности (внешнего граничного условия) формируется система алгебраических уравнений. Система уравнений замыкается дополнительным уравнением – интегральной формулой Эшелби, что позволяет найти все неизвестные константы, в число которых включены эффективные модули. Для случая классического композита эти выражения содержат 8 констант, а для случая модифицированного композита эти выражения содержат 12 констант. Применение формулы Эшелби с заданными перемещениями для вычисления энергии деформирования, запасаемой трехфазной средой позволяет получить решение для одной из констант.

Эффективные продольный модуль упругости E_2^{wl} , коэффициент Пуассона ν_{23}^{wl} , модуль продольного сдвига μ_{23}^{wl} , модуль поперечного сдвига μ_{12}^{wl} и объемный модуль плоской деформации K_{12}^{wl} вискеризованного слоя определяются по известным формулам метода трех фаз [36]

$$E_2^{wl} = c_b E_b + (1 - c_b) E_m + \frac{4c_b(1 - c_b)(\nu_b - \nu_m)^2 \mu_m}{(1 - c_b) \mu_m / (k_b + \mu_b/3) + c_b \mu_m / (k_m + \mu_m/3) + 1},$$

$$v_{23}^{wl} = c_b v_b + (1 - c_b) v_m + \frac{c_b (1 - c_b) (v_b - v_m) (\mu_m / (k_m + \mu_m / 3) - \mu_m / (k_b + \mu_b / 3))}{(1 - c_b) (\mu_m / (k_b + \mu_b / 3)) + c_b (\mu_m / (k_m + \mu_m / 3)) + 1},$$

$$\frac{\mu_{23}^{wl}}{\mu_m} = \frac{\mu_b (1 + c_b) + \mu_m (1 - c_b)}{\mu_b (1 - c_b) + \mu_m (1 + c_b)},$$

$$K_{12}^{wl} = k_m + \frac{\mu_m}{3} + \frac{c_b}{1 / (k_b - k_m + \frac{1}{3} (\mu_b - \mu_m)) + (1 - c_b) / (k_m + 4 \mu_m / 3)},$$

где c_b – объемная доля включения (вискерсов) в межфазном слое, E_b – модуль Юнга вискерса, E_m – модуль Юнга матрицы, v_b – коэффициент Пуассона вискерса, v_m – коэффициент Пуассона матрицы, μ_b – модуль сдвига вискерса, μ_m – модуль сдвига матрицы, k_b – объемный модуль вискерса, k_m – объемный модуль матрицы.

Объемную долю включения (вискерсов) в межфазном слое определяют по формуле

$$c_b = \frac{M_b^2 d_b^2}{4\pi (l_b + D) D}, \quad (4)$$

где $M_b \leq \pi D / d_b$ – число вискерсов, выращенных на поверхности волокна; d_b – диаметр вискерса; l_b – длина вискерса; D – диаметр базового волокна.

Модуль поперечного сдвига μ_{12}^{wl} определяется как действительный корень уравнения

$$A \left(\frac{\mu_{12}^{wl}}{\mu_m} \right)^2 + 2B \left(\frac{\mu_{12}^{wl}}{\mu_m} \right) + C = 0,$$

где

$$\eta = 3 - 4\nu,$$

$$A = 3c_b (1 - c_b)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} - 1 \right) \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} - \eta_b \right) +$$

$$+ \left[\frac{\mu_b}{\mu_m} \eta_m + \eta_b \eta_m - \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} \eta_m - \eta_b \right) c_b^3 \right] \left[c_b \eta_m \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} - 1 \right) - \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} \eta_m + 1 \right) \right],$$

$$B = -3c_b (1 - c_b)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} - 1 \right) \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} + \eta_b \right) +$$

$$+ \frac{1}{2} \left[\eta_m \frac{\mu_b}{\mu_m} + \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} - 1 \right) c_b + 1 \right] \left[(\eta_m - 1) \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} + \eta_b \right) - \right.$$

$$\left. - 2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} \eta_m - \eta_b \right) c_b^3 \right] + \frac{c_b}{2} (\eta_m + 1) \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} - 1 \right) \left[\frac{\mu_b}{\mu_m} + \eta_b + \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} \eta_m - \eta_b \right) c_b^3 \right],$$

$$C = 3c_b(1-c_b)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} - 1 \right) \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} + \eta_b \right) + \\ + \left[\eta_m \frac{\mu_b}{\mu_m} + \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} - 1 \right) c_b + 1 \right] \left[\frac{\mu_b}{\mu_m} + \eta_b + \left(\frac{\mu_b}{\mu_m} \eta_m - \eta_b \right) c_b^3 \right].$$

Эффективные свойства всего волокнистого композита определяются по методу трех фаз, расширенного на многофазную среду, путем решения четырех задач – чистого сдвига вдоль волокна, одноосного растяжения вдоль волокна: всестороннего нагружения поперек волокна и чистого сдвига в плоскости поперек волокна [9,37]. При этом учитывается, что волокно обладает трансверсально-изотропными свойствами с плоскостью симметрии поперек волокна, вискеризованный слой обладает трансверсально-изотропными свойствами с плоскостью симметрии поперек вискерсов, а матрица является изотропной. Предполагается, что волокнистый композит на бесконечности нагружается однородным полем деформации $\varepsilon_0 = 1$. Решение всех задач строится в цилиндрической системе координат.

Из задачи чистого сдвига вдоль волокна определяется эффективный модуль продольного сдвига G_{12} по формуле

$$G_{12} = \frac{1}{2} \mu_m \left[D_1^{(3)} - D_2^{(3)} r_3^{-2} \right], \quad (5)$$

где $D_1^{(3)}$, $D_2^{(3)}$ – константы, которые определяются из условий: несингулярности в центре волокна $D_2^{(1)} = 0$, непрерывности перемещений и напряжений на границах идеального контакта фаз $u_z^{(i)}(r_i, \theta) = u_z^{(i+1)}(r_i, \theta)$, $\sigma_{rz}^{(i)}(r_i, \theta) = \sigma_{rz}^{(i+1)}(r_i, \theta)$, ($i = 1, 2, 3$), внешнего граничного условия на бесконечности ($r_{N+1} \rightarrow \infty$) $u_z^{N+1}(r_{N+1}) = 2r_{N+1}$ и условия энергетической поверхности на контакте $\int_S (\sigma_{rz}^{N+1} u_z^{eff} - \sigma_{rz}^{eff} u_z^{N+1})_{r=r_N} dS = 0$, где u_z^{N+1} , σ_{rz}^{N+1} – соответственно перемещение и напряжение на бесконечности, u_z^{eff} , σ_{rz}^{eff} – соответственно перемещение и напряжение эффективного (осредненного) композита.

Из задачи всесторонней нагрузки поперек волокон определяется объемный модуль плоской деформации K_2 по формуле

$$K_2 = \frac{1}{2} \left[D_1^{(3)} (C_{11}^{(3)} + C_{12}^{(3)}) + D_2^{(3)} (-C_{11}^{(3)} + C_{12}^{(3)}) r_3^{-2} \right], \quad (6)$$

где $C_{11}^{(3)} = E_m(1-\nu_m)/((1+\nu_m)(1-2\nu_m))$, $C_{12}^{(3)} = E_m\nu_m/((1+\nu_m)(1-2\nu_m))$ – константы жесткости слоя матрицы, константы $D_1^{(3)}$ и $D_2^{(3)}$ определяются из условий: несингулярности в центре волокна $D_2^{(1)} = 0$; непрерывности перемещений и напряжений на границах идеального контакта фаз $u_r^{(i)}(r_i) = u_r^{(i+1)}(r_i)$, $\sigma_{rr}^{(i)}(r_i) = \sigma_{rr}^{(i+1)}(r_i)$, ($i = 1, 2, 3$); внешнего граничного условия на бесконечности ($r_{N+1} \rightarrow \infty$) $u_r^{N+1}(r_{N+1}) = r_{N+1}$ и условия энергетической поверхности на контакте $\int_S (\sigma_{rr}^{N+1} u_r^{eff} - \sigma_{rr}^{eff} u_r^{N+1})_{r=r_N} dS = 0$, где u_r^{N+1} , σ_{rr}^{N+1} –

соответственно перемещение и напряжение на бесконечности, u_r^{eff} , σ_{rr}^{eff} – соответственно перемещение и напряжение эффективного (осредненного) композита.

Из задачи одноосного растяжения вдоль волокна определяются коэффициент Пуассона в плоскости слоя ν_{12} и модуль упругости вдоль волокна E_1 по формулам

$$\nu_{12} = -\frac{1}{r_3} \left(D_1^{(3)} r_3 + D_2^{(3)} r_3^{-1} \right), \quad (7)$$

$$E_1 = \frac{2}{r_3^2} \sum_{i=1}^3 \int_{r_{i-1}}^{r_i} \sigma_{zz}^{(i)} r dr, \quad (8)$$

где $\sigma_{zz}^{(i)}$ – поле напряжений в каждой из фаз волокнистого композита, константы $D_1^{(3)}$ и $D_2^{(3)}$ определяются из условий: несингулярности в центре волокна $D_2^{(1)} = 0$; непрерывности перемещений и напряжений на границах идеального контакта фаз $u_r^{(i)}(r_i) = u_r^{(i+1)}(r_i)$, $\sigma_{rr}^{(i)}(r_i) = \sigma_{rr}^{(i+1)}(r_i)$, ($i = 1, 2, 3$); внешнего граничного условия на бесконечности ($r_{N+1} \rightarrow \infty$) $\sigma_{rk}^{N+1}(r_{N+1}) = 0$ и условия энергетической поверхности на контакте $\int_S (\sigma_{zz}^{N+1} u_z^{eff} - \sigma_{zz}^{eff} u_z^{N+1})_{r=r_N} dS = 0$, где u_z^{N+1} , σ_{zz}^{N+1} – соответственно перемещение и напряжение на бесконечности, u_z^{eff} , σ_{zz}^{eff} – соответственно перемещение и напряжение эффективного (осредненного) композита.

Из задачи чистого сдвига в плоскости поперек волокна определяется эффективный модуль поперечного сдвига G_{23} . При решении такой задачи формируется система уравнений (для классического композита система содержит 8 уравнений с 8 неизвестными, а для модифицированного композита система содержит 12 уравнений с 12 неизвестными) из условий несингулярности в центре волокна ($r = 0$) $D_2^{(1)} = D_4^{(1)} = 0$; непрерывности перемещений и напряжений на границах идеального контакта фаз $u_r^{(i)}(r_i, \theta) = u_r^{(i+1)}(r_i, \theta)$, $u_\theta^{(i)}(r_i, \theta) = u_\theta^{(i+1)}(r_i, \theta)$, $\sigma_{rr}^{(i)}(r_i, \theta) = \sigma_{rr}^{(i+1)}(r_i, \theta)$, $\sigma_{r\theta}^{(i)}(r_i, \theta) = \sigma_{r\theta}^{(i+1)}(r_i, \theta)$, ($i = 1, 2, 3$); внешнего граничного условия на бесконечности ($r_{N+1} \rightarrow \infty$) $\sigma_{rr}^{N+1}(r_{N+1}, \theta) = \cos(2\theta)$, $\sigma_{r\theta}^{N+1}(r_{N+1}, \theta) = \sin(2\theta)$ и условия энергетической поверхности на контакте $\int_S (\sigma_{rr}^{N+1} u_r^{eff} + \sigma_{r\theta}^{N+1} u_\theta^{eff} - \sigma_{rr}^{eff} u_r^{N+1} - \sigma_{r\theta}^{eff} u_\theta^{N+1})_{r=r_N} dS = 0$, где u_r^{N+1} , u_θ^{N+1} , σ_{rr}^{N+1} , $\sigma_{r\theta}^{N+1}$ – соответственно перемещение и напряжение на бесконечности, u_r^{eff} , u_θ^{eff} , σ_{rr}^{eff} , $\sigma_{r\theta}^{eff}$ – соответственно перемещение и напряжение эффективного (осредненного) композита.

Эффективный модуль упругости в плоскости поперек волокна E_2 определяется по формуле [34]

$$E_2 = \frac{4G_{23}K_2}{K_2 + G_{23} + 4(\nu_{12})^2 G_{23}K_2/E_1}. \quad (9)$$

Таким образом, определяются все константы необходимые для моделирования устойчивости классического и модифицированного композита с использованием МКЭ и двух теорий – классической теории пластины (3) и теории пластин первого порядка, учитывающей сдвиговые деформации (2).

3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИММЕТРИЧНОГО СЛОИСТОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО КОМПОЗИТА

Рассмотрим два вида композита: 1) классический композит, состоящий из углеродного волокна марки Т-650 и эпоксидной матрицы; 2) модифицированный композит, состоящий из углеродного волокна марки Т-650, вискеризованного межфазного слоя, образованного УНТ и эпоксидной матрицей, и связующего – эпоксидной матрицы. Механические свойства компонент композита приведены в Таблице 1. Объемные содержания включений в таких композитах примем равными 0.5, 0.6, 0.7, 0.78 (см. (3)).

Таблица 1.

Механические свойства компонентов исследуемых композитов [34].

Материалы Параметры	Фаза		
	Углеродное волокно Т-650	УНТ	Эпоксидная
- Продольный модуль Юнга (ГПа)	241	1100	3
- Поперечный модуль Юнга (ГПа)	14,5	-	-
- Модуль продольного сдвига (ГПа)	22,8	-	-
- Модуль поперечного сдвига (ГПа)	4,8	-	-
- Коэффициент Пуассона	0,27	0,14	0,3

Для модифицированного композита с вискеризованными волокнами, объемное содержание вискерсов принимается равным 65% – это максимально возможное объемное содержание вискерсов в случае, когда $d_b = 0,00051$ мкм, $l_b = 1$ мкм, $D = 5$ мкм [34] (см. (4)).

Эффективные свойства исследуемых композитов, полученные с использованием (5)-(9), приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Эффективные свойства исследуемых композитов.

	Классический композит				Модифицированный композит			
	0.5	0.6	0.7	0.78	0.5	0.6	0.7	0.78
c								
E_2 , ГПа	4.53	4.92	5.35	5.74	6.88	8.38	10.5	12.8
E_1 , ГПа	63.8	76	88.2	97.8	63.7	74.5	86.7	96.2
$G_{12} = G_{13}$, ГПа	1.84	2.04	2.25	2.45	2.48	2.95	3.56	4.2
G_{23} , ГПа	1.69	1.84	2.02	2.18	2.26	2.48	3.26	4.86
ν_{12}	0.015	0.013	0.011	0.01	0.014	0.012	0.009	0.008

Технические характеристики (модуль упругости вдоль E_x и поперек E_y волокна, модуль продольного сдвига G_{xy} , коэффициент Пуассона ν_{xy}) симметричного слоистого композита определяются по известным формулам [34]:

$E_x = (A_{11}A_{22} - A_{12}^2)/(tA_{22}) = E_y$, $G_{xy} = A_{66}/t$, $\nu_{xy} = A_{12}/A_{22}$, где t – толщина пластины.

На рис.1 приведены графики зависимостей технических констант – модуля упругости (рис.1а) и модуля продольного сдвига (рис.1б) слоистого композита, образованного модифицированными и традиционными волокнами, от угла укладки волокон. Рис.1 получен для объемного содержания включения (см. (3)) 78%, такие же зависимости были получены для объемных содержаний включений 50, 60 и 70%.

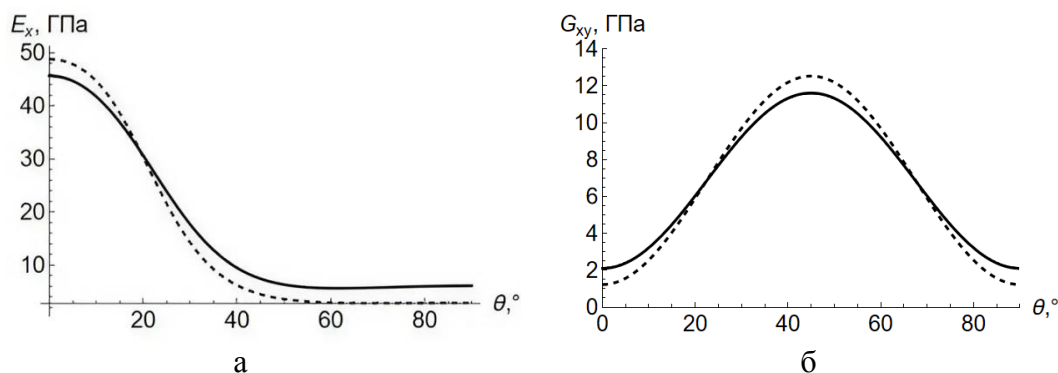


Рис.1. График зависимости технических констант слоистого композита с объемным содержанием включения 78% от угла укладки волокон а) модуль упругости, б) модуль продольного сдвига (— — — — — модифицированный композит, — — — — — традиционный композит).

Максимальные значения технических констант модифицированного и традиционного композита отличаются незначительно и есть углы укладки, при которых традиционный композит оказывается лучше модифицированного. Модуль упругости классического слоистого композита при $\theta = 0^\circ$ несколько больше, нежели модуль упругости модифицированного слоистого композита, в то время как при $\theta = 90^\circ$ наблюдается прямо противоположный результат. Это может быть объяснено тем, что модуль упругости вдоль волокна у модифицированного композита меньше, чем модуль упругости вдоль волокна у классического композита с тем же объемным содержанием включения, а модуль упругости поперек волокна у модифицированного композита больше, чем модуль упругости поперек волокна у классического композита с тем же объемным содержанием включения (см. Таблицу 2). Модуль сдвига слоистого композита достигает максимума при $\theta = 45^\circ$ и имеет минимальные значения при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 90^\circ$). В точке максимума классический слоистый композит имеет лучшие эффективные свойства нежели модифицированный слоистый композит.

Однако, отличие в технических характеристиках сравниваемых композитов было бы гораздо больше, если бы сравнивался модифицированный композит с традиционным композитом, в котором объемное содержание волокна такое же, как в модифицированном композите. Например, в случае предельного объемного содержания включения в рассматриваемом модифицированном композите, объемное содержание волокна в традиционном композите составляет всего 40% (см. (1)), технические характеристики для такого композита показаны на рис.2.

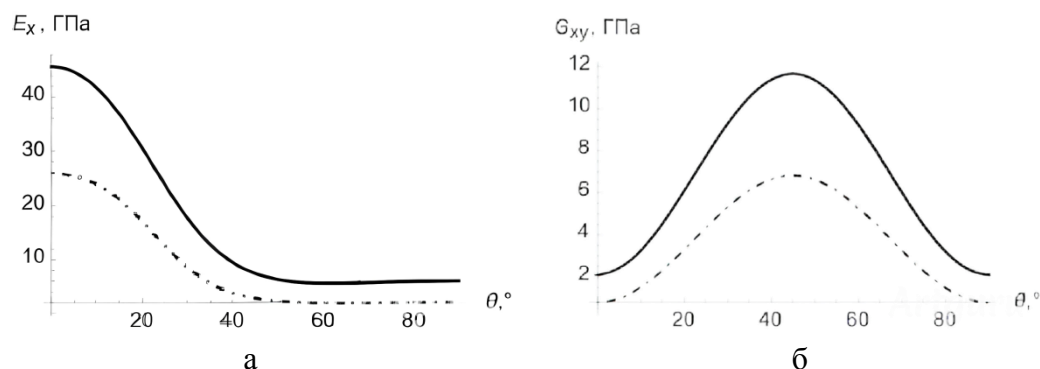


Рис.2. График зависимости технических констант слоистого композита от угла укладки волокон а) модуль упругости, б) модуль продольного сдвига (— — модифицированный композит с объемным содержанием углеродного волокна 40%, - - - - - традиционный композит с объемным содержанием углеродного волокна 40%).

Согласно рис.2 технические характеристики пластины из модифицированного композита значительно больше технических характеристик пластины из традиционного композита при любом угле укладки волокон. Технический модуль упругости модифицированного композита больше технического модуля упругости традиционного композита при $\theta = 0^\circ$ в 1.77 раз, а при $\theta = 90^\circ$ в 2.92 раза. Технический модуль сдвига модифицированного композита больше технического модуля сдвига традиционного композита при $\theta = 0^\circ$ в 2.5 раза, а при $\theta = 45^\circ$ в 1.74 раз.

4. ОБ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПОЗИТНЫХ СЛОИСТЫХ ПЛАСТИН С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ВОЛОКНОМ

Исследуем аналитически и численно поведение свободно опертых квадратных пластин с укладками волокон $+45^\circ/-45^\circ$ и $0^\circ/90^\circ$ в условиях сжимающих нагрузжений в плоскости пластины вдоль одной из осей. Для этого рассматривается пластина размером $100 \times 100 \times 1$ мм, состоящая из 4 слоев с симметричной укладкой и толщиной одного слоя 0,25 мм. Эффективные свойства, применяемые при аналитическом и численном анализе исследуемых композитных пластин, приведены в Таблице 2. Устойчивость рассчитывается для слоистых композитных квадратных пластин с различным объемным содержанием включений (50%, 60%, 70%, 78%).

При численном исследовании использовался МКЭ. Пластина имеет следующие внешние закрепления: ненагруженные кромки ограничиваются в движении вдоль оси X и Z; нагруженные кромки соответствуют граничным условия свободно опертой пластины, одна из сторон ограничивается в движении вдоль оси X и Z, а для второй стороны ограничиваются движения вдоль всех осей [38]. К кромкам пластины прикладывается сжимающая нагрузка в 1 Н в направлении оси Y. Пластина имела 121 узел и 100 элементов. В качестве конечных элементов для пластины задаются плоские четырехугольные конечные элементы (тип CQUAD4). В результате расчета была зафиксирована одна и та же форма потери устойчивости для всех исследуемых пластин.

Аналитическое исследование проводится с использованием (2), учитывающей влияние поперечной сдвиговой деформации на критическую

нагрузку, и (3), которая пренебрегает эффектом поперечной сдвиговой деформации.

На рис.3 представлены графики зависимости критической нагрузки от объемного содержания включения для пластины, образованной модифицированными (рис.3а) и классическими волокнами (рис.3б) с укладкой $0^\circ/90^\circ$. А на рис.4 представлены графики зависимости критической нагрузки от объемного содержания включения для пластины, образованной модифицированными (рис.4а) и классическими волокнами (рис.4б) с укладкой $+45^\circ/-45^\circ$.

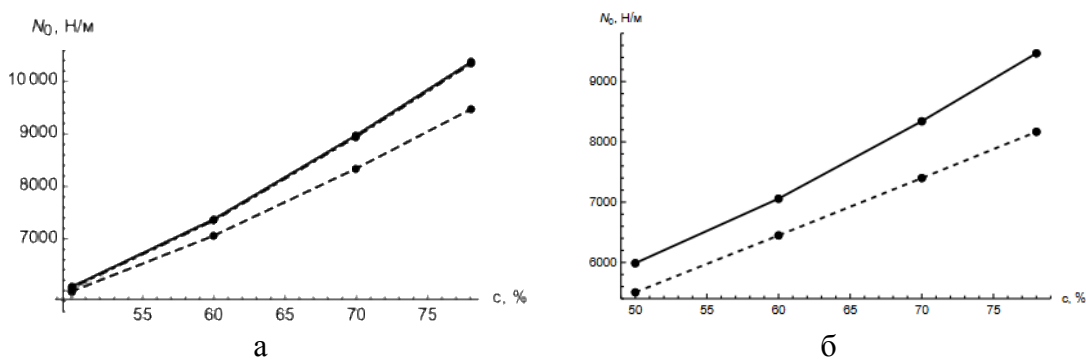


Рис.3. Зависимость критической нагрузки, выдерживаемой композитной пластиной с укладкой волокон $0^\circ/90^\circ$, от объемного содержания включения: а) включение – углеродное волокно с выращенными на его поверхности УНТ, б) включение – классическое углеродное волокно (— — значение критической нагрузки получено с использованием (3), - - - - - значение критической нагрузки получено с использованием (2), - - - - - значение критической нагрузки получено МКЭ).

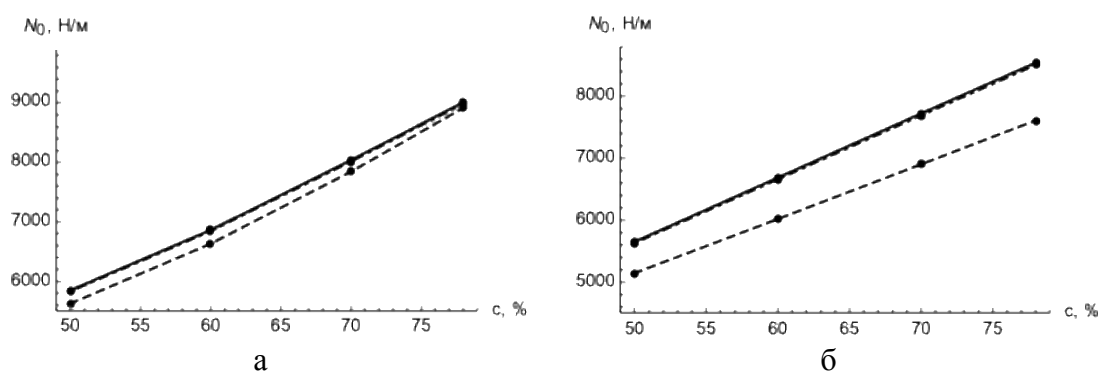


Рис.4. Зависимость критической нагрузки, выдерживаемой композитной пластиной с укладкой волокон $+45^\circ/-45^\circ$, от объемного содержания включения: а) включение – углеродное волокно с выращенными на его поверхности УНТ, б) включение – классическое углеродное волокно (— — значение критической нагрузки получено с использованием (3), - - - - - значение критической нагрузки получено с использованием (2), - - - - - значение критической нагрузки получено МКЭ).

Значения критических нагрузок, полученные аналитически с использованием (2)-(3), почти совпали, поэтому можно заключить, что для исследуемых пластин

поперечная сдвиговая деформация не оказывает значительного влияния. Тем не менее, результаты, полученные аналитически, несколько завышены по сравнению с результатами, полученными МКЭ. Разница в результатах составляет не более 10%. Эта разница может быть связана с тем, что аналитическое решение не учитывает прогиб, и задача линеаризуется. Использование разных подходов к оценке критической нагрузки позволяет отследить один и тот же характер увеличения критической нагрузки, выдерживаемой исследуемыми пластинами, по мере увеличения объемного содержания как модифицированного, так и не модифицированного включения. Кроме этого наблюдается, что пластины, образованные модифицированными волокнами, выдерживают большие нагрузки, нежели пластины, образованные классическими волокнами, хоть и объемное содержание жесткого углеродного волокна в пластинах с традиционными волокнами значительно больше, чем в модифицированных. Так, например, аналитически прогнозируется, что пластины с укладкой $0^\circ/90^\circ$, образованные модифицированными волокнами с объемным содержанием включения 50%, выдерживают нагрузку в 1.2 раза больше, чем такие же пластины с такой же укладкой и с тем же объемным содержанием включения, но образованные традиционными волокнами. В то время как пластины с укладкой $0^\circ/90^\circ$, образованные модифицированными волокнами с максимально возможным объемным содержанием включения 78%, выдерживают нагрузку в 1.4 раза больше, чем такие же пластины с такой же укладкой и с тем же объемным содержанием включения, но образованные традиционными волокнами.

Оказалось, что укладка $0^\circ/90^\circ$ для модифицированных композитов с позиции увеличения критической нагрузки предпочтительнее, нежели укладка $+45^\circ/-45^\circ$. Так, при объемном содержании модифицированного включения, равного 78%, замена укладки с $+45^\circ/-45^\circ$ на укладку $0^\circ/90^\circ$ позволяет увеличить критическую нагрузку, выдерживаемую исследуемой пластиной более чем в 1.15 раза согласно аналитическому расчету и более чем 1.06 раза согласно численному расчету.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования устойчивости свободно опертых модифицированных композитных пластин с модифицированными волокнами определялись эффективные свойства композитной ячейки и симметричной слоистой пластины. Исследовались пластины со схемами укладок волокон $0^\circ/90^\circ$ и $+45^\circ/-45^\circ$. Определялась степень влияния объемного содержания модифицированного включения на эффективные механические свойства композита и технические константы симметричной слоистой пластины. Такие же расчеты проводились для симметричной слоистой композитной пластины, слои которой образованы традиционными волокнами. Проводилось сравнение результатов, полученных для пластин из модифицированных композитов с результатами, полученными для пластин из традиционных композитов. Поскольку в расчетах было принято, что в модифицированных композитах часть традиционного волокна заменена вискеризованным межфазным слоем, расхождения в значениях технических констант оказалось незначительным. Однако в работе показано, что при одинаковых объемных содержаниях углеродного волокна в модифицированном и традиционном композите технические характеристики симметричной слоистой пластины с модифицированными волокнами при любом

угле укладки волокон значительно больше технических характеристик такой же пластины с традиционными волокнами. Так, например, технический модуль упругости пластины из модифицированного композита больше в 2.92 раза технического модуля упругости пластины из традиционного композита при угле укладки волокон 90° . Анализ пластин на устойчивость показал, что форма потери устойчивости не зависит от объемного содержания включений. Устойчивость композитных слоистых пластин исследовалась как численно, так и аналитически. Оба подхода к анализу показали, что пластины из модифицированных композитных волокон выдерживают в 1.06-1.4 раза (зависит от объемного содержания включения и схемы укладки волокон) большие критические нагрузки, чем пластины из традиционных волокон. При аналитическом и МКЭ исследованиях влияния углов укладки волокон на устойчивость пластин было обнаружено, что для модифицированного композита укладка $0^\circ/90^\circ$ оказывается предпочтительнее, нежели укладка $+45^\circ/-45^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бикша Д. *Использование композитных материалов в оборонной промышленности и аэрокосмической индустрии* // Вестник Электроники. – 2014. – №1. – С.24-27.
2. Маркин В.Б. *Конструкции из композиционных материалов: учебное пособие*. – Барнаул: АлтГТУ, 2022. – 253 с.
3. Москвичев В.В., Лепихин А.М., Буров А.Е., Доронин С.В., Москвичев Е.В. *Расчетно-экспериментальная оценка прочности и предельных состояний композитных конструкций космических аппаратов* // Ракетно-космическая техника. – 2019. – №3. – С.140-148.
4. Ананьева Е.С., Ананьев С.В. *Плазмомеханическая модификация поверхности углеродных волокон* // Ползуновский вестник. – 2009. – №4. – С.220-222.
5. Ананьева Е.С., Ананьев С.В. *Влияние плазмохимической модификации поверхности углеродных волокон на механизм разрушения углепластиков* // Вестник ТГУ. – 2010. – № 3. – С.1007-1009.
6. Гарифуллин А.Р. *Применение плазменного метода модификации поверхности углеродных волокон для повышения показателей механических свойств углеродных композиционных материалов* // Вестник технологического университета. – 2016. – №18. – С.76-77.
7. Гарифуллин А.Р., Абдуллин И.Ш., Ибрафиллов И.Х., Мингалиев Р.Р., Скидченко Е.А. *Повышение показателей адгезионных свойств композитов на основе углеродных волокон высокочастотным разрядом при пониженном давлении* // Вестник технологического университета. – 2015. – №17. – С.169-170.
8. Леонов В.В., Артемьева О.А., Кравцова Е.Д. *Материаловедение и технология композиционных материалов. Курс лекций*. – Красноярск: СФУ, 2007. – 241 с.
9. Lurie S., Minhat M. *Application of generalized self-consistent method to predict effective elastic properties of bristled fiber composites* // Composites Part B: Engineering. – 2014. – No.61. – Pp.26-40.
10. Lurie S.A. *On estimating structural stresses in composites with whiskerized fibers* // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018. – No.6. – Pp.294-308.

11. Sharma S.P., Lakkad S.C. *Compressive strength of carbon nanotubes grown on carbon fiber reinforced epoxy matrix multi-scale hybrid composites* // Surface and Coatings Technology. – 2010. – No.2. – Pp.350-355.
12. Wang Y. *SiO₂-coated CdTe nanowires: bristled nano centipedes* // Nano Letters. – 2004. – No.2. – Pp.225-231.
13. Lurie S., Minhat M., Tuchkova N. *Estimation of effective dynamic properties of bristled fiber composite materials based on a self-consistent Eshelby method* // Journal of Engineering Mathematics. – 2015. – No.95. – Pp.7-29.
14. Кривень Г.И. *Оценка демпфирующих свойств композитов* // Труды МАИ. – 2022. – №127.
15. Кривень Г.И., Шавелкин Д.С. *Колебание балки, состоящей из волокнистого композита с вязкоупругим покрытием* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2022. – №4. – С.511-523.
16. Garcia E.J. *Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ* // Composites Science and Technology. – 2008. – No.9. – Pp.2034-2041.
17. Veedu V.P. *Multifunctional composites using reinforced laminae with carbon-nanotube forests* // Nature materials. – 2006. – No.6. – Pp.457-462.
18. Alipour Skandani A. *Enhanced vibration damping of carbon fibers-ZnO nanorods hybrid composites* // Applied Physics Letters. – 2012. – No.7. – Pp.73-111.
19. Guz I.A., Rushchitsky J.J., Guz A.N. *Effect of a special reinforcement on the elastic properties of micro-and nanocomposites with polymer matrix* // The Aeronautical Journal. – 2013. – No.1196. – Pp.1019-1036.
20. Sharma S.P., Lakkad S.C. *Compressive strength of carbon nanotubes grown on carbon fiber reinforced epoxy matrix multi-scale hybrid composites* // Surface and Coatings Technology. – 2010. – No.2. – Pp.350-355.
21. Кривень Г.И., Шавелкин Д.С. *О локальной потере устойчивости модифицированных композитов с висцеризованными волокнами* // Ученые записки Казанского университета. Физико-математические науки. – 2023. – №4. – С.344-360.
22. Хучунаев Б.М., Геккиева С.О., Будаев А.Х. *Исследование реагентов на основе кластеров оксида цинка* // Международный научный журнал «Символ науки». – 2022. – №12. – С.17-21.
23. Хархуш А.А., Сейткасымова А.А., Юртов Е.В. *Влияние наночастиц оксидов металлов и вспучивающегося антипирена на скорость горения нанокмпозиционных материалов на основе ненасыщенной полиэфирной смолы* // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – №8. – С.113-114.
24. Lv P. *Increasing the interfacial strength in carbon fiber/epoxy composites by controlling the orientation and length of carbon nanotubes grown on the fibers* // Carbon. – 2011. – №14. – Pp.4665-4673.
25. Zhang F.H. *Interfacial shearing strength and reinforcing mechanisms of an epoxy composite reinforced using a carbon nanotube/carbon fiber hybrid* // Journal of materials science. – 2009. – No.44. – Pp.3574-3577.
26. Tsirka K., Tzounis L., Avgeropoulos A., Liebscher M., Mechtcherine V., Paipetis A.S. *Optimal synergy between micro and nano scale: hierarchical all carbon composite fibers for enhanced stiffness, interfacial shear strength and Raman strain sensing* // Compos Sci Technol. – 2018. – No.165. – Pp.240-249.

27. Fan W., Wang Y., Wang C., Chen J., Wang Q., Yuan Y. *High efficient preparation of carbon nanotube-grafted carbon fibers with the improved tensile strength* // Appl. Surf. Sci. – 2016. – No.364. – Pp.539-551.
28. Guo J., Lu C., An F. *Effect of electrophoretically deposited carbon nanotubes on the interface of carbon fiber reinforced epoxy composite* // J. Mater. Sci. – 2012. – No.47. – Pp.2831-2836.
29. Qiang S., Ke-zhi L., Hai-liang L., He-jun L., Chang R. *Grafting straight carbon nanotubes radially onto carbon fibers and their effect on the mechanical properties of carbon/carbon composites* // Carbon. – 2012. – No.50. – Pp.3943-3960.
30. Peng L., Yi-yu F., Peng Z., Hui-min C., Naiqin Z., Wei F. *Increasing the interfacial strength in carbon fiber/epoxy composites by controlling the orientation and length of carbon nanotubes grown on the fibers* // Carbon. – 2011. – No.49. – Pp.4665-4673.
31. Кривень Г.И., Сенина Е.С. Шавелкин Д.С. *Рассуждения об исследовании механизма отслоения стальной пластины модифицированной углеродными нанотрубками при проведении эксперимента на вытягивание пластины из блока матрицы* // Механика деформируемых тел. СТИН. – 2024. – №4. – С.20-23.
32. Gusev A.A., Lurie S.A. *Loss Amplification Effect in Multiphase Materials with Viscoelastic Interfaces* // Macromolecules. – 2009. – No.42. – Pp.5372-5377.
33. ГОСТ 33519-2015. *Композиты полимерные. Метод испытаний на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах.* – М., 2016. – 28 с.
34. Chatzigeorgiou G., Siedel G.D., Lagoudas D. *Effective mechanical of “fuzzy fiber” composites* // Composites. – 2012. – No.43. – Pp.2577-2593.
35. Reddy J.N. *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis.* – USA: Boca Raton., 1945. – 858 p.
36. Кристенсен Р.М. *Введение в механику композитов.* – М: Мир, 1982. – 334 с.
37. Лурье С.А., Кривень Г.И., Рабинский Л.Н. *О прочности модифицированного композита с вискеризованными волокнами* // Композиты и наноструктуры. – 2019. – №1. – С.1-15.
38. Ozben T. *Analysis of critical buckling load of laminated composites plate with different boundary conditions using FEM and analytical methods* // Computational Materials Science. – 2009. – No.45. – Pp.1006-1015.

REFERENCES

1. Biksha D. *Ispol'zovanie kompozitnykh materialov v oboronnoj promyshlennosti i aehrokosmicheskoy industrii [The use of composite materials in the defense and aerospace industries]*. Vestnik Ehlektroniki, 2014, No.1, Pp.24-27.
2. Markin V.B. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov: uchebnoe posobie [Structures made of composite materials: a textbook]*. Barnaul, AltGTU, 2022, 253 p.
3. Moskvichev V.V., Lepikhin A.M., Burov A.E., Doronin S.V., Moskvichev E.V. *Raschetno-ehksperimental'naya otsenka prochnosti i predel'nykh sostoyanij kompozitnykh konstruktsij kosmicheskikh apparatov [Calculation-experimental assessment of strength and limit states of composite structures of spacecraft]*. Raketno-kosmicheskaya tekhnika, 2019, No.3, Pp.140-148.

4. Ananyeva E.S., Ananyev S.V. *Plazmomekhanicheskaya modifikatsiya poverkhnosti uglerodnykh volokon [Plasmomechanical modification of the carbon fiber surface]*. Polzunovskij vestnik, 2009, No.4, Pp.220-222.
5. Ananyeva E.S., Ananyev S.V. *Vliyanie plazmokhimicheskoy modifikatsii poverkhnosti uglerodnykh volokon na mekhanizm razrusheniya ugleplastikov [The effect of plasmochemical modification of the surface of carbon fibers on the mechanism of destruction of carbon fiber plastics]*. Vestnik TGU, 2010, No.3, Pp.1007-1009.
6. Garifullin A.R. *Primenenie plazmennogo metoda modifikatsii poverkhnosti uglerodnykh volokon dlya povysheniya pokazatelej mekhanicheskikh svoystv uglerodnykh kompozitsionnykh materialov [Application of the plasma method of surface modification of carbon fibers to improve the mechanical properties of carbon composite materials]*. Vestnik tekhnologicheskogo universiteta, 2016, No.18, Pp.76-77.
7. Garifullin A.R., Abdullin I.Sh., Israfilov I.Kh., Mingaliev R.R., Skidchenko E.A. *Povyshenie pokazatelej adgezionnykh svoystv kompozitov na osnove uglerodnykh volokon vysokochastotnym razryadom pri ponizhenom davlenii [Improving the adhesive properties of carbon fiber-based composites by high-frequency discharge at reduced pressure]*. Vestnik tekhnologicheskogo universiteta, 2015, No.17, Pp.169-170.
8. Leonov V.V., Artemyeva O.A., Kravtsova E.D. *Materialovedenie i tekhnologiya kompozitsionnykh materialov. Kurs leksij [Materials science and technology of composite materials. A course of lectures]*. Krasnoyarsk, SFU, 2007, 241 p.
9. Lurie S., Minhat M. *Application of generalized self-consistent method to predict effective elastic properties of bristled fiber composites*. Composites Part B, Engineering, 2014, No.61, Pp.26-40.
10. Lurie S.A. *On estimating structural stresses in composites with whiskerized fibers*. International Journal of Civil Engineering and Technology, 2018, No.6, Pp.294-308.
11. Sharma S.P., Lakkad S.C. *Compressive strength of carbon nanotubes grown on carbon fiber reinforced epoxy matrix multi-scale hybrid composites*. Surface and Coatings Technology, 2010, No.2, Pp.350-355.
12. Wang Y. *SiO₂-coated CdTe nanowires: bristled nano centipedes*. Nano Letters, 2004, No.2, Pp.225-231.
13. Lurie S., Minhat M., Tuchkova N. *Estimation of effective dynamic properties of bristled fiber composite materials based on a self-consistent Eshelby method*. Journal of Engineering Mathematics, 2015, No.95, Pp.7-29.
14. Kriven G.I. *Otsenka dempfiruyushchikh svoystv kompozitov [Evaluation of damping properties of composites]*. M., Trudy MAI, 2022, No.127.
15. Kriven G.I., Shavelkin D.S. *Kolebanie balki, sostoyashhej iz voloknistogo kompozita s vyazkouprugim pokrytiem [Oscillation of a beam consisting of a fibrous composite with a viscoelastic coating]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2022, No.4, Pp.511-523.
16. Garcia E.J. *Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ*. Composites Science and Technology, 2008, No.9, Pp.2034-2041.

17. Veedu V.P. *Multifunctional composites using reinforced laminae with carbon-nanotube forests*. Nature materials, 2006, No.6, Pp.457-462.
18. Alipour Skandani A. *Enhanced vibration damping of carbon fibers-ZnO nanorods hybrid composites*. Applied Physics Letters, 2012, No.7, Pp.73-111.
19. Guz I.A., Rushchitsky J.J., Guz A.N. *Effect of a special reinforcement on the elastic properties of micro-and nanocomposites with polymer matrix*. The Aeronautical Journal, 2013, No.1196, Pp.1019-1036.
20. Sharma S.P., Lakkad S.C. *Compressive strength of carbon nanotubes grown on carbon fiber reinforced epoxy matrix multi-scale hybrid composites*. Surface and Coatings Technology, 2010, No.2, Pp.350-355.
21. Kriven G.I., Shavelkin D.S. *O lokal'noj potere ustojchivosti modifitsirovannykh kompozitov s viskerizovannymi voloknami [On Local Stability Loss of Modified Composites with Whiskerized Fibers]*. Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki, 2023, No.4, Pp.344-360.
22. Khuchunaev B.M., Gekkieva S.O., Budaev A.Kh. *Issledovanie reagentov na osnove klasterov oksida tsinka [Studies of reagents based on zinc oxide clusters]*. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal "Simvol nauki", 2022, No.12, Pp.17-21.
23. Kharkhush A.A., Seytkasymova A.A., Yurtov E.V. *Vliyanie nanochastits oksidov metallov i vspuchivayushhegosya antipirena na skorost' goreniya nanokompozitsionnykh materialov na osnove nenasyshhennoj poliehfirnoj smoly [The influence of metal oxides nanoparticles and intumescent flame retardant on the burning rate of nanocomposite materials based on unsaturated polyester resin]*. Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii, 2020, No.8, Pp.113-114.
24. Lv P. *Increasing the interfacial strength in carbon fiber/epoxy composites by controlling the orientation and length of carbon nanotubes grown on the fibers*. Carbon, 2011, No.14, Pp.4665-4673.
25. Zhang F.H. *Interfacial shearing strength and reinforcing mechanisms of an epoxy composite reinforced using a carbon nanotube/carbon fiber hybrid*. Journal of materials science, 2009, No.44, Pp.3574-3577.
26. Tsirka K., Tzounis L., Avgeropoulos A., Liebscher M., Mechtcherine V., Paipetis A.S. *Optimal synergy between micro and nano scale: hierarchical all carbon composite fibers for enhanced stiffness, interfacial shear strength and Raman strain sensing*. Compos Sci Technol, 2018, No.165, Pp.240-249.
27. Fan W., Wang Y., Wang C., Chen J., Wang Q., Yuan Y. *High efficient preparation of carbon nanotube-grafted carbon fibers with the improved tensile strength*. Appl. Surf. Sci., 2016, No.364, Pp.539-551.
28. Guo J., Lu C., An F. *Effect of electrophoretically deposited carbon nanotubes on the interface of carbon fiber reinforced epoxy composite*. J. Mater. Sci., 2012, No.47, Pp.2831-2836.
29. Qiang S., Ke-zhi L., Hai-liang L., He-jun L., Chang R. *Grafting straight carbon nanotubes radially onto carbon fibers and their effect on the mechanical properties of carbon/carbon composites*. Carbon, 2012, No.50, Pp.3943-3960.
30. Peng L., Yi-yu F., Peng Z., Hui-min C., Naiqin Z., Wei F. *Increasing the interfacial strength in carbon fiber/epoxy composites by controlling the orientation and length of carbon nanotubes grown on the fibers*. Carbon, 2011, No.49, Pp.4665-4673.

31. Kriven G.I., Senina E.S., Shavelkin D.S. *Rassuzhdeniya ob issledovanii mekhanizma otsloeniya stal'noj plastiny modifitsirovannoj uglerodnymi nanotrubkami pri provedenii ehksperimenta na vytyagivanie plastiny iz bloka matritsy* [Considerations on the study of the mechanism of delamination of a steel plate reinforced with carbon nanotubes during the pull-out test]. *Mekhanika deformiruemykh tel*. STIN, 2024, No.4, Pp.20-23.
32. Gusev A.A., Lurie S.A. *Loss Amplification Effect in Multiphase Materials with Viscoelastic Interfaces*. *Macromolecules*, 2009, No.42, Pp.5372-5377.
33. *GOST 33519-2015. Kompozity polimernye. Metod ispytaniy na szhatie pri normal'noj, povyshennoj i ponizhennoj temperaturakh* [Polymer composites. Compression test method at normal, elevated and lowered temperatures]. Moskva, 2016, 28 p.
34. Chatzigeorgiou G., Siedel G.D., Lagoudas D. *Effective mechanical of "fuzzy fiber" composites*. *Composites*, 2012, No.43, Pp.2577-2593.
35. Reddy J.N. *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis*. USA, Boca Raton, 1945, 858 p.
36. Kristensen R.M. *Vvedenie v mekhaniku kompozitov* [Introduction to Composite Mechanics]. Moskva, Mir, 1982, 334 p.
37. Lurie S.A., Kriven G.I., Rabinsky L.N. *O prochnosti modifitsirovannogo kompozita s viskerizovannymi voloknami* [On the strength of modified composite with whiskered fibers]. *Kompozity i nanostruktury*, 2019, No.1, Pp.1-15.
38. Ozben T. *Analysis of critical buckling load of laminated composites plate with different boundary conditions using FEM and analytical methods*. *Computational Materials Science*, 2009, No.45, Pp.1006-1015.

Поступила в редакцию 11 марта 2025 года.

Сведения об авторах:

Кривень Галина Ивановна – к.т.н., ст. преподаватель, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: Kriven_Galina@inbox.ru

Сенина Елена Сергеевна – техник, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: Lena.senina.2002@mail.ru

Устенко Анастасия Дмитриевна – н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: audlord@yandex.ru