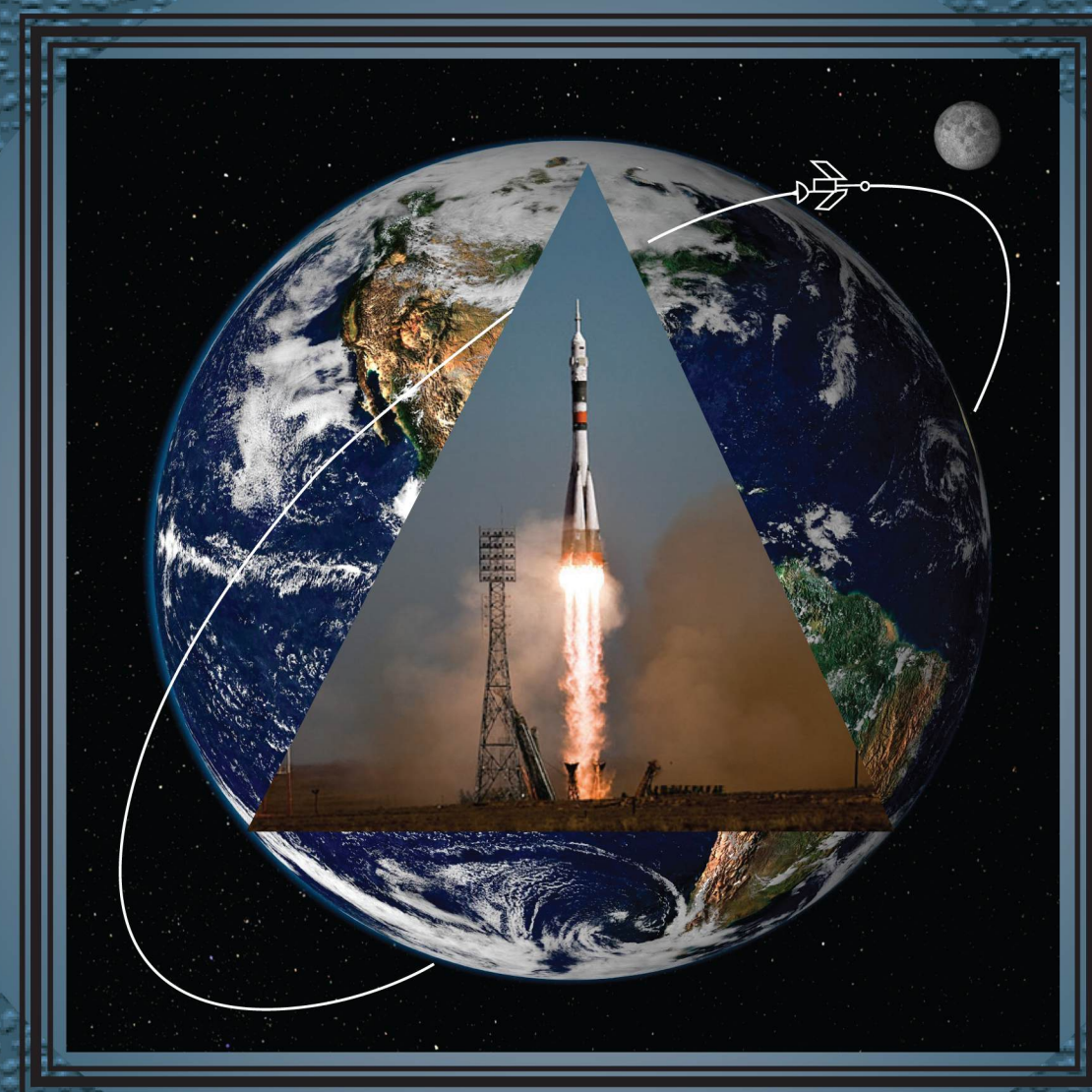


КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

1



Москва 2021



Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России
(4 выпуска)
Подписной индекс **79379**
Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал
Конструкции из композиционных материалов
(4 выпуска)
Подписной индекс **80089**
Издается с 1981 года



Научно-технический журнал
Информационные технологии в проектировании и производстве
(4 выпуска)
Подписной индекс **79378**
Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал
Экология промышленного производства
(4 выпуска)
Подписной индекс **80090**
Издается с 1993 года



Научно-практический журнал
Вопросы защиты информации
(4 выпуска)
Подписной индекс **79187**
Издается с 1974 года

Все издания ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства науки и высшего образования России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);
факс: 8 (495) 491-44-80.
E-mail: izdanie@ntckompas.ru

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ОБОРОННОГО КОМПЛЕКСА "КОМПАС"»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАКЕТНЫЙ ЦЕНТР имени АКАДЕМИКА В. П. МАКЕЕВА»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»
имени АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЕВА»

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Орган Научного совета РАН по механике
конструкций из композиционных материалов

Выпуск 1 (161)

Издается с 1981 г.

Москва 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

Фирсанов В. В., Гавва Л. М. Анализ краевых эффектов и основного напряжённо-деформированного состояния конструктивно-анизотропных панелей летательных аппаратов с применением композиционных материалов по уточнённой теории..... 3

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

Гавва Л. М. Экспериментальные исследования устойчивости конструктивно-анизотропных панелей с применением композиционных материалов для верификации уточнённых математических моделей..... 10

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И СОЕДИНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Дементьев И. И. Технологическая система для релаксации остаточных напряжений в композитных конструкциях бинарной вибротермической обработкой 16

Кованов А. Е., Мамонов А. В., Шишканов Н. В., Ирошников А. И. Разработка крупногабаритных составных мастер-моделей для изготовления композитных изделий авиационной и ракетно-космической техники 22

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Бурковская Н. П., Дмитриева В. В., Щетанов Б. В., Севостьянов Н. В. Высокотемпературные композиционные материалы на основе ниобия, полученные методом порошковой металлургии: свойства, применение (Часть 2) (Обзор)..... 27

Шевченко Н. В., Ризаханов Р. Н., Сигалаев С. К., Высотина Е. А., Ефремов В. П., Обручкова Л. Р. Гексагональная алмазная фаза в детонационных нано- и микроалмазах..... 35

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Еренков О. Ю., Яворская Е. В. Экспериментальное исследование возможности повышения прочности изделий из стеклопластика 40

Барышев А. Н., Таирова Л. П., Лебедева О. В., Дьяконов В. А. Исследование диэлектрических и прочностных свойств композиционных материалов на основе стеклянных и кварцевых волокон и эпоксидных смол..... 45

Главный редактор В. Г. Дегтярь, акад. РАН, д-р техн. наук,
генеральный директор, генеральный конструктор АО «ГРЦ Макеева»

Заместитель главного редактора Н. А. Тестоедов, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук,
генеральный директор АО «ИСС»

Ответственный секретарь Л. А. Жарких,
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

Редакционная коллегия:

А. В. Беляков, д-р хим. наук, проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева; **А. А. Боков**, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет им. Саймона Фрайзера, Канада; **П. И. Болтаев**, д-р техн. наук, АО «ГРЦ Макеева»; **О. Н. Будадин**, д-р техн. наук, проф., АО «ЦНИИСМ»; **С. В. Бухаров**, д-р техн. наук, проф., МАИ (НИУ); **В. В. Васильев**, акад. РАН, д-р техн. наук, ИПМ РАН; **В. Г. Дмитриев**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., ФГУП «ЦАГИ»; **С. Т. Калашников**, канд. техн. наук, АО «ГРЦ Макеева»; **А. Л. Каменева**, д-р техн. наук, доцент, ПНИПУ; **А. Н. Лихачев**, д-р техн. наук, проф., БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; **Е. С. Лукин**, д-р техн. наук, проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева; **С. А. Оглезнева**, д-р техн. наук, доцент, ПНИПУ; **А. В. Острик**, д-р техн. наук, проф., ИПХФ РАН; **Н. Г. Паничкин**, канд. физ.-мат. наук, доцент, ФГУП «ЦНИИМаш»; **Л. А. Резниченко**, д-р физ.-мат. наук, проф., НИИ физики ЮФУ; **С. Б. Сапожников**, д-р техн. наук, проф., НОЦ «Нанотехнологии» ЮУГУ; **Б. С. Сарбаев**, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; **И. Д. Симонов-Емельянов**, д-р техн. наук, проф., МИРЭА-Российский технологический университет (ИТХТ им. М. В. Ломоносова); **М. И. Соколовский**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., ПАО «НПО Искра»; **А. Н. Тимофеев**, д-р техн. наук, ОАО «Композит»; **В. И. Халиманович**, канд. физ.-мат. наук, проф., АО «ИСС»; **В. И. Хлыбов**, д-р физ.-мат. наук, АО «ГРЦ Макеева»; **Б. В. Щетанов**, д-р техн. наук, проф., ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ

Тел. (495) 491-77-67
E-mail: izdanie@ntckompas.ru

Перепечатка материалов и использование их в любой форме, в том числе электронной, без предварительного письменного разрешения редакции не допускаются.

- © Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»), 2021;
- © Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева» (АО «ГРЦ Макеева»), 2021;
- © Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС»), 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 539.3

Анализ краевых эффектов и основного напряжённо-деформированного состояния конструктивно-анизотропных панелей летательных аппаратов с применением композиционных материалов по уточнённой теории

В. В. ФИРСАНОВ, д-р техн. наук; Л. М. ГАВВА, канд. техн. наук

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Приведены соотношения математических моделей для исследования влияния краевых эффектов на медленно меняющееся основное напряжённо-деформированное состояние (НДС) конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов (КМ) и конструктивно-анизотропных панелей из изотропных материалов, усиленных композитными жгутами. Построены уравнения равновесия восемнадцатого и восьмого порядков с различной степенью уточнения моделей при закручивании рёбер жёсткости, находящихся в условиях одностороннего контакта с обшивкой. Проанализировано влияние конструктивных параметров на уровень перемещений и напряжений. Обоснована возможность упрощения математической модели в целях использования результатов в практике проектирования конструктивно-анизотропных панелей с применением композиционных материалов для перспективных изделий авиационной техники.

Ключевые слова: панели из композиционных материалов, панели из изотропных материалов, эксцентричный продольно-поперечный набор, краевые эффекты, основное напряжённо-деформированное состояние.

Широкое распространение конструктивно-анизотропных панелей в конструкциях образцов авиационной техники приводит к необходимости развития уточнённых методов оценки их НДС на этапе проектирования. Новые расчётные модели в уточнённой постановке составляют основу процессов проектирования и оптимизации.

Рассмотрены задачи изгиба плоских прямоугольных конструктивно-анизотропных панелей несущих поверхностей летательных аппаратов (ЛА) с эксцентричным продольно-поперечным набором и с несимметричной по толщине структурой многослойного пакета обшивки без подкрепления. Для изготовления панелей использованы следующие материалы:

- полимерные волокнистые КМ;
- изотропные материалы, усиленные композитными жгутами.

Панели находятся под действием произвольным образом распределённой поперечной нагрузки $q(x, y)$. Предположительно, условия закреплен-

ия торцевых кромок достаточно общие. Граничные условия по продольным кромкам соответствуют условиям частного вида, согласованным в отношении плоской задачи и задачи изгиба и позволяющим построить решение в одинарных тригонометрических рядах.

В рамках предлагаемых расчётных моделей при определении НДС конструктивно-анизотропных панелей рассмотрены тонкостенные подкрепляющие элементы, находящиеся вследствие одностороннего контакта с обшивкой в условиях сложного сопротивления: косоугольного изгиба и стеснённого кручения. Научная новизна исследования заключается в дальнейшем развитии теории упругих тонкостенных стержней применительно к общей контактной задаче для обшивки и ребра с уточнением модели последнего при закручивании. Теория тонкостенных упругих стержней свободна от гипотезы об отсутствии деформации сдвига срединной поверхности профиля. Правомочна математическая модель, построенная на основе принципов конструктивной анизотропии с "размазыванием" жесткостей подкрепляющих элементов по обшивке.

В работе [1] представлена трёхмерная теория прямоугольных пластин из КМ, свободная от гипотез Кирхгофа—Лява, выведены трёхмерные уравнения для определения НДС типа "пограничный слой" в краевых зонах вблизи жёстко закреплённого края пластины. Методом асимптотического интегрирования дифференциальных уравне-

Фирсанов Валерий Васильевич, профессор, заведующий кафедрой.

E-mail: K906@mail.ru

Гавва Любовь Михайловна, научный сотрудник, доцент.

E-mail: rva101@mail.ru, nio1asp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 октября 2020 г.

© Фирсанов В. В., Гавва Л. М., 2021

ний трёхмерной теории упругости построены итерационные процессы для уточнения результатов классической теории во внутренних областях пластины и в узких краевых зонах. Решение задачи краевой плоской деформации сведено к разрешению бигармонической задачи со специальными граничными условиями. Применён вариационный метод, аналогичный методу Власова—Канторовича. Исследование сходимости полученного решения позволило построить аппроксимирующие функции по толщине пластинки в виде полиномов высокого порядка. Для учёта реального характера закрепления панели в составе проектируемой конструкции выполнен анализ влияния упругости защемлённого края путём решения контактной задачи о пластинке с упругим изотропным полупространством. В рамках решения Флагмана—Буссинеска с использованием функций влияния и учётом дополнительной потенциальной энергии получены модифицированные граничные условия. Установлено, что влияние податливости закреплённого края ортотропной пластины из КМ приводит к некоторому снижению дополнительных напряжений краевой плоской деформации.

В работах [2—9] рассмотрены также статические задачи конструктивно-анизотропных панелей из КМ с учётом краевых эффектов.

Цель данной работы — анализ влияния краевых эффектов на основное НДС конструктивно-анизотропных панелей ЛА и обоснование возможности упрощения математических моделей путём их сведения к решению краевых задач для разрешающего уравнения с линейным дифференциальным оператором восьмого порядка. Постановка проблемы и предлагаемый подход к её решению являются новыми разработками и представляют интерес с точки зрения практики проектирования конструктивно-анизотропных панелей с применением КМ для перспективных изделий авиационной техники.

Постановка задачи. Основные соотношения общей математической модели

Согласно гипотезе Кирхгофа для компонент вектора перемещений k -го слоя обшивки

$$\begin{aligned} u_1^{(k)}(x, y, z) &= u_0(x, y) - \frac{\partial w}{\partial x}(x, y) z^{(k)}; \\ v_1^{(k)}(x, y, z) &= v_0(x, y) - \frac{\partial w}{\partial y}(x, y) z^{(k)}; \\ w_1^{(k)}(x, y, z) &= w(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

где $u_0(x, y)$ и $v_0(x, y)$ — перемещения u и v при $z = 0$;

$w(x, y)$ — прогиб.

Элементы набора в силу их совместной работы в условиях одностороннего контакта с обшивкой находятся в условиях косоугольного изгиба и стеснённого кручения. Для определения НДС рёбер жёсткости применён предложенный В. З. Власовым вариационный метод расчёта тонкостенных пространственных систем в перемещениях, дающий возможность построить теорию тонкостенных упругих стержней без введения гипотезы об отсутствии деформации сдвига срединной поверхности профиля. Перемещения и углы поворота панели и подкреплений по линиям контакта считаются равными.

Компоненты вектора перемещений k -го слоя композитных стрингеров вычисляются по формулам [10]

$$\begin{aligned} u_1^{(k)}(x, s) &= u_0(x) - \frac{\partial w}{\partial x}(x) z^{(k)} - \\ &\quad - \frac{\partial v_0}{\partial x}(x) y^{(k)} + [u_4(x)]_1 \omega_1^{(k)}(s); \\ v_1^{(k)}(x, s) &= w(x) z'^{(k)} + v_0(x) y'^{(k)} - \frac{\partial w}{\partial y}(x) \rho_1^{(k)}(s). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь деформация поперечного сечения $u_4(x)$ полагается свободной; $\omega_1^{(k)}(s)$ строится в соответствии с эпюрой секториальных площадей для открытых контуров; деформация сдвига при кручении тонкостенного стержня, определяемая его поворотом относительно выбранного полюса, а также относительно центра изгиба в рамках поправок по теории "чистого" кручения, учитывается; $\rho_1^{(k)}(s)$ — длина перпендикуляра, опущенного на касательную к контуру в рассматриваемой точке из точки контакта стрингера с обшивкой. Аналогично (2) вводят перемещения рёбер жесткости, расположенных по оси y . Кинематические соотношения (1) и (2) для панели, изготовленной из изотропного материала с усилением эксцентрично расположенных рёбер жёсткости композитными жгутами, не содержат индекса слоя k .

Уравнения равновесия и естественные граничные условия конструктивно-анизотропной панели построены с использованием вариационного принципа Лагранжа как результат минимизации полной потенциальной энергии \mathcal{E} :

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{E} &= 0, \\ \mathcal{E} &= \iint_S f[x, y; u_{0x}, u_{0y}, u_{0yy}; v_{0x}, v_{0y}, v_{0xx}; \\ &\quad w, w_{xx}, w_{xy}, w_{yy}, w_{x^2y}, w_{xy^2}; \\ &\quad (u_4)_1, (u_4)_{1x}, (u_4)_2, (u_4)_{2y}] dx dy. \end{aligned} \quad (3)$$

Рёбра жёсткости работают на растяжение-сжатие, изгиб из плоскости панели, изгиб в плоскости панели и кручение.

С математической точки зрения проблема исследования общего НДС конструктивно-анізотропных панелей, трактуемых как ортотропные, сводится к решению краевой задачи в прямоугольной области для неоднородного линейного дифференциального уравнения восемнадцатого порядка в частных производных относительно $\Phi(x, y)$ — искомой потенциальной функции (разрешающей функции). Если принимать во внимание нормальные напряжения, связанные с изгибом рёбер жёсткости в плоскости обшивки и деформацией поперечных сечений при закручивании, линейный дифференциальный оператор разрешающего уравнения содержит производные чётной степени по каждой из координат, наибольший порядок смешанных производных — восемнадцатый, максимальный порядок производных по x или y — двенадцатый. Имеем

$$\begin{aligned}
 L^{(18)}\Phi = q, \quad L^{(18)} = & \frac{K_{108}}{a^{10}b^8} \frac{\partial^{18}}{\partial x^{10}\partial y^8} + \frac{K_{810}}{a^8b^{10}} \frac{\partial^{18}}{\partial x^8\partial y^{10}} + \\
 & + \frac{K_{124}}{a^{12}b^4} \frac{\partial^{16}}{\partial x^{12}\partial y^4} + \frac{K_{106}}{a^{10}b^6} \frac{\partial^{16}}{\partial x^{10}\partial y^6} + \frac{K_{88}}{a^8b^8} \frac{\partial^{16}}{\partial x^8\partial y^8} + \\
 & + \frac{K_{610}}{a^6b^{10}} \frac{\partial^{16}}{\partial x^6\partial y^{10}} + \frac{K_{412}}{a^4b^{12}} \frac{\partial^{16}}{\partial x^4\partial y^{12}} + \frac{K_{122}}{a^{12}b^2} \frac{\partial^{14}}{\partial x^{12}\partial y^2} + \\
 & + \frac{K_{104}}{a^{10}b^4} \frac{\partial^{14}}{\partial x^{10}\partial y^4} + \frac{K_{86}}{a^8b^6} \frac{\partial^{14}}{\partial x^8\partial y^6} + \frac{K_{68}}{a^6b^8} \frac{\partial^{14}}{\partial x^6\partial y^8} + \\
 & + \frac{K_{410}}{a^4b^{10}} \frac{\partial^{14}}{\partial x^4\partial y^{10}} + \frac{K_{212}}{a^2b^{12}} \frac{\partial^{14}}{\partial x^2\partial y^{12}} + \frac{K_{120}}{a^{12}} \frac{\partial^{12}}{\partial x^{12}} + \\
 & + \frac{K_{102}}{a^{10}b^2} \frac{\partial^{12}}{\partial x^{10}\partial y^2} + \frac{K_{84}}{a^8b^4} \frac{\partial^{12}}{\partial x^8\partial y^4} + \frac{K_{66}}{a^6b^6} \frac{\partial^{12}}{\partial x^6\partial y^6} + \\
 & + \frac{K_{48}}{a^4b^8} \frac{\partial^{12}}{\partial x^4\partial y^8} + \frac{K_{210}}{a^2b^{10}} \frac{\partial^{12}}{\partial x^2\partial y^{10}} + \frac{K_{012}}{b^{12}} \frac{\partial^{12}}{\partial y^{12}} + \\
 & + \frac{K_{100}}{a^{10}} \frac{\partial^{10}}{\partial x^{10}} + \frac{K_{82}}{a^8b^2} \frac{\partial^{10}}{\partial x^8\partial y^2} + \frac{K_{64}}{a^6b^4} \frac{\partial^{10}}{\partial x^6\partial y^4} + \\
 & + \frac{K_{46}}{a^4b^6} \frac{\partial^{10}}{\partial x^4\partial y^6} + \frac{K_{28}}{a^2b^8} \frac{\partial^{10}}{\partial x^2\partial y^8} + \frac{K_{010}}{b^{10}} \frac{\partial^{10}}{\partial y^{10}} + \frac{K_{80}}{a^8} \frac{\partial^8}{\partial x^8} + \\
 & + \frac{K_{62}}{a^6b^2} \frac{\partial^8}{\partial x^6\partial y^2} + \frac{K_{44}}{a^4b^4} \frac{\partial^8}{\partial x^4\partial y^4} + \frac{K_{26}}{a^2b^6} \frac{\partial^8}{\partial x^2\partial y^6} + \frac{K_{08}}{b^8} \frac{\partial^8}{\partial y^8}.
 \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициенты $K_{12-i,i}$, $i = 0, 2, 4, 6, \dots, 12$ уравнения (4) зависят от упругих и геометрических параметров конструкции; $x = x/a$, $y = y/a$ — безразмерные координаты, отнесённые к полудлине a и к ширине панели b , соответственно.

Общее НДС, включая краевые эффекты и основное НДС, определяется решением краевых задач и анализируется в рамках разрешающего уравнения (4).

Краевая задача общего вида в прямоугольной области представлена условиями упругой заделки:

при $x = \text{const}$

$$\begin{aligned}
 \gamma_1 u_0 + \delta_1 N_x &= \gamma_2 v_0 + \delta_2 N_{xy} = \gamma_3 w + \delta_3 \bar{Q}_x = \\
 &= \gamma_4 w'_x + \delta_4 M_x = \gamma_5 w''_{xy} + \delta_5 C_x = \\
 &= \gamma_6 (u_4)_1 + \delta_6 B_{xy} = 0;
 \end{aligned} \quad (5)$$

при $y = \text{const}$

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 u_0 + \beta_1 N_{yx} &= \alpha_2 v_0 + \beta_2 N_y = \\
 &= \alpha_3 w + \beta_3 \bar{Q}_y = \alpha_4 w'_y + \beta_4 M_y = \\
 &= \alpha_5 w''_{xy} + \beta_5 C_y = \alpha_6 (u_4)_2 + \beta_6 B_{yx} = 0.
 \end{aligned}$$

В (5) коэффициенты $\gamma_i, \delta_i, \alpha_i, \beta_i$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) меняются от 0 до 1,

$N_x, N_y, N_{xy}, N_{yx}, M_x, M_y, \bar{Q}_x, \bar{Q}_y, C_x, C_y, B_{xy}, B_{yx}$ — внутренние силовые факторы.

Равенства (5) позволяют рассмотреть все возможные варианты закрепления граничных кромок в отношении связанных плоской задачи и задачи изгиба: защемление, скользящую заделку, шарнирное закрепление, свободный край. Граничные условия могут быть кинематическими, статическими и смешанными.

Решение краевых задач в прямоугольной области для уравнения (4) с линейным дифференциальным оператором, содержащим производные чётной степени по каждой из координат, построено в замкнутом виде в одинарных тригонометрических рядах для частного случая граничных условий по двум противоположным кромкам. Эти условия принято называть согласованными: в отношении изгиба они соответствуют шарниру, а в отношении плоской задачи — скользящей заделке в тангенциальном направлении в случае, если часть контура панели нагружена потоками касательных сил. Условия на торцах панели произвольны и могут быть условиями упругой заделки в симметричной либо в несимметричной краевых задачах.

Разрешающая функция $\Phi(x, y)$ — обобщённая функция перемещений, удовлетворяющая (4), (5), раскладывается в одинарный ряд по системе тригонометрических функций. При решении задачи общего вида в отношении краевых условий по поперечным кромкам в разложении следует сохранить и чётные, и нечётные функции. С точностью

до двенадцати произвольных постоянных обобщённую функцию перемещений запишем в виде

$$\Phi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{L=1}^6 A_{nL} \operatorname{sh}(\lambda_{nL} x) + \sum_{L=1}^6 B_{nL} \operatorname{ch}(\lambda_{nL} y) + \Phi_{n \text{ ч/н}} \right] \sin(n\pi y), \quad (6)$$

где $\Phi_{n \text{ ч/н}}$ — частный интеграл обыкновенного неоднородного линейного дифференциального уравнения двенадцатого порядка;

$\lambda_{nL} = \lambda_{ny} a z_L$; $\lambda_{ny} = \frac{n\pi}{b}$; z_L — корни соответствующего характеристического полинома двенадцатой степени, определяемые численно с использованием стандартных программ операционной среды MATLAB.

При решении симметричной краевой задачи в отношении краевых условий по поперечным кромкам в разложении (6) следует сохранить чётные функции. Если обобщённая функция перемещений $\Phi(x, y)$ (6) известна, с помощью формул связи определяют все компоненты НДС проектируемых конструктивных элементов.

Соотношения математической модели для основного напряжённо-деформированного состояния

Рассмотрим упрощённый вариант математической модели, соответствующий предположению о малости нормальных напряжений, обусловленных изгибом подкреплений в плоскости панели и деформацией их поперечных сечений. Краевые эффекты существенны, если рассматривать НДС панели типа "погранслои" в зоне граничных кромок. Используя в выражениях (2) асимптотические свойства и пренебрегая членами, соответствующими краевым эффектам, будем считать, что стержни работают на растяжение–сжатие, изгиб из плоскости обшивки и кручение. При этом задача сводится к исследованию медленно меняющегося основного НДС в рамках разрешающего уравнения восьмого порядка в частных производных.

С математической точки зрения проблема исследования основного НДС конструктивно-анизотропных панелей, трактуемых как ортотропные, сводится к решению краевой задачи в прямоугольной области для неоднородного линейного дифференциального уравнения восьмого порядка в частных производных относительно искомой потенциальной функции $\Phi(x, y)$ [10, 11]:

$$L^{(8)}\Phi = q. \quad (7)$$

Линейный дифференциальный оператор (7) содержит производные чётной степени по каждой из координат:

$$L^{(8)} = \frac{K_{80}}{a^8} \frac{\partial^8}{\partial x^8} + \frac{K_{62}}{a^6 b^2} \frac{\partial^8}{\partial x^6 \partial y^2} + \frac{K_{44}}{a^4 b^4} \frac{\partial^8}{\partial x^4 \partial y^4} + \frac{K_{26}}{a^2 b^6} \frac{\partial^8}{\partial x^2 \partial y^6} + \frac{K_{08}}{b^8} \frac{\partial^8}{\partial y^8}.$$

Коэффициенты $K_{8-i,i}$ ($i = 0, 2, 4, 6, 8$) в разрешающем уравнении (7) — постоянные величины, зависящие от упругих свойств материала и геометрических параметров конструкции; $x = x/a$, $y = y/b$ — безразмерные координаты, отнесённые к полудлине a и к ширине b панели соответственно.

Краевая задача общего вида в прямоугольной области представлена условиями упругой заделки:

при $x = \text{const}$

$$\gamma_1 u_0 + \delta_1 N_x = \gamma_2 v_0 + \delta_2 N_{xy} = \gamma_3 w + \delta_3 \bar{Q}_x = \gamma_4 w'_x + \delta_4 M_x = 0; \quad (8)$$

при $y = \text{const}$ $\alpha_1 u_0 + \beta_1 N_{yx} = \alpha_2 v_0 + \beta_2 N_y =$

$$= \alpha_3 w + \beta_3 \bar{Q}_y = \alpha_4 w'_y + \beta_4 M_y = 0,$$

где коэффициенты $\gamma_i, \delta_i, \alpha_i, \beta_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) меняются от 0 до 1.

Разрешающая функция — обобщённая функция перемещений, удовлетворяющая (7), (8), раскладывается в ряд по системе тригонометрических функций. Общее решение уравнения (7), удовлетворяющее граничным условиям по продольным кромкам, можно представить в одинарных тригонометрических рядах. Исследуя далее задачу общего вида в плане краевых условий по поперечным кромкам, оставим в решении чётные и нечётные функции. В этом случае с точностью до восьми произвольных постоянных обобщённая функция перемещений составит

$$\Phi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{L=1}^4 A_{nL} \operatorname{sh}(\lambda_{nL} x) + \sum_{L=1}^4 B_{nL} \operatorname{ch}(\lambda_{nL} y) + \Phi_{n \text{ ч/н}} \right] \sin(n\pi y), \quad (9)$$

где $\Phi_{n \text{ ч/н}}$ — частный интеграл обыкновенного неоднородного линейного дифференциального уравнения восьмого порядка; $\lambda_{nL} = \lambda_{ny} a z_L$; $\lambda_{ny} = \frac{n\pi}{b}$;

z_L — корни соответствующего характеристического полинома восьмой степени, которые находятся численно с использованием встроенных функций операционной среды MATLAB.

Оценка влияния краевых эффектов на прочностные характеристики конструктивно-анизотропных панелей. Результаты численного анализа

Для оценки влияния краевых эффектов на НДС конструктивно-анизотропных панелей сопоставим результаты численных решений двух краевых задач, сформулированных согласно уточнённой теории. В рамках краевой задачи (4), (5), т. е. общего НДС, подкрепляющие рёбра работают на растяжение-сжатие, изгиб из плоскости панели, изгиб в плоскости панели и кручение, а в рамках краевой задачи (7), (8) (основного НДС) — на растяжение-сжатие, изгиб из плоскости панели и кручение. Нормальными напряжениями, вызванными изгибом набора в плоскости обшивки и деформацией поперечных сечений, пренебрегаем.

Необходимо удовлетворять граничным условиям на торцах конструкции, например при $x=1$ в симметричной краевой задаче. В варианте жесткого защемления поперечных кромок для общего НДС равны нулю следующие величины: тангенциальное и продольное перемещения, прогиб, углы поворота, а также смещение вдоль оси x , обусловленное деформацией поперечного сечения стержня:

при $x = 1$

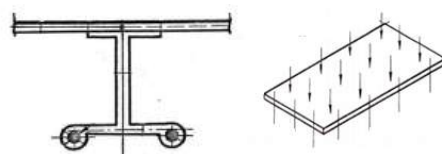
$$\begin{aligned} u_0(1, y) = v_0(1, y) = w(1, y) &= \frac{1}{a} \frac{\partial w}{\partial x}(1, y) = \\ &= \frac{1}{a} \frac{\partial v_0}{\partial x}(1, y) = (u_4)_1(1, y) = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

В случае жесткого защемления поперечных кромок для основного НДС равны нулю тангенциальное и продольное перемещения в плоскости обшивки, прогиб и угол поворота:

при $x = 1$

$$u_0(1, y) = v_0(1, y) = w(1, y) = \frac{1}{a} \frac{\partial w}{\partial x}(1, y) = 0. \quad (11)$$

Выполнен параметрический анализ перемещений и напряжений плоской прямоугольной панели, изготовленной из алюминиевого сплава и эксцентрично подкреплённой продольно-поперечным набором, полки которого усилены композитными жгутами (см. рисунок). Нормальная нагрузка $q(x, y) = \text{const}$. Варьировали жёсткость жгутов, геометрию обшивки, геометрию подкрепляющих рёбер.



Конструктивно-анизотропная панель, усиленная композитными жгутами

В качестве примера представлены результаты расчётов панелей с меняющимся соотношением сторон C . Все слагаемые в левой части общего разрешающего уравнения, содержащие производные потенциальной функции $\Phi(x, y)$ более высокого порядка, чем восьмой, соответствуют краевым эффектам при определении НДС, быстро затухающим от границ панели. Величины коэффициентов обыкновенного дифференциального уравнения ($N = 12$ при производных двенадцатого и десятого порядков 10^3 — 10^2 по сравнению с единицей) приведены в табл. 1.

Соответствующие пятый и шестой корни характеристических полиномов раскрывают быструю изменчивость напряжённого состояния (табл. 2). Согласно асимптотическим аспектам решения производные высоких порядков не оказывают существенного влияния на медленно меняющееся основное напряжённое состояние панели.

В табл. 3 значения прогибов и нормальных напряжений приведены в зависимости от соотношения сторон панели C .

Таблица 1

Коэффициенты обыкновенных дифференциальных уравнений порядка N

C	N	$\bar{K}_{12} \cdot 10^{-4}$	$\bar{K}_{10} \cdot 10^{-3}$	\bar{K}_8	$\bar{K}_6 \cdot 10^3$	$\bar{K}_4 \cdot 10^6$	$\bar{K}_2 \cdot 10^{11}$	$\bar{K}_0 \cdot 10^{15}$
0,5	8	—	—	1	-0,786	0,168	-0,826	0,110
1,0	12	0,665	-0,176	1	-0,750	0,159	-0,778	0,105
1,5								

Примечание. $\bar{K}_{12} \cdot 10^{-4}$ означает $K_{12} = 0,665 \cdot 10^4$.

Таблица 2

Корни характеристических полиномов порядка N при различных соотношениях сторон панели

C	N	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	λ_{15}	λ_{16}
0,5	8	0,357	0,473	1,229	1,601	—	—
	12	0,361	0,470	1,208	1,708	6,212	10,256
1,0	8	0,714	0,945	2,459	3,201	—	—
	12	0,722	0,939	2,416	3,416	12,423	20,512
1,5	8	1,070	1,418	3,688	4,802	—	—
	12	1,083	1,409	3,624	5,124	18,635	30,769

Таблица 3

Прогобы и нормальные напряжения при различных соотношениях сторон панели

x	0	1,0	1,0	1,0	0	$\Delta, \%$					
y	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5						
$z, \text{мм}$	—	—	—	—	-0,5						
C	N	$w/q, \text{мм}^3/\text{кг}$	$N_x/q, \text{мм}$	$M_x/q, \text{мм}^2$	σ_x/q	σ_y/q	Δw	ΔN_x	ΔM_x	$\Delta \sigma_x$	$\Delta \sigma_y$
0,5	8	0,597	1,345	-1896,6	72,130	-6,011	—	9,79	0,04	0,20	0,81
	12	0,597	1,491	-1897,4	72,272	-6,060					
1,0	8	7,278	-20,429	-6624,5	232,57	-50,657	0,54	7,86	0,21	0,30	1,47
	12	7,239	-18,824	-6610,3	233,27	-49,914					
1,5	8	20,793	-78,816	-10571	335,50	-156,14	0,36	2,60	0,11	0,34	0,58
	12	20,719	-76,761	-10559	336,63	-155,23					

Представляется возможным пренебречь краевыми эффектами, так как компоненты НДС различаются менее чем на 3 %. Аналогичные результаты получены в широком диапазоне варьирования жесткостных характеристик конструктивно-анизотропных панелей. метрического анализа. Результаты расчётов дают возможность оптимизации массовых характеристик конструкции. Постановка проблемы и предлагаемый подход к её решению представляют интерес с точки зрения практики проектирования конструктивно-анизотропных панелей с применением КМ для перспективных изделий авиационной техники.

Заключение

В соответствии с изложенными алгоритмами разработан пакет прикладных программ для персонального компьютера (PC) на языке операционной среды MATLAB. Программы предназначены для определения и сопоставления компонентов общего НДС с краевыми эффектами и медленно меняющегося основного НДС конструктивно-анизотропных панелей ЛА в целях компьютерной оптимизации процесса проектирования. На основе сопоставления результатов численного анализа в широком диапазоне изменения геометрических и жесткостных характеристик конструктивно-анизотропных панелей обоснована возможность проектирования без учёта краевых эффектов в соответствии с теорией асимптотического интегрирования дифференциальных уравнений. Показано, что защемлённые торцевые кромки существенно снижают влияние краевых

эффектов на основное напряжённое состояние. Обоснована допустимость упрощения математических моделей путём их сведения к решению краевых задач для разрешающего уравнения с линейным дифференциальным оператором восьмого порядка. Установлено, что краевые эффекты существенны, если рассматривать НДС панели типа "погранслой" в зоне граничных кромок.

Так как решение строится точными аналитическими методами, время расчёта вариантов минимально, что представляет интерес с точки зрения практики проектирования с использованием параметрического анализа. Результаты расчётов дают возможность оптимизации массовых характеристик конструкции. Постановка проблемы и предлагаемый подход к её решению представляют интерес с точки зрения практики проектирования конструктивно-анизотропных панелей с применением КМ для перспективных изделий авиационной техники.

Работа выполнена в рамках ГЗ Министерства науки и высшего образования РФ, тема № FSFF-2020-0013.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фирсанов В. В. Об уточнении классической теории прямоугольных пластинок из композиционных материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2002. № 8 (1). С. 28—64.
2. Groh R. M. J., Weaver P. M. Deleterious localized stress fields: The effects of boundaries and stiffness tailoring in anisotropic laminated plates // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. № 472(2194). P. 20160391.

3. Mittelstedt C., Becker W. Free-edge effects in composite laminates // J. Applied Mechanics Reviews. 2007. V. 60. P. 217.
4. Andrianov I. V., Danishevskii V. V., Weichert D. Boundary layers in fibrous composite materials // J. Acta Mechanica. 2011. V. 216. P. 3—15.
5. Dudarkov Yu. I., Limonin M. V., Levchenko E. A. Free edge effect in layered composites // J. Aviation Industry. 2012. № 4. P. 48—53.
6. Gorynina G., Nemirovskii Yu. Deformation of laminated anisotropic bars in the three-dimensional statement 2. Effect of boundary layers on the stress-strain properties of the composites // J. Mechanics of Composite Materials. 2010. V. 46. № 1. P. 1—14.
7. Butenko Y. I., Kayumov R. A., Shakirzyanov F. R., Tazyukov B. F., Mukhamedova I. Z. Edge effect in a two-layer orthotropic strip // Lobachevskii J. Mathematics. 2019. V. 40. № 3. P. 292—303.
8. Butenko Y. I. Specific characteristics of numerical determination of the boundary effect stress-strain state for an orthotropic strip // J. Mechanics of Solids. 2016. V. 51. № 4. P. 472—783.
9. Butenko Y. I. Study of the boundary layer in a laminated plate // J. Mechanics of Solids. 2007. V. 42. P. 603—618.
10. Firsanov V. V., Gavva L. M. Mathematical Models and Methods for Calculating the Stress-Strain State of Aircraft Panels from Composite Materials Taking into Account the Production Technology // J. Mechanics of Solids. 2020. № 3. P. 603—612.
11. Gavva L. M., Endogur A. I. Statics and buckling problems of aircraft structurally-anisotropic composite panels with the influence of production technology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. № 312(1). P. 012009.

Analysis of edge effects and main stress-strain state of structurally-anisotropic aircraft panels comprising composite materials in refined theory

V. V. FIRSANOV, L. M. GAVVA

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

The mathematical model relations for the investigation of the edge effect influence on the slowly changing main stress-strain state (SSS) of structurally-anisotropic panels are proposed. The panels are made from composite (PCM) and isotropic materials stiffened with composite bundles. The equilibrium eighteenth and eighth order equations are designed with the different degree of the mathematical model refinement for a stiffening rib being torsioned under one-sided contact with the skin. The influence of the structure parameters on the level of displacements and stresses has analyzed. The possibility of the mathematical model simplification in order to apply the results for the design practice of structurally-anisotropic panels comprising composite materials for advanced aircraft products is validated.

Keywords: panels made of composite materials, panels made of isotropic materials stiffened with composite bundles, eccentric longitudinal and lateral set, edge effects, main stress-strain state.

Экспериментальные исследования устойчивости конструктивно-анизотропных панелей с применением композиционных материалов для верификации уточненных математических моделей

Л. М. ГАВВА, канд. техн. наук

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований устойчивости при сжатии в продольном направлении конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов и конструктивно-анизотропных панелей из изотропных материалов, усиленных композитными жгутами. Выполнена верификация предложенных математических моделей. Разрешающее уравнение восьмого порядка построено с учетом уточнения модели при закручивании подкрепляющего элемента, находящегося в условиях одностороннего контакта с обшивкой. Продемонстрировано совпадение расчётных данных с результатами натурных экспериментов по формам потери устойчивости и по уровню критических усилий с точностью до 8–23 %.

Ключевые слова: конструктивно-анизотропные панели, композиционные материалы, эксцентричный продольно-поперечный набор, изотропные материалы с композитными жгутами, устойчивость, сжатие, эксперимент.

Эффективность применения композиционных материалов (КМ) в несущих конструкциях летательных аппаратов (ЛА) определяется степенью совершенства согласованных концепций расчёта, методов расчёта и технологии производства изделия. Решение новой задачи проектирования — проектирование под заданную стоимость — возможно при объединении моделей высокой точности с современными компьютерными технологиями и снижении объёма экспериментальных исследований. Возможность снижения объёма экспериментальных исследований при проектировании обеспечивается подтверждением достоверности уточнённых математических моделей в рамках тестовых натурных экспериментов.

При решении задачи устойчивости в уточнённой постановке принималось во внимание докритическое напряжённое состояние при сжатии плоских прямоугольных многослойных панелей из волокнистых КМ с эксцентричным продольно-поперечным набором. В операционной среде MATLAB разработан пакет прикладных программ и реализован процесс компьютерного многопараметрического исследования устойчивости конструктивно-анизотропных композитных панелей в условиях механического и температурного воздействия. Панели находились под действием постоянных погонных сжимающих усилий, прило-

женных к торцевым кромкам в плоскости обшивки. Граничные условия на контуре соответствовали условиям частного вида, согласованных в отношении плоской задачи и задачи изгиба и позволяющих построить решение в тригонометрических рядах.

Экспериментальные исследования устойчивости плоских прямоугольных конструктивно-анизотропных композитных панелей являются актуальными с точки зрения практики проектирования несущих поверхностей ЛА. Они включают следующие процедуры:

- экспериментальное изучение критических параметров изгибного выпучивания под действием продольного сжатия свободно опёртых прямоугольных слоистых композитных пластин, композитных панелей, подкреплённых рёбрами в направлении сжатия [1–7]. Получены результаты экспериментального исследования при двухосном сжатии [8];

- экспериментальное изучение устойчивости композитных панелей, испытывающих сдвиг в своей плоскости [9], а также потери устойчивости при комбинации продольного сжатия и термического нагружения подкреплённых стрингерами панелей из волокнистого углепластика и панелей без оребрения [10]. Проведена экспериментальная верификация конечно-элементной модели;

- расчётно-экспериментальный анализ потери устойчивости стрингерных панелей из полимерных КМ при различных видах нагружения с оценкой влияния граничных условий, реализуемых в эксперименте, на величину критического усилия. Анализ потери устойчивости выполнен в [11, 12].

Гавва Любовь Михайловна, научный сотрудник, доцент.
E-mail: rva101@mail.ru, nio1asp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21 октября 2020 г.

© Гавва Л. М., 2021

Согласно традиционной схеме проектирования для практических расчетов наиболее актуальны следующие проблемы:

- определение критических сил общей изгибной формы потери устойчивости, когда число полуволн значительно меньше числа стрингеров;
- определение критических сил многоволнового крутильного выпучивания, связанного с изгибом обшивки между узлами пересечений с ребрами и поворотом ребер без искажения формы профиля.

Для исследования изгибной формы потери устойчивости панели правомочна математическая модель, построенная на основе принципов конструктивной анизотропии с "размазыванием" жесткостей подкрепляющих элементов. При исследовании крутильной формы потери устойчивости жесткостные характеристики стержней следует вводить дискретно с помощью аппарата обобщенных функций.

В рамках предлагаемой расчетной модели [13] при определении напряженно-деформированного состояния (НДС) и решении задач устойчивости конструктивно-анизотропных композитных панелей рассмотрены тонкостенные подкрепляющие элементы, находящиеся в условиях сложного сопротивления (косого изгиба и стесненного кручения) вследствие одностороннего контакта с обшивкой. Дальнейшее развитие теории упругих тонкостенных стержней применительно к общей контактной задаче для обшивки и ребра с уточнением модели последнего при закручивании составляет научную новизну теоретического исследования.

Цель данной работы — экспериментальная верификация математических моделей устойчивости и разработанных подходов к решению задач с учетом неравномерности докритического напряженного состояния и технологии изготовления панелей в рамках разрешающего дифференциального уравнения восьмого порядка. Постановка задач устойчивости и предлагаемые подходы к решению являются новыми разработками и представляют интерес с точки зрения практики проектирования композитных панелей для перспективных изделий авиационной техники. Теоретические результаты могут быть использованы в качестве ограничений по устойчивости в различных алгоритмах оптимизации [14].

Математические модели.

Устойчивость конструктивно-анизотропных композитных панелей

Задачи устойчивости, так же как и задача о докритическом напряженном состоянии, являются связанными, т. е. не разделяются на плоскую задачу и изгиб пластины.

Решение задач устойчивости [15, 16] осуществляют с использованием общего дифференциального уравнения устойчивости восьмого порядка относительно потенциальной функции $\Phi(x, y)$, построенного на основе дифференциального уравнения равновесия с учетом приведенной нагрузки от действия нормальных и тангенциальных усилий. Прогиб $w(x, y)$ связан с потенциальной функцией $\Phi(x, y)$ посредством линейного дифференциального оператора четвертого порядка. Коэффициенты в формулах связи и в разрешающем уравнении — постоянные величины, зависящие от упругих свойств материала и геометрических параметров конструкции. Если структура композитной панели ортотропна, задача устойчивости сводится к исследованию дифференциального уравнения, в левой части которого содержатся четные производные $\Phi(x, y)$ по каждой из координат. Нечетные производные в правой части связаны со сдвигом. Все компоненты напряженного состояния и внутренние силовые факторы (усилия в плоскости обшивки) могут быть выражены через потенциальную функцию $\Phi(x, y)$.

Задача устойчивости конструктивно-анизотропной композитной панели является нелинейной, для определения критических сил применяют метод линеаризации. В целях исследования характера распределения нормальных и сдвигающих усилий, вызванных внешней нагрузкой, рассматривают НДС конструкции при продольном изгибе, т. е. докритическое основное напряженное состояние, которое согласно предложенной расчетной схеме является связанным, так как не разделяется на плоскую задачу и изгиб пластины. Задача устойчивости, из решения которой может быть найдено дополнительное по отношению к исходному деформированию искривление поверхности приведения, формулируется как задача о собственных значениях.

Построена формула для критических усилий:

$$P = P^* \left\{ \frac{\pi}{\sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(-\frac{2}{i} - \frac{1}{2n-i} + \frac{1}{2n+i} \right) \left(\left\{ \sum_{L=1}^4 (N_x)_{iL} \frac{[(m\pi)^2 - \lambda_{iL}^2] \operatorname{sh} \lambda_{iL}}{[(m\pi)^2 + \lambda_{iL}^2] \lambda_{iL}} \right\} - \frac{(N_x^T)_i}{P} - \frac{(N_x^H)_i}{P} \right)} \right\}. \quad (1)$$

Звездочкой обозначено критическое усилие, рассчитываемое без учёта неравномерности основного докритического напряжённого состояния [15]:

$$P^* = \frac{\pi^2}{b^2} \frac{\left[K_{80} \left(\frac{m}{c} \right)^8 + K_{62} \left(\frac{m}{c} \right)^6 n^2 + K_{44} \left(\frac{m}{c} \right)^4 n^4 + K_{26} \left(\frac{m}{c} \right)^2 n^6 + K_{08} n^8 \right]}{\left[R_{40} \left(\frac{m}{c} \right)^4 + R_{22} \left(\frac{m}{c} \right)^2 n^2 + R_{04} n^4 \right] \left(\frac{m}{c} \right)^2}$$

для общей изгибной формы потери устойчивости и для крутильной формы потери устойчивости, когда коэффициенты \hat{K}_{ij} ($i, j=0, 2, 4, 6, 8$) и \hat{R}_{ij} ($i, j=0, 2, 4$) определяются через обобщённые жесткостные характеристики. Осреднение жесткостей элементов продольного набора по обшивке заменяется дискретным вводом:

$$\frac{1}{c_1} \rightarrow \begin{cases} \frac{2}{b} \sum_{i=1}^N \sin^2(n\pi y_i) \\ \frac{2}{b} \sum_{i=1}^N \cos^2(n\pi y_i) \end{cases} \rightarrow \hat{K}_{ij}, \hat{R}_{ij}$$

где c_1 — расстояние между стрингерами;
 y_i — координаты расположения стрингеров.

В выражении (1) отношение сторон панели $c = 2a/b$; a, b — полудлина и ширина панели соответственно; m, n — числа полуволн потери устойчивости по длине и ширине панели соответственно; $(N_x)_{iL}$ — коэффициенты разложения в одинарные тригонометрические ряды нормальных усилий N_x ; $(N_x^T)_i, (N_x^H)_i$ — коэффициенты разложения в одинарные тригонометрические ряды температурных усилий N_x^T и усилий предварительного натяжения армирующих волокон N_x^H ; $\lambda_{iL} = z_L \lambda_{iy} a, \lambda_{iy} = \frac{i\pi}{b}$, z_L — корни соответствующего характеристического полинома, которые находят численно с использованием встроенных функций операционной среды MATLAB; коэффициенты в формулах связи — R_{ij} ($i=4, 3, \dots, 0, j=0, 1, \dots, 4$); коэффициенты в разрешающем уравнении — K_{ij} ($i=8, 7, \dots, 0, j=0, 1, \dots, 8$).

Таким образом, представляется возможным оценить влияние технологии изготовления на несущую способность конструктивно-анизотропной композитной панели: остаточных температурных напряжений, имеющих место при охлажде-

нии после завершения процесса отверждения, и предварительного натяжения армирующих волокон. Решение строится в рамках одночленной аппроксимации тригонометрическими функциями. Принимается во внимание докритическое напряжённое состояние конструкции. Определение критических усилий осуществляется методом последовательных приближений. В качестве исходного приближения принимается критическая нагрузка P^* , найденная без учёта переменности докритического напряжённого состояния.

В соответствии с изложенным алгоритмом разработан пакет прикладных программ для персонального компьютера (PC) на языке операционной среды MATLAB. Программы предназначены для определения критических сил с учётом докритического напряжённого состояния и компьютерной оптимизации процесса проектирования конструктивно-анизотропных композитных панелей.

Верификация математических моделей. Экспериментальные исследования устойчивости панелей

Экспериментальные исследования устойчивости конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов. Для оценки правомочности полученной теоретической зависимости проведены серии испытаний экспериментальных моделей подкреплённых композитных панелей на равномерное сжатие в продольном направлении до потери устойчивости (рис. 1).

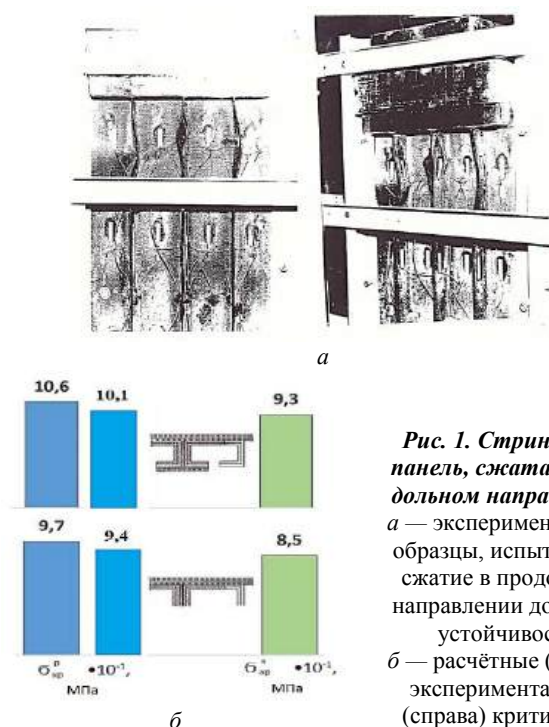


Рис. 1. Стрингерная панель, сжатая в продольном направлении: а — экспериментальные образцы, испытания на сжатие в продольном направлении до потери устойчивости; б — расчётные (слева) и экспериментальные (справа) критические напряжения

Результаты натурных экспериментов и расчётные данные совпадают качественно по формам потери устойчивости и количественно с точностью до 12—13 %, если не рассматривать переменное докритическое напряжённое состояние. Учёт неравномерности основного напряжённого состояния приводит к увеличению точности до 8—10 % [16].

Экспериментальные исследования устойчивости конструктивно-анизотропных панелей из изотропных материалов, усиленных композитными жгутами. Проведены серии испытаний экспериментальных моделей подкреплённых панелей из изотропного материала на равномерное сжатие в продольном направлении до потери устойчивости. Полки стрингеров усилены жгутами из углепластика. Образцы изготовлены из дюралюминиевого сплава. Панели эксцентрично подкреплены на заклёпках составными стержнями, состоящими из швеллеров и элементов жёсткости, вырезанных из уголка и армированных жгутами из углеволокна, пропитанными эпоксидным связующим. Металлические оболочки элементов жёсткости совместно со жгутами из КМ обжаты до отверждения для обеспечения совместной работы металла и композита.

В процессе испытаний на равномерное сжатие в продольном направлении панель закрепляли в приспособлении, обеспечивающем шарнирное опирание граничных кромок (рис. 2).

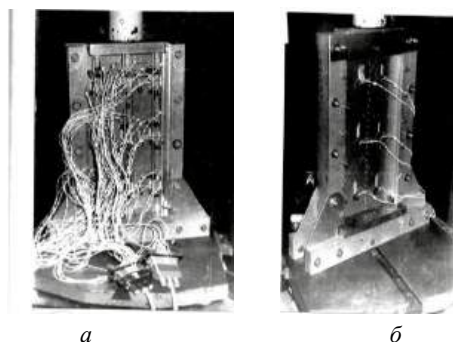


Рис. 2. Приспособление для испытаний панелей на равномерное сжатие в продольном направлении

Форма потери устойчивости экспериментальных панелей — крутильная, заключающаяся в выпучивании обшивки по направлению нормали к поверхности между узлами пересечений обшивки и стрингеров с последующим поворотом элементов набора (рис. 3).



Рис. 3. Экспериментальные образцы панелей из дюралюминиевого сплава, усиленного углепластиковыми жгутами, после потери устойчивости

С помощью программы, разработанной в операционной среде MATLAB, найдены погонные усилия, соответствующие многоволновой форме бифуркации прямоугольных панелей с односторонними дискретно расположенными рёбрами жёсткости. Профиль экспериментальной панели и поперечное сечение панели для расчётной модели приведены на рис. 4.

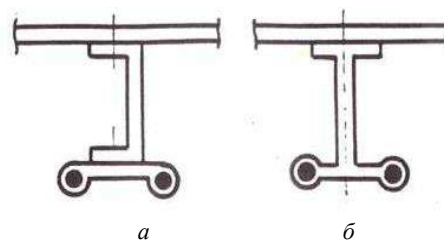


Рис. 4. Профиль экспериментальной панели (а) и поперечное сечение расчётной панели (б)

В таблице приведены погонные критические усилия потери устойчивости расчётной и экспериментальной панелей при равномерном сжатии в продольном направлении.

Погонные критические усилия потери устойчивости расчётной и экспериментальной панелей при равномерном сжатии в продольном направлении

Число стрингеров	$R_{кр. эк.}$, кг/мм	$R_{кр. рас.}$, кг/мм	Δ , %
3	50,0	40,5	19
4	70,8	84,9	20

Результаты натурных экспериментов и расчётные данные совпадают качественно по формам потери устойчивости и количественно с точностью до 19—20 %, если не рассматривать переменное докритическое напряжённое состояние. Поперечное сечение стрингера экспериментальных панелей несимметрично. При численной реализации асимметрию не принимали во внимание. Проведённые испытания подтвердили теоретические предположения о наличии у коротких образцов крутильной формы бифуркации, выявить которую не представляется возможным по балочной теории.

Экспериментальные исследования устойчивости конструктивно-анизотропных панелей кессона из изотропных материалов, усиленных композитными жгутами. Испытания экспериментальных панелей кессона на изгиб проведены в целях определения форм потери устойчивости и соответствующих критических усилий подкреплённых панелей из изотропного материала. Полки стрингеров усилены жгутами из углепластика. Сжимающие нагрузки равномерно распределены по торцам.

Образцы изготовлены из дюралюминиевого сплава. Модель кессона (рис. 5) состоит из двух панелей и каркаса: двух силовых лонжеронов типа швеллер и трёх поперечных нервюр. На внешней поверхности верхней сжатой обшивки внецентренно расположен продольный стрингерный набор, армированный жгутами из углеволокон на эпоксидном связующем с обжатием металла и жгутов до отверждения композита. Профиль экспериментальной панели и поперечное сечение панели для расчётной модели изображены на рис. 4. На рис. 5 показана работающая на растяжение нижняя панель, выполненная из гладкого листа.

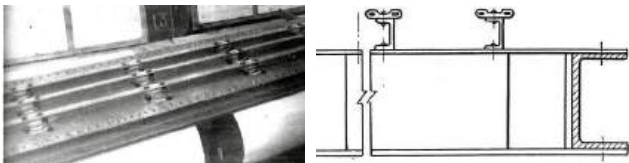


Рис. 5. Экспериментальная модель кессона из дюралюминиевого сплава, усиленного углепластиковыми жгутами

Установка для испытаний кессона на изгиб до потери устойчивости верхней сжатой панели приведена на рис. 6.

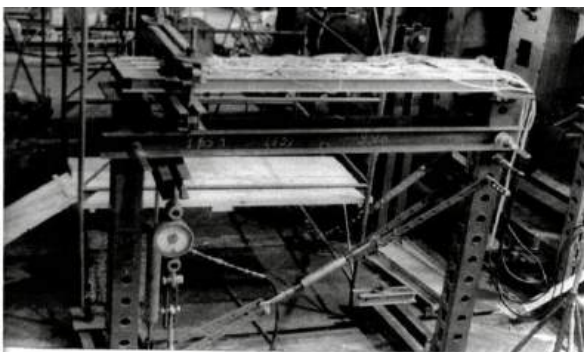


Рис. 6. Установка для испытаний кессона на изгиб

Форма потери устойчивости экспериментальных панелей — изгибная.

С помощью программы, разработанной в операционной среде MATLAB, найдены погонные усилия, соответствующие изгибной форме бифуркации прямоугольных панелей с односторонними рёбрами жёсткости конструктивно-анизотропной модели. Результаты натурного эксперимента и расчётные данные совпадают качественно по форме потери устойчивости и количественно с точностью до 22,8 %, если не рассматривать переменное докритическое напряжённое состояние. Поперечное сечение стрингера экспериментальной панели асимметрично. При численной реализации асимметрию не принимали во внимание. Для панелей большой длины характерна общая изгибная

форма потери устойчивости. Балочная теория расчёта неприемлема для длинных образцов с односторонним жесткостным набором, так как значения критических усилий значительно (до 60 %) занижены, что приводит к неоправданному увеличению массы проектируемых конструкций.

Заключение

Выполнена экспериментальная верификация математических моделей устойчивости и разработанных подходов к решению задач с учётом неравномерности докритического напряжённого состояния и технологии изготовления панелей в рамках разрешающего дифференциального уравнения восьмого порядка, построенного с уточнением расчётной схемы подкрепляющего ребра при закручивании.

Для оценки правомочности полученной теоретической зависимости проведены серии испытаний экспериментальных моделей эксцентрично подкреплённых композитных панелей и конструктивно-анизотропных панелей из изотропных материалов, усиленных композитными жгутами, на равномерное сжатие до потери устойчивости. Результаты экспериментов и расчётные данные совпадают качественно по формам бифуркации и количественно с точностью до 8—23 %. Приблизжённый расчёт панели как балки даёт значительно заниженные результаты по критическим усилиям изгибной формы потери устойчивости в отношении длинных панелей. Выявить крутильную форму потери устойчивости, характерную для коротких образцов, по балочной теории не представляется возможным.

Так как решение строится точными аналитическими методами, время расчёта варианта минимально, что представляет интерес с точки зрения практики проектирования конструкций с использованием параметрического анализа. Результаты расчётов дают возможность снизить и оптимизировать массовые характеристики конструкции.

Работа выполнена в рамках ГЗ

Министерства науки и высшего образования РФ, тема № FSFF-2020-0013.

ЛИТЕРАТУРА

1. Falzon B. G., Stevens K., Davies G. O. Postbuckling behaviour of a blade-stiffened composite panel loaded in uniaxial compression // Compos. A. 2000. V. 31. № 5. P. 459—468.
2. Park Oung, Haftka Raphael T., Sankar Bhavani V., Starnes James H., Nagendra Somanath. Analytical-experimental correlation for a stiffened composite panel loader in axial compression // J. Aircraft. 2001. V. 38. № 2. P. 379—387.

3. **Rouse Marshall, Assadi Mahyar.** Evaluational of scaling approach for stiffened composite flat panels loaded in compression // J. Aircraft. 2001. V. 38. № 5. P. 950—955.
4. **Bai R., Bao S., Li Z., Liu D., Yan C.** Experimental study on compressive behavior of I-stiffened CFRP panel using fringe projection profilometry // Ocean Engineering 160. 2018. P. 382—388.
5. **Zhao W., Xie Z., Wang X., Li X., Hao J.** Buckling behavior of stiffened composite panels with variable thickness skin under compression // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2019. V. 26. № 3. P. 215—223.
6. **Замула Г. Н., Фомин В. П., Джанхотов С. О.** Расчетно-экспериментальное исследование закритической прочности подкрепленных композитных панелей // Труды ЦАГИ. Прочность, колебания и ресурс авиационных конструкций и сооружений. 2009. Вып. 2683. С. 26—37.
7. **Джанхотов С. О.** Экспериментальное исследование деформирования и несущей способности при сжатии тонкостенных панелей из композиционных материалов // Труды ЦАГИ. Прочность, колебания и ресурс авиационных конструкций и сооружений. 2009. Вып. 2683. С. 115—120.
8. **Ungbyfkorn Variddhi, Singhatanagdid Pariod.** Similitude invariants and scaling laws for buckling experiments on anti-symmetrically laminated plates subjected to biaxial loading // Compos. Struct. 2003. V. 59. № 4. P. 455—465.
9. **Baker Donald J.** Evaluation of thin Kevlar-epoxy fabric panels subjected to shear loading // J. Aircraft 1. 2000. V. 37. P. 138—143.
10. **Киреев В. А., Осипян Е. Э.** Предельные нагрузки цилиндрических и плоских композитных панелей при продольном сжатии // Труды ЦАГИ. Прочность, колебания и ресурс авиационных конструкций и сооружений. 2009. Вып. 2683. С. 102—108.
11. **Дударьков Ю. И., Левченко Е. А., Лимонин М. В.** Некоторые особенности оценки несущей способности стрингерных панелей из ПКМ // Механика композиционных материалов и конструкций. 2019. Т. 25. № 2. С. 192—206.
12. **Дударьков Ю. И., Левченко Е. А., Лимонин М. В., Шевченко А. В.** Расчетно-экспериментальный анализ несущей способности стрингерных панелей из ПКМ // Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций: труды Третьей междунар. конф., посвященной 80-летию ИМАШ РАН. 2018. С. 40—42.
13. **Фирсанов В. В., Гавва Л. М.** Математические модели и методы расчета напряженно-деформированного состояния панелей летательного аппарата из композиционных материалов с учетом технологии изготовления // Изв. РАН. МТТ. 2020. № 3. С. 122—133.
14. **Митрофанов О. В., Кайков К. В.** Прикладные задачи проектирования композитных подкрепленных панелей при ограничениях по устойчивости и несущей способности. — М.: Спутник +, 2017. — 64 с.
15. **Фирсанов В. В., Гавва Л. М.** Исследование в операционной среде MATLAB изгибной формы потери устойчивости конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 4. С. 66—76.
16. **Фирсанов В. В., Гавва Л. М.** Исследование устойчивости конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов с учётом докритического напряжённого состояния // Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 4. С. 17—24.

Experimental investigation of buckling problem of structurally-anisotropic panels comprising composite materials for refined mathematical model verification

L. M. GAVVA

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

The experimental investigation results for the buckling problems of uniformly compressed in the longitudinal direction structurally-anisotropic composite panels and structurally-anisotropic panels made from isotropic materials and stiffened with composite bundles are presented. The proposed mathematical model verification is performed. The resolved eighth order equation is designed with the refined mathematical model of a stiffening rib being torsioned under one-sided contact with the skin. The numerical results and testing data are the same in the buckling modes and are in agreement quantitatively with respect to the critical forces within 8—23 %.

Keywords: structurally-anisotropic panels, composite materials, eccentric longitudinal and lateral set, isotropic materials with composite bundles, buckling, compression, experiment.

Технологическая система для релаксации остаточных напряжений в композитных конструкциях бинарной вибротермической обработкой

И. И. ДЕМЕНТЬЕВ, канд. техн. наук

АО «Конструкторское бюро "Арсенал" имени М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург, Россия

Представлена технологическая система, обеспечивающая релаксацию технологических остаточных напряжений в конструкциях из волокнистых композиционных материалов (КМ) способом бинарной вибротермической обработки. Система состоит из вибрационной и климатической систем, основными составными частями которых являются электродинамическая вибрационная и климатическая установки входного типа (Walk-In Type). Система может быть применена в технологических процессах (ТП) для изготовления композитных изделий, к которым предъявляют высокие требования по качеству и надежности.

Ключевые слова: технологическая система, бинарная вибротермическая обработка, релаксация технологических остаточных напряжений, конструкции из волокнистых композиционных материалов.

Одной из основных проблем, возникающих при изготовлении изделий из волокнистых КМ, является образование в структуре материалов трещин, полостей, микронеровностей и других дефектов, обусловленных технологическими термическими и механическими воздействиями. Дефекты приводят к появлению напряжений, сохраняющихся после завершения технологического цикла изготовления изделий из композитов. Остаточные напряжения снижают эксплуатационные характеристики конструкций и, как известно [1–3], могут составлять 50–60 % от разрушающих напряжений, а коэффициенты концентраций напряжений могут достигать 10^2 – 10^3 .

Для релаксации остаточных напряжений в изделиях из металла используют различные способы термической или механической обработки конструкций [4–8].

Известен способ снятия остаточных напряжений в металлических конструкциях [9] путем термомеханической обработки. Он заключается в генерировании при помощи теплогенератора вынужденных упругих колебаний конструкции в звуковом диапазоне частот одновременно с ее равномерным нагревом путем перемещения через внутреннюю полость продуктов сгорания топлива из теплогенератора. Термомеханическую обработку выполняют на собственной частоте конструкции. Область применения способа ограничена

необходимостью наличия в обрабатываемой металлической конструкции внутренней полости, сообщающейся через два отверстия с окружающей средой.

Недостатком способов термической или механической обработки в случае применения их для снятия остаточных напряжений в композитных конструкциях является невысокая эффективность в части отношения полезного эффекта, выраженного обобщенными количественными показателями снижения остаточных напряжений в композитах, к обобщенным количественным показателям затрат, необходимых для их реализации. Данный недостаток обоснован особенностями строения и структуры волокнистых КМ [9, 10], что отличает их от металлических сплавов, дисперсно-упрочненных композитов и других конструкционных материалов.

Для релаксации остаточных напряжений в конструкциях из волокнистых КМ разработана технологическая система. Система, выполненная в комплексе с программными средствами, созданными с использованием новой математической модели [2] напряженно-деформированных состояний (НДС) композитных конструкций, позволяет снизить остаточные напряжения, повысить качество и надежность конструкций из волокнистых КМ.

В данной работе представлены принципиальная схема и описание состава технологической системы, показаны составные части технологической системы, обеспечивающей релаксацию остаточных напряжений в КМ, и принципиальный ТП релаксации остаточных напряжений в композитных конструкциях способом бинарной вибротермической обработки.

Дементьев Илья Игоревич, инженер первой категории.
E-mail: iidementev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2020 г.

© Дементьев И. И., 2021

Принципиальная схема и описание состава технологической системы

В отраслях промышленности наблюдается тенденция к замене металлических сплавов, применяемых в производстве составных частей конструкций и конструкций в целом для изделий разного функционального назначения, на волокнистые КМ. Особенности композитов, матрицы которых армированы высокопрочными волокнами, проволоками или нитевидными кристаллами, являются [10, 11] анизотропия физико-механических и вязкоупругих свойств материалов, искажения геометрических конфигураций элементарных объемов композитов при их деформировании одновременно с отклонениями этих элементарных объемов от нормалей к срединным поверхностям конструкций. Технологическими процессами изготовления волокнистых композитов предусмотрены термические и механические воздействия на полуфабрикаты, создаваемые при помощи технологического оборудования для выполнения цикла формования конструкций. Возникающие в структурах КМ дефекты, например трещины, надрезы, полости, микронеровности, являются причинами концентрации напряжений в композитах, определяющих их НДС после завершения ТП изготовления конструкций. Остаточные напряжения снижают эксплуатационные характеристики, показатели качества и надежности волокнистых композитов.

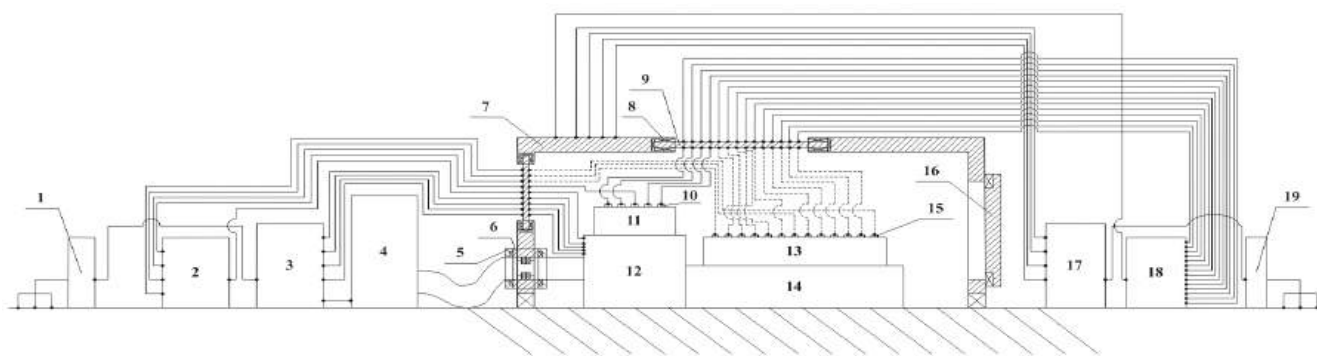
Не вызывает сомнений актуальность задачи релаксации остаточных напряжений в конструкциях из волокнистых КМ. Разработанная технологическая система обеспечивает снижение остаточных напряжений методом бинарной вибротермической обработки конструкций.

Принципиальная схема технологической системы представлена на рисунке. Система предназначена для эксплуатации в условиях помещений промышленных производственных предприятий с использованием виброизолированного фундамента, на котором выполнен монтаж технологического оборудования.

Разработанная технологическая система имеет следующие составные части.

1. Технологическая вибрационная система:

- электродинамическая вибрационная установка:
 - вибростенд 12;
 - скользящий стол 14;
- шкаф электропитания 1;
- аппаратно-программные средства 2 для управления режимами вибрационной установки;
- шкаф многофункционального электрооборудования 3;
- шкаф системы водяного охлаждения 4 вибрационной установки;
- фланцы 5 кожухов вибрационной установки и шкафа системы водяного охлаждения;
- датчики для измерения вибрационных ускорений 15 в контрольных зонах конструкции.



Принципиальная схема технологической системы для релаксации технологических остаточных напряжений в конструкциях из волокнистых композиционных материалов способом бинарной вибротермической обработки:

- 1, 19 — шкафы электропитания; 2, 18 — аппаратно-программные средства для управления режимами электродинамической вибрационной установки и климатической установки входного типа (Walk-In Type); 3, 17 — шкафы многофункционального электрооборудования; 4 — шкаф системы водяного охлаждения вибрационной установки; 5 — фланцы кожухов вибрационной установки и шкафа системы водяного охлаждения; 6 — фланцы климатической установки; 7 — климатическая установка; 8 — герметичные термостойкие уплотнения; 9 — герметичные люки с герморазъемами; 10 — датчики для измерения температур в контрольных зонах композита; 11 или 13 — конструкции из композиционных материалов; 12 — вибростенд; 14 — скользящий стол; 15 — датчики для измерения вибрационных ускорений в контрольных зонах композита; 16 — откатная дверь рабочего объема климатической установки

2. Технологическая климатическая система, пред-назначенная для обеспечения в рабочем объеме климатической установки 7 входного типа (Walk-In Type) заданных оператором величин температуры и относительной влажности воздуха:

- климатическая установка 7:
 - холодильный агрегат;
 - воздушный конденсатор для отвода теплоты в окружающую среду;
 - фланцы 6;
 - герметичные термостойкие уплотнения 8 посадочных мест герметичных люков 9, имеющих герморазъемы, в стенах климатической установки 7;
 - откатная дверь рабочего объема 16;
- шкаф электропитания 19;
- аппаратно-программные средства 18 для управления режимами климатической установки 7;
- шкаф многофункционального электрооборудования 17;
- датчики для измерения температур 10 в контрольных зонах конструкции.

Описания составных частей технологической системы

Используемая нумерация составных частей технологической системы соответствует их нумерации в принципиальной схеме, представленной на рисунке.

Шкафы электропитания 1 и 19 обеспечивают трехфазное электропитание технологических вибрационной и климатической систем с параметрами электросетей $380 \text{ В} \pm 10 \%$, 50 Гц.

Аппаратно-программные средства 2 и 18 предназначены для управления режимами электродинамической вибрационной и климатической (7) установок с использованием законов распределений вибрационных ускорений и температур контрольных зон композитной конструкции по поверхности, на которой закреплены датчики 15 и 10. Аппаратно-программные средства 2 и 18 состоят из многоканальных контроллеров, электронных вычислительных машин и специальных программных обеспечений.

Датчики 15 служат для измерения вибрационных ускорений в контрольных зонах композита и являются пьезоэлектрическими акселерометрами контактного типа с платами интегрирования измеренных вибрационных ускорений для определения при необходимости вибрационных скоростей или перемещений в контрольных зонах изделий из КМ.

Датчики 10 предназначены для измерения температур в контрольных зонах композита и являются

пьезоэлектрическими датчиками контактного типа.

Шкафы многофункционального электрооборудования 3 и 17 обеспечивают выполнение следующих функциональных задач в составе технологических вибрационной и климатической систем.

- Усиление электрических управляющих сигналов, поступивших от аппаратно-программных средств 2 и 18 в контроллеры вибрационной и климатической систем. Транслирование усиленных сигналов на исполнительные органы электродинамической вибрационной и климатической (7) установок.

- Обеспечение электропитания стабилизированным постоянным током потребителей из состава вибрационной и климатической систем.

- Обеспечение трехфазного электропитания потребителей из состава вибрационной и климатической систем.

- Обеспечение включения и выключения агрегатов автоматики вибрационной и климатической систем в соответствии с логикой работы этих систем.

- Контроль состояния признаков защитных блокировок в контроллерах вибрационной и климатической систем. Транслирование управляющих сигналов на выключение агрегатов автоматики этих систем по информации о состоянии признаков защитных блокировок.

- Отображение на дисплеях актуального технического состояния вибрационной и климатической систем.

Шкаф системы водяного охлаждения 4 служит для обеспечения рабочих тепловых режимов электродинамической вибрационной установки путем отвода теплоты с использованием контура технологической воды для сохранения работоспособности вибрационной установки и обеспечения выполнения функциональных задач имеющимся технологическим оборудованием. Циркуляция теплоносителя между шкафом системы водяного охлаждения и вибрационной установкой осуществляется за счет применения рукавов рабочего давления теплоносителя, закрытых кожухами, в рабочем объеме и за границами рабочего объема климатической установки 7. Стыки кожухов со стеной рабочего объема климатической установки выполнены с использованием фланцевых соединений, уплотненных термостойкими герметиками 8.

Термостойкие герметики являются силикатными жаростойкими материалами с рабочей температурой до 1300°C , а при кратковременном термическом воздействии — до 1500°C . Силикатные жаростойкие герметики 8 предназначены для уплотнения следующих зон технологической системы, обеспечивающей бинарную вибротермиче-

скую релаксацию остаточных напряжений в композитных конструкциях:

- стыков стен рабочего объема климатической установки 7 с виброизолированным фундаментом помещения;
- посадочных мест герметичных люков 9, имеющих герморазъемы, в стенах рабочего объема климатической установки 7;
- фланцевых соединений кожухов электродинамической вибрационной установки и шкафа системы водяного охлаждения 4 технологического оборудования со стеной рабочего объема климатической установки 7;
- стыков откатной двери 16 со стеной рабочего объема климатической установки 7.

Электродинамическая вибрационная установка служит для создания механического циклического воздействия на конструкцию из композиционного материала 11 или 13 в вертикальном и (или) горизонтальном направлениях. При габаритных размерах композитной конструкции, не позволяющих выполнить ее монтаж на рабочий стол вибростенда 12, для вибрационной обработки композита используют скользящий стол 14 из состава электродинамической вибрационной установки. Так, например, монтаж конструкции 11 целесообразно выполнить на рабочий стол вибростенда 12, а для вибрационной обработки конструкции 13 необходимо использовать скользящий стол 14.

Климатическая установка 7 предназначена для создания термического воздействия на конструкцию из композиционного материала 11 или 13 при обеспечении необходимой величины относительной влажности воздуха в рабочем объеме. Она является технологической камерой входного типа (Walk-In Type), применяемой для создания определенных теплоты (холода) и влажности воздуха в рабочем объеме.

Принципиальный технологический процесс релаксации остаточных напряжений в композитных конструкциях способом бинарной вибротермической обработки

Используемая нумерация составных частей технологической системы соответствует их нумерации в принципиальной схеме, представленной на рисунке.

Принципиальный технологический процесс релаксации остаточных напряжений в композитных конструкциях способом бинарной вибротермической обработки заключается в следующем:

- диагностика композита для локализации концентраторов остаточных напряжений и прогнозирования величин компонентов тензоров

напряжений. Способы обнаружения локальных концентраторов напряжений в конструкциях и определения величин напряжений даны в [12]. Для диагностики волокнистых композитов целесообразно применять способ, который реализовывают с использованием оптических волокон с брэгговскими решетками. Указанный способ локализации концентраторов остаточных напряжений и прогнозирования величин компонентов тензоров напряжений предусматривает проведение следующих процедур:

- определение исходного спектрального положения пиков брэгговских решеток;
- внедрение оптических волокон с брэгговскими решетками в структуру композита при выполнении технологического процесса изготовления конструкции;
- измерение спектрального положения пиков брэгговских решеток после завершения технологического процесса изготовления композита, включающего операции технологических термического и механического воздействий;
- определение тензоров деформаций и напряжений конструкции путем решения систем уравнений [12];
- выполнение сравнительного анализа расчетно-экспериментальных и справочных предельно допустимых тензоров деформаций и напряжений композита;
- локализация концентраторов напряжений в объеме конструкции;
- прогнозирование параметров бинарной вибротермической обработки композита с учетом результатов локализации концентраторов остаточных напряжений и величин компонентов тензоров напряжений. Параметрами вибротермической обработки являются величины вибрационного и термического воздействий на конструкцию и длительность обработки. Для прогнозирования указанных параметров целесообразно использовать программные средства, созданные с помощью разработанной авторами математической модели [2] НДС композитов;
- монтаж конструкции на рабочий стол вибростенда 12 или скользящий стол 14 электродинамической вибрационной установки;
- крепление датчиков для измерения вибрационных ускорений 15 и температур 10 в контрольных зонах композита;
- стыковка проводов датчиков 15 и 10 с герморазъемами герметичных люков 9;
- герметизация рабочего объема климатической установки 7 путем закрытия откатной двери 16;

- бинарная вибротермическая обработка конструкции, порядок выполнения которой регламентирован следующими технологическими переходами:

- подача электропитания на климатическую систему;
- подача электропитания на вибрационную систему;
- создание с использованием климатической системы термического воздействия на композит, величина которого определена при прогнозировании параметров вибротермической обработки;
- создание с использованием вибрационной системы механического циклического воздействия на конструкцию, величина которого определена при прогнозировании параметров вибротермической обработки;
- контроль соответствия величин вибрационного и термического воздействий на композит, созданных технологической системой, величинам этих воздействий, определенным при прогнозировании параметров вибротермической обработки. Контроль выполняют с использованием законов распределений вибрационных ускорений и температур контрольных зон конструкции по поверхности, на которой закреплены датчики 15 и 10. Длительность контроля соответствует длительности вибротермической обработки композита, определенной при прогнозировании параметров обработки;
- приведение конструкции в состояние покоя снятием механического циклического воздействия от вибрационной системы;
- приведение величины температуры воздуха в рабочем объеме климатической установки 7 в соответствие с величиной температуры воздуха в помещении, в котором установлена технологическая система;
- снятие электропитания с вибрационной системы;
- снятие электропитания с климатической системы;
- разгерметизация рабочего объема климатической установки 7 путем открывания откатной двери 16;
- расстыковка проводов датчиков 15 и 10 от герморазъемов герметичных люков 9;
- демонтаж датчиков 15 и 10 в контрольных зонах композита;
- демонтаж конструкции с рабочего стола вибростенда 12 или скользящего стола 14 электродинамической вибрационной установки;

- диагностика композита для локализации концентраторов остаточных напряжений и прогнозирования величин компонентов тензоров этих напряжений для оценки качества бинарной вибротермической обработки конструкции.

Разработанная технологическая система обеспечивает внедрение в ТП промышленных производственных предприятий способа бинарной вибротермической обработки конструкций из волокнистых КМ для релаксации в них остаточных напряжений.

Заключение

Технологическая система, предназначенная для релаксации остаточных напряжений в волокнистых композитах, в комплексе с программными средствами, созданными с использованием математической модели [2] НДС композитных конструкций, может быть использована для изготовления композитных изделий, к которым предъявляют высокие требования по качеству и надежности, например изделий авиационной и ракетно-космической техники, робототехнической, энергетической, судостроительной и других отраслей промышленности.

Задача релаксации остаточных напряжений в конструкциях из волокнистых КМ решена. Достигнутым техническим результатом является разработанная технологическая система, не имеющая известных аналогов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варушкин Е. М., Поляков В. И., Лапин Ю. Л. Экспериментальное исследование влияния технологических параметров на остаточные напряжения в толстостенных намотанных изделиях // Механика полимеров. 1972. № 2. С. 75—80.
2. Дементьев И. И., Устинов А. Н. Способ релаксации остаточных напряжений в композитных упругих элементах конструкций космических аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 8. С. 43—50.
3. Инденбаум В. М. Расчет остаточных напряжений в многослойных цилиндрах из комбинированных композитов // Труды Московского энергетического института. 1973. Вып. 164. С. 81—86.
4. Шимов Г. В., Буркин С. П., Серебряков А. В., Серебряков Ал. В., Исхаков Р. Ф. Способ термической обработки и правки труб для парогенераторов атомных электростанций // Черные металлы. 2013. № 11. С. 31—37.
5. Буркин С. П., Шимов Г. В., Андрикова Е. А. Остаточные напряжения в металлопродукции: учеб. пособие. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 248 с.
6. Файрушин А. М., Каретников Д. В., Зарипов М. З., Абдуллин Т. З., Ахтямов Р. М., Фазылов М. Р. Способ снижения остаточных напряжений в сварных соединениях металлов. Патент № 2424885 РФ. 2011. Бюл. № 21. — 8 с.
7. Летуновский А. П., Антонов А. А., Стеклов О. И. Снятие технологических остаточных напряжений в металлоконструкциях низкочастотной виброобработкой // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 8. С. 12—16.

8. **Ripoll M., Weygand S., Riedel H.** Reduction of tensile residual stress during the drawing process of tungsten wires // Materials science and engineering. 2010. № A527. P. 3064—3072.

9. Способ снятия остаточных напряжений сварных соединений сосудов и аппаратов, а также их элементов. Патент № 2243272 РФ. 2004. Бюл. № 36. — 6 с.

10. **Libonati F., Vergani L.** Damage assessment of composite materials by means of thermographic analyses // Composites Part B: Engineering. 2013. V. 50. P. 82—90.

11. **Antman S. S.** Nonlinear problems of elasticity / ed. by Antman S. S., Marsden J. E., Sirovich L. 2nd ed. — N. Y.: Springer Science+Business Media, 2005. — 835 p.

12. **Будадин О. Н., Кульков А. А., Козельская С. О., Каледин В. О.** Способ диагностики надежности и предельного ресурса эксплуатации многослойных конструкций из композитных материалов. Патент № 2633288 РФ. 2017. Бюл. № 29. — 39 с.

Technological system for relaxation of residual stresses in composite structures by binary vibrothermal treatment

I. I. DEMENTYEV

Joint Stock Company "Design Bureau "Arsenal" named after M. V. Frunze", Saint-Petersburg, Russia

The article presents technological system that provides relaxation of technological residual stresses in structures made of fibrous composite materials by the method of binary vibrothermal treatment. The system consists of a technological vibration system and a technological climate system, which have an electrodynamic vibration unit and a walk-in type climatic unit. The developed technological system can be used in the technological processes of industrial organizations for the production of composite structures, mainly for products that have high requirements for quality and reliability.

Keywords: technological system, binary vibrothermal treatment, relaxation of technological residual stresses, fiber composite structures.

УДК 67.05:681.783.332.3

Разработка крупногабаритных составных мастер-моделей для изготовления композитных изделий авиационной и ракетно-космической техники

А. Е. КОВАНОВ; А. В. МАМОНОВ; Н. В. ШИШКАНОВ; А. И. ИРОШНИКОВ

АО «ОНПП "Технология" им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Калужская обл., Россия

Рассмотрены задачи проектирования и изготовления крупногабаритных мастер-моделей, состоящих из отдельных стыкуемых элементов из модельного пластика, обеспечивающих их основные эксплуатационные характеристики: точность формообразующей поверхности мастер-модели, жёсткость оснастки, ограничения по массе. Показаны особенности методов контроля геометрии формообразующей поверхности мастер-модели.

Ключевые слова: крупногабаритная составная мастер-модель, точность, контроль формообразующей поверхности, мобильная измерительная система.

Производственный процесс изготовления из полимерных композиционных материалов (ПКМ) крупногабаритных изделий авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ) невозможен без технологической оснастки для формования изделий. Применение металлических оснасток в этом случае становится нерациональным вследствие высокой трудоёмкости процесса изготовления, большой конечной массы, высокой энергоёмкости прогрева оснастки в процессе формования, большой разницы коэффициентов линейного термического расширения (КЛТР) металла и пластика, что приводит к короблению изделий при формовании [1, 2].

Для устранения этих проблем все чаще используют оснастки из ПКМ, состоящие из формообразующей (рабочая поверхность оснастки) и силового каркаса, обеспечивающего жесткость формообразующей поверхности при эксплуатации.

К изделиям АРКТ предъявляют повышенные требования по массовой эффективности, точности и жесткости изделия, трудоемкости сборочных работ [3]. Улучшения этих показателей можно достичь за счет таких факторов, как:

- использование высокопрочных и высококомпульсных ПКМ;

- уменьшение разности КЛТР между материалами деталей и оснастки;
- повышение устойчивости материала оснастки к циклическому воздействию температур формования;
- снижение количества деталей, что приводит к увеличению габаритов отдельных элементов изделия.

Увеличение габаритов элементов изделия вносит существенный вклад в повышение его массовой эффективности за счет снижения числа стыков, требующих усиления, и уменьшения массы крепежных элементов. При этом возникает необходимость в крупногабаритных оснастках и таких же мастер-моделях для изготовления формообразующих поверхностей. Изготовление крупногабаритных мастер-моделей сопряжено с возникновением ряда проблем, поскольку:

- габариты мастер-модели зачастую не вписываются в рабочую зону имеющихся станков с числовым программным управлением (ЧПУ), что приводит к необходимости разбивки мастер-модели на составные элементы (рис. 1);
- к мастер-модели предъявляют высокие требования по точности (отклонение не более 0,5 мм на площади более 40 м²);
- при обработке мастер-модели большой площади увеличивается расход модельного пластика и дорогостоящего инструмента.

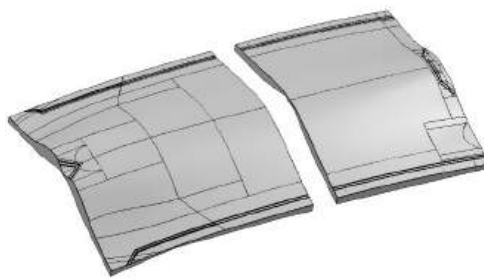


Рис. 1. Разбивка мастер-модели на отдельные элементы

Кованов Антон Евгеньевич, начальник сектора 432 лаборатории 43.

E-mail: akovanov@mail.ru

Мамонов Александр Валерьевич, начальник сектора 435 лаборатории 43.

E-mail: a_mamonoff@mail.ru

Шишканов Николай Васильевич, начальник сектора 431 лаборатории 43.

E-mail: shishkan_n@mail.ru

Ирошников Андрей Игоревич, инженер-технолог сектора 434 лаборатории 43.

E-mail: airoshnikov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2020 г.

© Кованов А. Е., Мамонов А. В., Шишканов Н. В., Ирошников А. И., 2021

Материалы для изготовления заготовок мастер-моделей

Исходя из необходимых технических характеристик в качестве материалов авторами были выбраны модельные пластики ModelMaster A110 и RenShape BM 5460 (таблица). Их основные преимущества: хорошее качество поверхности; возможность изготовления модели с высокой точностью; низкая плотность; возможность обработки как с помощью станков с ЧПУ, так и ручным способом; ремонтпригодность; неподверженность воздействию влаги; возможность склеивания; высокая соскальзываемость с формы за счет низкого коэффициента трения модельного пластика; длительный срок хранения.

Характеристики материалов для изготовления заготовок мастер-моделей

Характеристики	ModelMaster A110	RenShape BM 5460
Цвет	Синий	Коричневый
Плотность, кг/м ³	708	650—700
Коэффициент термического расширения при (22—71) °C, 10 ⁻⁶ ×C ⁻¹	35,7	50—55
Температура стеклования, °C	125	—
Температурная стойкость, °C	—	80
Прочность при растяжении при 25 °C, МПа	34,3	—
Прочность при сжатии, МПа	52	25—30
Модуль изгиба при 22 °C, МПа	2483	—
Модуль сжатия, МПа	—	1250—1350
Гибкость ISO 178, МПа	—	25—30
Твердость по Шору D	68	70—75

В случаях малых размеров мастер-моделей (габаритами до 3 м) целесообразнее использовать RenShape BM 5460, поскольку стоимость этого материала при сопоставимой плотности в 3 раза ниже стоимости ModelMaster A110, а расход режущего инструмента при его обработке в 2,5—3 раза ниже. Однако в случае крупногабаритных мастер-моделей (особенно при габаритах 10 м и более) важным параметром становится КЛТР, что зачастую приводит к необходимости использования ModelMaster A110.

При формировании заготовок отдельных элементов мастер-модели из модельных плит с учетом оборудования, применяемого для их изготовления, необходимо выдерживать определённые ограничения по их габаритам и массе, а также обеспечивать необходимую размеростабильность. Эти ограничения определяют также количество конструктивных элементов общей мастер-модели. При разбивке мастер-модели на элементы необходимо учитывать следующие аспекты:

- каждый элемент должен вписываться в габариты рабочей зоны станка с ЧПУ с учётом обра-

ботки базовых стыковочных поверхностей и обрабатываться за один установ;

- масса заготовки мастер-модели не должна превышать допустимую грузоподъёмность станка с ЧПУ (для станков с подвижным столом) и грузоподъёмных механизмов.

Способы формирования заготовок элементов мастер-модели

Для обеспечения необходимых характеристик по массе и размеростабильности заготовки мастер-модели используют силовой металлический каркас, на который наклеивают плиты из модельного пластика. Существуют два способа формирования заготовок из модельных плит.

Первый способ предусматривает склейку заготовки на металлическом каркасе, имеющем горизонтальное основание в виде листа металла для приклейки модельных плит (рис. 2). При этом весь объём заготовки формируется целиком из модельного пластика.

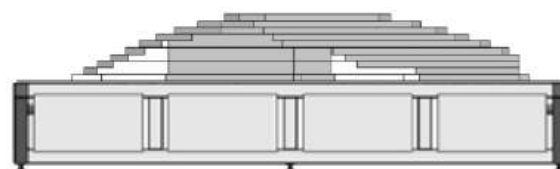


Рис. 2. Весь массив заготовки элемента, набранный из модельных плит

Преимущества данного способа — простота конструкции каркаса, простота раскроя и склейки модельных плит, предусматривающих лишь наличие необходимого припуска для механической обработки, а также, ввиду большого объёма модельного пластика, возможность повторного использования обработанной из данной заготовки мастер-модели как заготовки для другой мастер-модели, вписывающейся в данную заготовку. Существенный недостаток способа — большой расход модельных плит и, как следствие, большая масса заготовки и значительные материальные затраты.

Второй способ заключается в том, что силовой каркас изготавливают исходя из упрощённой кривизны теоретической поверхности мастер-модели (рис. 3).

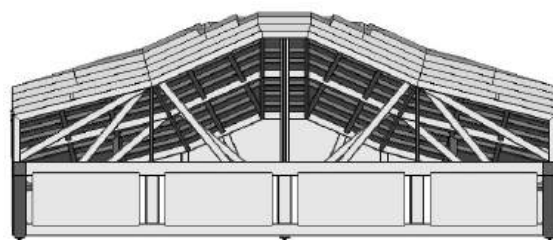


Рис. 3. Каркас, приближенный к теоретической поверхности мастер-модели с наклеенными модельными плитами

Верхнюю поверхность каркаса выполняют из металлических листов, к которым приклеивают плиты из модельного пластика. Поскольку плиты приклеивают под разными углами друг к другу, на них предварительно обрабатывают скосы по соответствующим торцам. Для склейки используют клей, по компонентному составу идентичный материалу модельных плит. В результате обеспечивается монолитность конструкции. Склеивку осуществляют послойно. При этом каждый слой фиксируют и выдерживают до полной полимеризации клея, что минимизирует смещение модельных плит в пределах заложенного припуска.

Главное преимущество данного способа — существенная экономия модельного пластика, а также существенное снижение массы заготовки, что делает его наиболее приоритетным при изготовлении отдельных элементов крупногабаритных мастер-моделей. Недостаток способа — более сложная конструкция силового каркаса, что приводит к необходимости предварительной обработки скосов на модельных плитах для их стыковки и склейки и, как следствие, к увеличению трудоёмкости.

И в первом, и во втором вариантах металлический каркас оснащён регулируемыми опорами винтового типа, равномерно распределёнными по периметру каркаса. Заготовку устанавливают на стол станка с ЧПУ на опоры. При этом все опоры выкручивают до упора в стол станка, исключая зависание. Путём регулировки опор добиваются также более точного выставления заготовки на столе станка по определённым реперным точкам. Во избежание деформации каркаса фиксацию заготовки на столе станка осуществляют механическими прижимами, установленными в зоне опор. После проведения всех указанных манипуляций выполняют механическую обработку формообразующей поверхности элемента мастер-модели на станке с ЧПУ по управляющим программам, а после её окончания обрабатывают базовые стыковочные поверхности, необходимые для более точной конечной сборки мастер-модели, и осуществляют контроль отклонений всех обработанных поверхностей от математической модели с помощью мобильной измерительной системы.

Проверка геометрической точности обработанных элементов мастер-модели

Для проверки геометрической точности поверхности каждого из элементов мастер-модели применяют фотограмметрический метод сканирования поверхности с использованием мобильной измерительной системы. Полученное в результате сканирования облако точек преобразуют в поли-

гональную сетку, которая с точностью измерительной системы повторяет геометрию сканированной части элемента. Форма сетки должна соответствовать обработанной области заготовки, включая все неточности обработки, а также погрешности и ошибки измерений, которые обязательно присутствуют каждый раз при сканировании любого объекта. Кроме того, для получения достоверных сведений об отклонениях поверхности измеряемой мастер-модели от математической модели необходимо предварительно совместить математический образ обработанных базовых поверхностей элемента мастер-модели с соответствующими базовыми поверхностями математической модели. После этого можно посчитать отклонения координат узлов сетки от математической модели. Учитывая карту отклонений по всем обработанным поверхностям элемента, можно произвести минимизацию отклонений сетки, используя только рабочую поверхность элемента мастер-модели без привязки к базовым стыковочным поверхностям. Минимизацию отклонений производят путём внесения корректировок в положение сетки при её совмещении с математической моделью: происходит точная подгонка положения сетки в рабочей части поверхности элемента к эталонной математической модели. Для этого необходимо принять следующие допущения:

- механическая обработка элемента мастер-модели производится на таком оборудовании, с помощью такого инструмента и с применением таких стратегий обработки, которые в совокупности позволяют получить поверхность, соответствующую нормам точности, необходимым для выполнения работ на данном этапе. Это положение гарантирует отсутствие ошибок, которые могут привести к отклонениям геометрии поверхности, превышающим допустимые значения, и, следовательно, внести существенный вклад в расположение сетки при её совмещении с математической моделью;

- погрешности измеренных значений координат узлов сетки имеют нормальный закон распределения. Данное утверждение позволяет применить к набору значений отклонений методы статистического анализа;

- в процессе минимизации отклонений для выбора используемых значений отклонений из числа всех точек сетки применяют "правило трех сигм".

Для нормального распределения в выборке применительно к набору отклонений позиций узлов сетки от математически точных их расположений стандартное отклонение "сигма" вычисляется по формуле [4]

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{(n-1)}},$$

где n — число вершин сетки;

\bar{X} — математически точное расположение вершины;

X_i — измеренное положение вершины i .

Согласно закону нормального распределения вероятность того, что расположение вершины окажется внутри интервала $\pm 3\sigma$, равна $\sim 99,7\%$. Иначе, участки поверхности, содержащие ошибки и значительные по величине отклонения, исключаются из выборки, используемой для минимизации отклонений.

Таким образом, по окончании этапа минимизации отклонений усреднённое расположение полигональной сетки отсканированного элемента в системе координат его математической модели, представленное в виде карты отклонений, будет иметь вид, показанный на рис. 4.

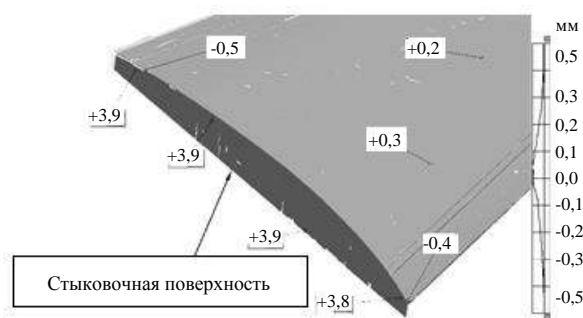


Рис. 4. Карта отклонений поверхности элемента мастер-модели

Следует отметить, что технологически, ввиду больших габаритов элементов мастер-моделей базовые стыковочные вертикальные поверхности зачастую имеют вертикальный размер, превышающий максимально возможные вылеты любого инструмента, устанавливаемого в шпиндель станка с ЧПУ. Это приводит к необходимости использовать для таких поверхностей способ пятиосевой обработки, что даёт дополнительную погрешность из-за вовлечения в процесс обработки поворотных осей станка. Поэтому после окончания механической обработки формообразующей поверхности базовые стыковочные поверхности предварительно выполняют с припуском. Затем без съема мастер-модели со станка выполняют описанную процедуру сканирования всех обработанных поверхностей и проводят совмещение отсканированной поверхности с теоретической в границах формообразующей поверхности. В результате на карте отклонений виден фактически измеренный припуск по базовым стыковочным поверхностям (см. рис. 4), что позволяет внести точную коррек-

тировку в управляющую программу для станка с ЧПУ для доработки стыковочных поверхностей элемента.

Процесс сборки мастер-модели

Сборку крупногабаритных мастер-моделей, а также последующую выкладку оснастки на них осуществляют непосредственно на полу цеха.

Вначале выполняют предварительную сборку. Элементы мастер-модели устанавливают на винтовые опоры, все регулируемые опоры выкручивают до упора в пол. Затем осуществляют смыкание элементов по стыковочным поверхностям и выравнивание положения элементов относительно друг друга при помощи соответствующих регулировок винтовых опор, ориентируясь по рискам, нанесённым на формообразующую поверхность. При этом вдоль стыков не должно быть зазоров и ступенек. Далее выполняют более точную корректировку положения элементов. Для этого проводят проверку выставления элементов с использованием мобильной измерительной системы методом сканирования поверхности общей мастер-модели (рис. 5).

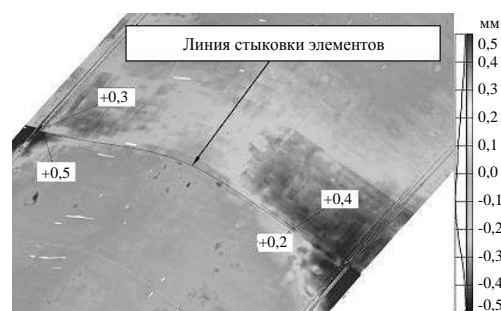


Рис. 5. Карта отклонений поверхности общей мастер-модели

Суть метода состоит в достижении такого взаимного расположения элементов мастер-модели, при котором отклонение всей формообразующей поверхности мастер-модели как единого целого от математической модели будет иметь минимальное значение и укладываться в требуемый допуск.

Для того чтобы точно выставить элементы мастер-модели относительно друг друга, необходимо в первую очередь после сборки элементов в единое целое грубо оценить их взаимное расположение. Поскольку для эксплуатации мастер-модели применяется жесткая рама, авторы предполагали, что при свободных перемещениях геометрия поверхности каждого из элементов не деформируется. Поэтому имея данные отклонений поверхности каждого из элементов мастер-модели, которые укладываются в необходимый допуск, можно утверждать, что отклонения поверхности всей сборки сверх допуска являются результатом лишь

неточности сборки. Соответственно для оценки взаимного расположения элементов можно сканировать не всю поверхность составной мастер-модели, а лишь граничные области, примыкающие к зоне стыка. Один из элементов выбираем за базовый, т. е. при усреднении отклонений используем поверхность этого базового элемента. Отклонения поверхностей других элементов сверх допуска являются объектом корректировки. С помощью регулируемых винтовых опор отдельных элементов (кроме элемента, выбранного за базовый) приводим мастер-модель в состояние, при котором максимальная величина отклонений общей формообразующей поверхности не превышает необходимый допуск.

Выводы

Использование при изготовлении крупногабаритных изделий формообразующей оснастки из ПКМ вместо металлической является наиболее рациональным решением исходя из критериев снижения трудоёмкости изготовления, конечной массы, энергоёмкости прогрева и минимизации разницы КЛТР формообразующей и изделия. Крупногабаритные оснастки из ПКМ позволяют изготавливать аналогичные мастер-модели из модельного пластика. При формировании крупногабаритных мастер-моделей наряду с прочими характеристиками важнейшим параметром, определяющим выбор модельного пластика, является КЛТР.

В целях экономии материала и снижения массы элементов мастер-модели рекомендуется применять способ формирования заготовки исходя из упрощённой кривизны теоретической поверхности мастер-модели. Приклепку модельных плит осуществляют послойно с фиксацией каждого слоя до полной полимеризации клея, что минимизирует смещение модельных плит в процессе склейки и обеспечивает получение монолитной конструкции.

Необходимой точности формообразующей поверхности крупногабаритных мастер-моделей, со-

стоящих из двух и более частей, достигают за счет применения мобильной измерительной системы как на этапе изготовления отдельных элементов мастер-модели, так и на этапе их сборки с возможностью регулировки расположения стыкуемых элементов.

Проведённые исследования позволили определить направления дальнейших разработок в следующих областях:

- проектирование составных элементов заготовок крупногабаритных мастер-моделей в целях дальнейшей минимизации расхода материалов, режущего инструмента и машинного времени обработки на станках с ЧПУ;
- исследование автоматизированных способов позиционирования заготовок крупногабаритных форм на станках с ЧПУ с использованием станочных и мобильных измерительных систем, а также системы ЧПУ станка;
- прецизионная обработка композитных силовых каркасов, предназначенных для крепления формообразующей оснастки, с использованием измерительных систем. При этом каркасы должны обрабатывать на станках с ЧПУ по управляющим программам, сгенерированным по фактической сканограмме обратной поверхности формообразующей оснастки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комаров В. А., Куркин Е. И. Обеспечение точности изготовления крупногабаритных агрегатов авиационных конструкций методом вакуумной инфузии: Всеросс. конф. "Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов", 2015. С. 1—10.
2. Хрульков А. В., Душин М. В., Попов Ю. О., Коган Д. И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ: юбилейный научнотехнич. сб. "Авиационные материалы и технологии", 2012. С. 292—301.
3. Харченко М. Е. Обзор и анализ состояния разработки формостабильных композитных конструкций космического назначения // Системные технологии. 2013. № 4(87). С. 180—186.
4. Ванеева М. В., Попело В. Д. Теория математической обработки геодезических измерений. Ч. 2. Оценивание результатов геодезических измерений и их погрешностей на основе вероятностных представлений. — Воронеж: ВГАУ, 2015. — 138 с.

Development of large-sized compound master-models for the production of composite products of aviation and the rocket and space equipment

A. E. KOVANOV, A. V. MAMONOV, N. V. SHISHKANOV, A. I. IROSHNIKOV
ORPE "Technologiya named after A. G. Romashin", Obninsk, Kaluga Region, Russia

The article considers the problems of designing and manufacturing large-sized master-models made of model plastic, consisting of several elements that fit together, providing the main operational characteristics: accuracy of form-building surface of master model, rigidity, weight restrictions. Features of methods of geometry control of master-model form-building surface are shown.

Keywords: large-sized compound master model, accuracy, control of form-building surface, mobile measuring system.

Высокотемпературные композиционные материалы на основе ниобия, полученные методом порошковой металлургии: свойства, применение (Часть 2) (Обзор)

Н. П. БУРКОВСКАЯ, канд. хим. наук; В. В. ДМИТРИЕВА, канд. хим. наук;
Б. В. ЩЕТАНОВ, д-р техн. наук; Н. В. СЕВОСТЬЯНОВ, канд. техн. наук
Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов ГНЦ РФ,
Москва, Россия

Рассмотрены способы изготовления высокотемпературных композиционных материалов (КМ) на основе ниобия. Отмечено, что наряду с традиционными литейными технологиями широкое распространение получили способы изготовления ниобиевых материалов из порошков. Показано влияние легирования на механические свойства высокотемпературных ниобиевых КМ, полученных литьем, в частности на вязкость разрушения, являющуюся важной характеристикой для оценки практической пригодности разрабатываемых материалов, в особенности малопластичных материалов. Рассмотрена проблема жаростойкости материалов на ниобиевой основе. Оценены возможности повышения устойчивости материалов на ниобиевой основе к окислению и/или возможности разработки защитных покрытий. Показаны пути повышения сопротивления окислению за счет использования легирующих элементов (Al, Cr, Ti, Hf и Sn, Ge и В) в качестве добавок к твердому раствору ниобия. Описаны теплозащитные покрытия для материалов на основе ниобия.

Ключевые слова: ниобий, композиционные материалы на основе ниобия, *in-situ* ниобий-кремневые композиционные материалы, легирование твердого раствора, искровое плазменное спекание, дисперсное упрочнение, жаростойкость, порошковая металлургия, аддитивные технологии.

Изготовление композиционных материалов/сплавов на основе ниобия

Для изготовления образцов КМ системы Nb–Si как в лабораторных условиях, так и в промышленных масштабах традиционно используют отливки, полученные дуговой плавкой, индукционной гарнисажной плавкой или направленной кристаллизацией по методу Чохральского [1–5]. Для литья деталей сложной формы по выплавляемым моделям требуются материалы с высокой температурой плавления и низкой реакционной способностью к

расплаву системы Nb–Si [1, 6]. Наличие таких материалов обеспечивает возможность использования технологической схемы изготовления, разработанной для деталей из суперсплавов Ni. На основе теоретических расчетов установлено, что Y_2O_3 является наиболее термодинамически стабильным среди жаростойких материалов (SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , CaO , ZrO_2 и Y_2O_3) [7]. При литье сплавов на основе NbSi используют как чистый Y_2O_3 , так и Y_2O_3 , допированный $CaO + ZrO_2$ и $MgO + ZrO_2$. Тем не менее показано, что использование чистого Y_2O_3 -тигля предпочтительно.

Поскольку микроструктура литых заготовок гетерогенна, улучшение механических свойств представляет определенные сложности. Проявляются металлургические дефекты (поры, микротрещины и т. д.). Так, например, при охлаждении в дендритах силицидов *in-situ* КМ с более высоким содержанием кремния и, соответственно, с более высокими температурами плавления, несмотря на незначительное расхождение коэффициентов термического линейного расширения (КТЛР, или CTE — Coefficient of linear Thermal Expansion) твердого раствора $M_{(ss)}$ и фаз силицидов M_5Si_3 (например, разница КТЛР чистого Nb и сплава MASC (Metal And Silicide Composites, Nb–16Si–25Ti–2Al–2Cr–4Hf) составляет менее $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)

Бурковская Наталья Петровна, научный сотрудник лаборатории "Металлические композиционные материалы".

E-mail: burkovskaya.n@gmail.ru

Дмитриева Виктория Владимировна, научный сотрудник лаборатории "Металлические композиционные материалы".

E-mail: murasheva_v_v@mail.ru

Щетанов Борис Владимирович, главный научный сотрудник лаборатории "Металлические композиционные материалы", профессор.

E-mail: shetanov@mail.ru

Севостьянов Николай Владимирович, научный сотрудник лаборатории "Металлические композиционные материалы".

E-mail: kolia-phone@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2020 г.

© Бурковская Н. П., Дмитриева В. В., Щетанов Б. В., Севостьянов Н. В., 2021

появляются трещины длиной в несколько сотен микрометров. Это значительно снижает прочность при растяжении, которая зависит от структурных дефектов, по сравнению с прочностью при сжатии [1]. Следует отметить, что термомеханическая обработка литых сплавов лишь частично улучшает их свойства.

Методы порошковой металлургии

Методы порошковой металлургии позволяют улучшать и контролировать микроструктуру материалов, а также вести процесс изготовления при температурах, намного ниже температуры плавления сплава. Первые порошковые КМ на основе двухфазной системы Nb–Nb₅Si₃ получали такими методами, как:

- горячее одноосное прессование (ГП, или HP — Hot Pressing);
- горячее изостатическое прессование (ГИП, или HIP — Hot Isostatic Pressing) порошковых смесей Nb + Nb₅Si₃ [8];
- реакционное горячее прессование смеси порошков Nb + Si [9].

Горячим прессованием синтезирован жаропрочный сплав состава Nb–16Si–2Fe, состоящий из твердого раствора Nb и интерметаллидных фаз Nb₃Si, Nb₅Si₃ и Nb₄Fe₃Si₅. Размер зерен всех четырех фаз лежит в пределах микрометра, что обеспечивает получение мелкозеренной микроструктуры [10]. При температуре 1450 °C сплав обладает сверхпластичностью: удлинение при разрыве при температуре 1450 °C составило 512 %. Микроструктура деформированных образцов и данные дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК, или DSC — Differential Scanning Calorimetry) указывают на то, что преобладающим механизмом сверхпластичной деформации является вязкая фаза Nb₄Fe₃Si₅. Такая сверхпластичность отличается от наблюдаемой в КМ на основе магния и алюминия, сверхпластичная деформация в которых происходит за счет скольжения по границам зерен.

Методами порошковой металлургии получены заготовки детали из композиционного материала с однородной микроструктурой и близкими к заданным в конструкторской документации размерами [11]. Компактирование порошка, полученного распылением газовой атомизацией или высокоэнергетическим механическим легированием элементарных порошков, осуществляли инъекционным формованием порошковых смесей или ГИП. Для оценки фазовой стабильности проводили термическую обработку [11]. Установлено, что в зависимости от технологических особенностей изготовления КМ химический состав (кислород, азот или железо) образцов изменяется незначительно.

Так, способ получения порошка или его консолидация могут влиять на фазовые превращения в материале.

Особое внимание уделено различию между силицидами Nb₅Si₃ и Nb₃Si и их модификациями (α -, β - и γ -Nb₅Si₃) [11]. Более высокое содержание кислорода в процессе термической обработки приводило к образованию HfO₂, стабилизирующего фазу α -Nb₅Si₃, обеспечивающую получение более высокотемпературной прочности. Образцы спеченного материала получали механическим легированием элементарных порошков с последующей консолидацией литьевым формованием (PIM) или горячим изостатическим прессованием (HIP) порошка атомизированного сплава Nb–20Si–23Ti–3Cr–6Al–4Hf. Обе технологические схемы в зависимости от термической обработки позволяют варьировать объемное содержание фаз α -Nb₅Si₃ и γ -Nb₅Si₃. Термическая обработка включает два этапа:

- высокотемпературный режим для быстрого укрупнения зерна;
- последующий отжиг при более низкой температуре (1300 °C) для стабилизации тетрагональной фазы силицида.

Многокомпонентный сплав Nb–20Si–23Ti–6Al–3Cr–4Hf был получен литьевым формованием или горячим изостатическим прессованием предварительно легированного атомизированного порошка [12]. Микроструктура сплава состоит из твердого раствора Nb_(ss), α - и γ -модификации Nb₅Si₃. Ползучесть сплава оценивали при испытании истинного напряжения при температурах 1000 и 1100 °C. Исследована зависимость ползучести сплава от микроструктуры и таких параметров, как размер зерна, напряжение и температура. Установлено, что преобладающим механизмом деформации является скольжение по границам зерен (прямое следствие малого размера зерна/фаз при изготовлении материала по технологии порошковой металлургии). Такая микроструктура приводит к более низкому сопротивлению ползучести по сравнению с однофазным сплавом на основе ниобия.

Сплавы с более сложным составом, содержащие до девяти элементов, изготавливали из порошков, полученных такими методами, как:

- размол на высокоэнергетической шаровой мельнице предварительно отлитых дуговой плавкой отливок сплавов или распыление порошков при вращении электрода в плазме [1], или атомизация в инертном газе [1, 13];
- синтез из элементарных порошков с последующим спеканием или прессованием (HIP) [3].

Компактирование предварительно легированного порошка проводили экструзией [1, 14, 15] или использовали передовые технологические

процессы, такие, как искровое плазменное спекание (ИПС, или SPS — Spark Plasma Sintering) [14]. Установлено, что в случае, если микроструктура экструдированного материала относительно мелкозернистая, то укрупнения зерна можно достичь термической обработкой (рис. 1). Механические свойства сплавов более сложного состава и оптимизация их микроструктуры путем синтеза из порошков с последующей термической обработкой в процессе исследования детально рассмотрены в работе [15].

Механохимический синтез силицида ниобия из порошковой смеси $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{--SiO}_2\text{--Mg}$ в высокоэнергетической планетарной мельнице рассмотрен в работе [16]. Варьируемыми параметрами синтеза являлись время размолла, кристаллическая структура Nb_2O_5 и содержание Mg. Исследованы микроструктурные особенности, фазовый состав и термическая стабильность материалов, определен гранулометрический состав. Установлено, что после пятичасового механического легирования смеси компонентов в стехиометрическом соотношении происходит мгновенное самовоспламенение смеси с образованием NbSi_2 , Nb_5Si_3 , Nb, MgO и остаточного количества Mg. Отмечено, что избыток Mg инициирует образование фазы Nb_5Si_3 , а выщелачивание смеси раствором HCl (4M) способствует удалению магнийсодержащей фазы из синтезированного материала. Согласно данным рентгенофазового анализа (РФА) фазовый состав материала состоит из 97 масс. % NbSi_2 и 3 масс. % Nb_5Si_3 , а по данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) каждая наночастица силицида Nb покрыта слоем SiO_2 . Средний размер частиц силицида ниобия и слой SiO_2 составляют 61 и 7,5 нм соответственно.

В работах [17—24] исследованы способы полу-

чения ниобиевых КМ систем Nb–Si и Nb–Si–Ti двумя путями: из порошков простых элементов или соединений более сложного состава (Nb_5Si_3). Размол порошков и механохимический синтез осуществляли в атриторах или планетарной мельнице, консолидацию порошков проводили такими методами, как горячее прессование [17—19], искровое плазменное спекание [14, 21, 23], горячее изостатическое прессование [13] и экструзия [1, 13, 14, 25]. В работах [17—24] рассмотрены такие же вопросы контролируемых (напол железа) и неконтролируемых примесей (O, N, C).

В работе [13] при изготовлении спеченного материала на основе силицида ниобия для компактирования горячим изостатическим прессованием использовали порошки сложного состава (Nb–Si–Ti–Al–Cr–Hf), полученные атомизацией сплава Nb–20Si–24Ti–2Al–5Cr–3Hf в инертном газе.

Изучены возможности использования методов порошковой металлургии (прямое лазерное спекание, порошковое литьевое формование, SPS и т. д.) для производства деталей с размерами, близкими к заданным, и со специально заданной микроструктурой. В частности, возможности использования некоторых технологических схем рассмотрены в проекте HYSOP (Бирмингем, Великобритания) [26, 27] при разработке эффективных систем покрытий на основе многослойных ЕВС-покрытий (Environmental Barrier Coatings).

Так, сегмент лопасти и лопатки турбины газотурбинный двигатель (ГТД) были изготовлены ГИП из атомизированного порошка сплава на основе силицида ниобия (Nb–20Si–23Ti–6Al–3Cr–4Hf). Капсулы для ГИП порошка сплава изготавливали селективным лазерным плавлением металлического порошка (SLM — Selective Laser Melting) (рис. 2) [27].

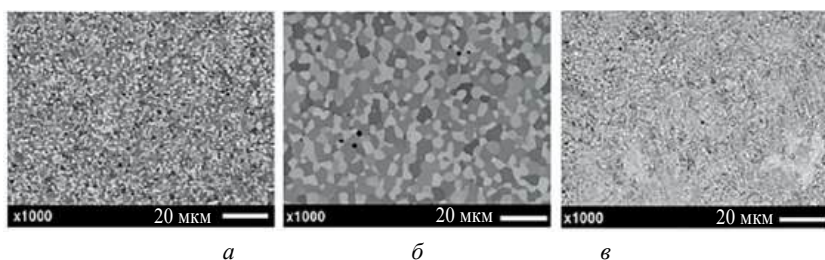


Рис. 1. Микроструктура порошкового сплава Nb–25Ti–8Hf–2Al–2Cr–16Si (поперечное сечение):

а — после экструзии при 1400 °С; *б* — после экструзии при 1400 °С и термической обработки при 1400 °С в течение 24 ч (увеличение размера зерна в 5—10 раз); *в* — после искрового плазменного спекания при температуре 1325 °С [15]



Рис. 2. Двойной сегмент лопасти (а) и лопатки турбины ГТД разной геометрии (б, в), полученные ГИП порошка из сплава Nb–20Si–23Ti–6Al–3Cr–4Hf

Порошково-инжекционное литьё (Powder Injection Molding — PIM). Кроме описанных ранее способов консолидации широкое распространение получают порошковое литьевое формование и прямое лазерное спекание [27, 28]. Порошковое литьевое формование (PIM — Powder Injection Molding), также называемое литьем под давлением металла (MIM — Metal Injection Molding), является адаптированным процессом, сочетающим в себе процессы порошковой металлургии и литья под давлением для производства металлов, керамических и тугоплавких металлических изделий [27]. Для металлургии коммерческий интерес представляет производство больших количеств деталей сложной формы при относительно низкой стоимости. Детали по технологии PIM обычно могут изготавливать с высокой точностью из различных материалов. Затем связующее удаляют растворителем и/или термически перед спеканием порошковой детали. Для достижения достаточной текучести исходного сырья необходимо использовать мелкодисперсные порошки, обычно размером частиц менее 5 мкм. Предпочтительны порошки с частицами сферической, а не осколочной формы. Многие производители оборудования для PIM разрабатывают свое собственное сырье, патентуя состав как интеллектуальную собственность.

Технология PIM использована для изготовления газотурбинных лопаток в проекте HYSOP (рис. 3) [26, 27].

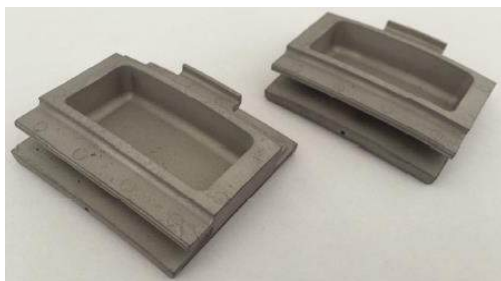


Рис. 3. Сегмент уплотнения турбины, выполненный по PIM-технологии из порошка сплава Nb–20Si–23Ti–6Al–3Cr–4Hf, изготовленного методом газовой атомизации порошка

Прямое лазерное спекание (DLF — Direct Laser Fabrication). Многокомпонентный композиционный материал системы ниобий–силицид с однородной структурой (Nb–22Si–26Ti–2Al–6Cr–3Hf) успешно получен прямым лазерным спеканием [27, 28]. DLF-технология считается технологией быстрого прототипирования, позволяющей формировать слоистую сетчатую структуру деталей со сложной геометрией.

Горячая экструзия. Горячая экструзия — процесс, протекающий при высоких скоростях и давлениях, при значительном переходе механической энергии в тепловую, что приводит к различным по

толщине изменениям в качественных показателях материала. Кроме того, может происходить регулируемый подвод тепла как непосредственно к продукту, так и через наружные стенки экструдера. В процессе горячей экструзии прутки проталкиваются через фильеру меньшего диаметра. Процесс используется для достижения полного уплотнения предварительно спрессованного образца или как метод одностадийного уплотнения. Экструзии может быть подвержен предварительно спрессованный сыпучий порошок ниобиевого материала, для чего используют капсулу из деформируемого металла, например молибдена или тантала [1, 13, 25, 27].

Методом селективного лазерного плавления (SLM) получены образцы сплава Nb–18Si–24Ti–2Cr–2Al–2Hf (ат. %) [29]. Установлено, что аддитивная технология SLM позволяет получить ультратонкую микроструктуру образцов. После окисления при 1250 °C в течение 50 ч прирост массы образцов сплава на основе системы Nb–Si, полученных SLM и вакуумной индукционной плавкой (VIM — Vacuum Induction Melting), составил 96,48 и 198,91 мг/см² соответственно. Сплав, изготовленный способом VIM, по сравнению с SLM-сплавом имел более низкую кинетическую скорость окисления, более компактный оксидный слой без сколов, состоящий из оксидов TiO₂ и CrNbO₄ с подслоем SiO₂. Улучшение стойкости к окислению авторы объясняют микроструктурными особенностями образцов.

Механические свойства композиционных материалов/сплавов на основе ниобия

Механические свойства ряда сплавов Nb–Ti–Hf–Cr–Al–Si, включая прочность, хрупкость и усталостное напряжение, сопротивление ползучести, рассмотрены в работах [1, 2]. Из рис. 4 [15] видно, что легирование улучшает трещиностойкость ниобий–кремниевых КМ, полученных направленной кристаллизацией.

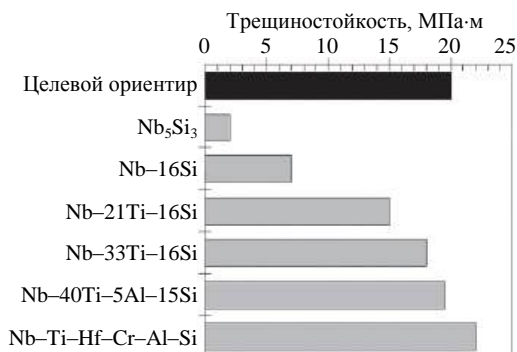


Рис. 4. Трещиностойкость ниобий–кремниевых КМ, полученных направленной кристаллизацией (кроме Nb₅Si₃ из [2])

Легирование КМ жаропрочными металлами также значительно улучшает их высокотемпературную прочность и сопротивление ползучести (рис. 4). Однако полученные улучшения достигнуты за счет ухудшения вязкости и пластичности (температуры вязко-хрупкого перехода достигают 1200 °C [30]) и сопротивления окислению. Сопротивление КМ ползучести является одной из основных характеристик, подлежащих оптимизации в случае применения материалов во вращающих элементах турбин, работающих в высокотемпературных условиях. В работах по проекту ULTIMAT (рис. 5) продемонстрировано влияние увеличения содержания кремния и добавок жаропрочных элементов в Nb–Si КМ по сравнению со сплавом CMSX-4 (с 16 ат. % Si) [4, 15]. Показано, что рабочая температура может быть повышена приблизительно на 150 °C по сравнению с CMSX-4 на основе монокристаллического суперсплава Ni (масс. %: Co 9,3—10,0; Cr 6,4—6,8; Mo 0,5—0,07; W 6,2—6,7; Al 5,45—5,75; Ti 0,8—1,2; Hf 0,02—0,12; Re 2,8—3,2; Ni — остальное).

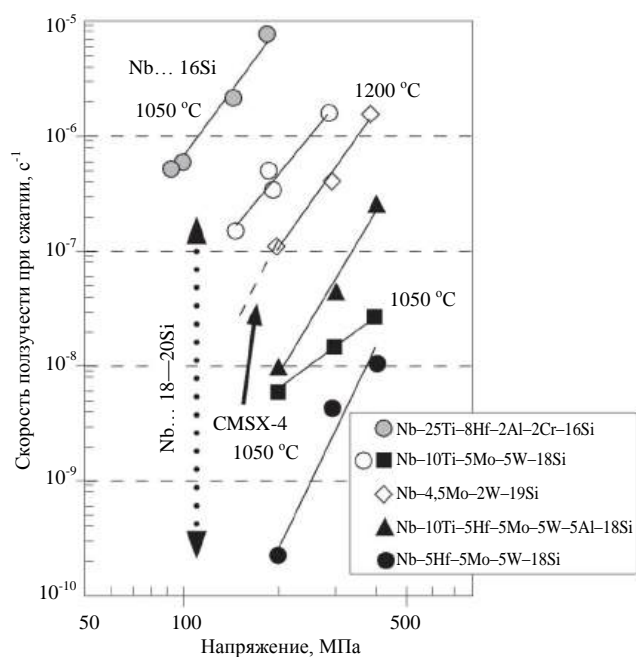


Рис. 5. Зависимость скорости ползучести при сжатии КМ/сплавов на основе Nb–Si и жаропрочного никелевого сплава CMSX-4 от приложенного напряжения [4]

Авторы работы [31] рассматривают возможность изготовления *in-situ* КМ системы Nb/Nb₅Si₃, упрочненных многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ, или MWCNT — Multiwalled Carbon Nanotubes) и спеченных искровым плазменным спеканием. Установлено, что наличие 2 масс. % добавки МУНТ в состав КМ способствует формированию новой фазы Nb₄C₃. Установлено, что при содержании 2 масс. % МУНТ в материале относительная плотность, твердость по

Виккерсу, ударная вязкость достигают максимального значения и увеличиваются на ~1,4 и ~18 % соответственно по сравнению с КМ без МУНТ. Однако при увеличении содержания МУНТ плотность и твердость по Виккерсу снижаются. Тем не менее ударная вязкость КМ Nb/Nb₅Si₃ с 3 масс. % МУНТ достигает максимального значения и повышается на ~68 % по сравнению с материалами без МУНТ. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) фрактографического излома позволила выявить хрупкое разрушение и частичное межкристаллитное разрушение КМ. Механизм упрочнения КМ обусловлен в основном смещением и поперечным перекрытием МУНТ.

Сопротивление окислению композиционных материалов/сплавов на основе ниобия

Поскольку ниобий не обладает способностью образовывать защитные оксидные пленки на поверхности, материалы на его основе очень сильно окисляются по объему при температурах свыше 500 °C. Растворимость кислорода в ниобии увеличивается с возрастанием температуры от 0,25 масс. % при 500 °C до 0,72 масс. % при 1915 °C [32—35]. Увеличение молярного объема Nb₂O₅ (58,3 см³) в сравнении с ниобием (10,9 см³) по мере его окисления вызывает большие двухосные напряжения на границе раздела ниобий–оксид, что приводит к разрыву оксидной пленки [36]. Кроме того, в интервале температур 600—900 °C двухкомпонентные сплавы/КМ системы Nb–Si подвержены "пестинг" (pest)-коррозии ("чумная" коррозия), характеризующейся быстрым распадом материала вследствие его окисления по границам зерен и сопровождающейся самоизмельчением материала в порошок. Восприимчивость сплавов системы Nb–Si к "пестинг"-коррозии связана с несоответствиями коэффициентов теплового линейного расширения (КТР) продуктов окисления с объемным расширением, что приводит к остаточному напряжению сжатия внутри оксидного слоя и его растрескиванию.

Таким образом, двухкомпонентные сплавы или КМ системы Nb–Si не способны выдерживать испытания на воздухе при высоких температурах. Проведенные многочисленные исследования направлены на повышение жаростойкости таких сплавов легированием и/или на разработку эффективных защитных покрытий для них. Для обоих режимов окисления (при 800 и 1100 °C) разработаны защитные покрытия [1–6, 15, 37].

Для повышения жаростойкости КМ/эвтектических сплавов системы Nb–Si рекомендовано введение в сплав легирующих элементов IV, V групп периодической таблицы. Для повышения сопро-

тивления окислению эффективно легирование элементами сплавов Al, Cr, Ti, Hf и Sn (особенно в случае "пестинг"-коррозии), Ge и В в качестве добавки к твердому раствору (для снижения как степени растворения кислорода и его диффузии в Nb, так и захватывания примесей кислорода) или для образования устойчивых к окислению фаз, таких, как фазы Лавеса по типу $NbCr_2$. В работах [38, 39] приведены данные о положительном влиянии на жаростойкость таких элементов, как Fe, Zr, Mg. Устойчивость сплавов к окислению может быть повышена за счет введения РЗЭ и лантаноидов (III группа периодической системы), стабилизирующих межфазные границы и структурные составляющие интерметаллидных сплавов за счет образования термодинамически устойчивых соединений с основными компонентами сплава, примесями и легирующими элементами. Жаростойкость эвтектического сплава Nb–Si повышается за счет введения легирующих добавок Sc и Y (до 1 масс. %). В то же время при повышении содержания РЗЭ стойкость сплавов к окислению снижается [36, 40].

Влияние микроструктуры на сопротивление окислению при высоких температурах редко рас-

сматривается в литературе. Тем не менее в работе [2] кратко упоминается положительный эффект, оказываемый на жаростойкость при снижении объемного содержания крупной фракции материала. Отмечено, что при использовании экструдированных порошков сплавов с более мелкозеренной микроструктурой повышается сопротивление окислению в интервалах температур 800—1200 °С в сравнении с литыми сплавами и сплавами, подверженными термической обработке [41].

В работах по проекту ULTMAT описаны лабораторные испытания образцов с покрытиями, наносимыми методом пакетной цементации, на воздухе [6] в условиях циклирования в интервале 700—1300 °С. Также проведены испытания на коррозионную стойкость в атмосфере продуктов сгорания и в солевом расплаве [4] при изотермических условиях. Покрытия состава Ti–Fe–Cr–Si–B обеспечивают очень высокие защитные свойства в обоих режимах окисления (рис. 6). Они рекомендованы для формирования сплошного слоя боросиликатного стекла приемлемой вязкости, что резко снижает проникновение кислорода в Nb–Si-сплав и способствует "залечиванию" трещин, возникающих в процессе термоциклирования [3].

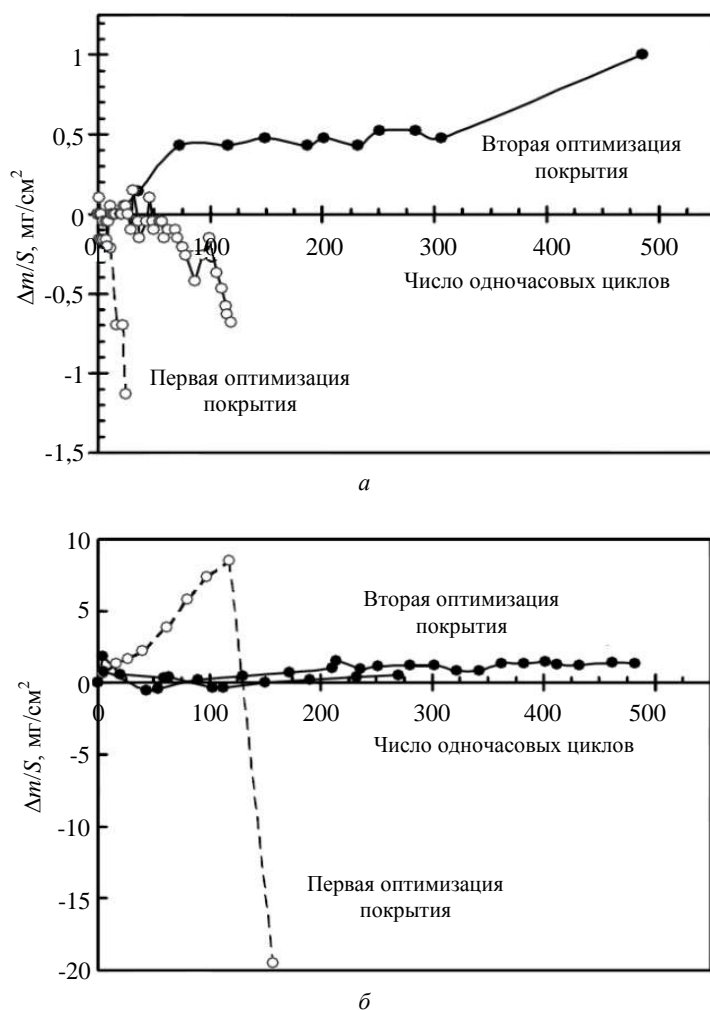


Рис. 6. Зависимость изменения массы образцов сплава на основе NbHfTiSi с покрытием от температуры во время испытания на коррозионную стойкость: а — при 815 °С; б — при 1100 °С [3]

Заключение

Рассмотрены способы изготовления высоко-температурных КМ на основе ниобия, в том числе и его систем, методами порошковой металлургии. Использование порошковой металлургии в сравнении с обычными литейными технологиями обеспечивает ряд преимуществ: дает возможность контролировать микроструктурные особенности сплавов на основе Nb и осуществлять процесс спекания КМ при более низкой температуре по сравнению с высокими температурами плавления Nb и таких легирующих элементов, как Mo, W и другие; позволяет комбинировать металлы и неметаллы с различными интерметаллидами и другими соединениями, такими, как карбиды, силициды, нитриды, бориды, алюминиды, фосфиды, углеродные нанотрубки и т. д. Литые материалы в отличие от спеченных дают меньшую экономическую выгоду, так как имеют более крупные зерна, менее однородный химический состав по отливкам вследствие сегрегации легирующих элементов и коагуляции включений, но не позволяют изготавливать заготовки деталей с близкими к заданным чистовым размерам. Приведены результаты исследований влияния легирующих элементов на фазовый состав и фазовую стабильность, микроструктуру, механические свойства и жаростойкость сплавов на основе силицидов ниобия. Рассмотрена проблема окислительной устойчивости КМ на ниобиевой основе.

Показаны пути повышения их сопротивления окислению за счет использования легирующих элементов Al, Cr, Ti, Sn, Hf и других лантанидов (особенно в случае "пестинг"-коррозии), Ge и В в качестве добавок к твердому раствору ниобия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bewlay B. P., Jackson M. R., Zhao J. C., Subramanian P. R., Mendiratta M. G., Lewandowski J. J. Ultrahigh-Temperature Nb-Silicide-based composites // *MRS Bull.* 2003. V. 28. № 9. P. 646—653.
2. Bewlay B. P., Jackson M. R., Gigliotti M. F. X. Niobium silicide high temperature in situ composites // *Intermetallic Compounds. Principles and Practice*. 2002. V. 3. J. Wiley & Sons. P. 541—560.
3. Drawin S. Ultmat Final Activity Report. 2008. P. 1—17. [Электронный ресурс]. URL: www.ultmat.onera.fr (дата обращения: 23.08.2018).
4. Drawin S., Heilmaier M., Jéhanno P., Hu D., Belaygue P., Tsakiroopoulos P., Vilasi M. Creep and oxidation resistance of refractory silicide based materials: 17th Plansee Seminar, International Conference on High Performance PM Materials. PLANSEE Group, Reutte, Austria, 2009. V. 4. P. 33-1—33-10.
5. Li Z., Tsakiroopoulos P. Study of the effect of Ti and Ge in the microstructure of Nb-24Ti-18Si-5Ge in situ composite // *Intermetallics*. 2011. V. 19. № 9. P. 1291—1297.
6. Drawin S. The European ULTMAT project: Properties of new Mo- and Nb-silicide based materials // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 2009. V. 1128, paper 1128-U07-11. P. 1—6. DOI: <https://doi.org/10.1557/PROC-1128-U07-11>.
7. Beibei Wan, Huarui Zhang, Ming Gao, Peng Bai, Hu Zhang. High-temperature wettability and interactions between Hf-containing NbSi-based alloys and Y₂O₃ ceramics with various microstructures // *Materials and Design*. 2018. V. 138. P. 103—110.
8. Nekkanti R. M., Dimiduk D. M. Ductile-phase toughening in niobium-niobium silicide powder processed composites // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1990. V. 194. P. 175—182.
9. Ma C. L., Kasama A., Tanaka H., Tan Y., Mishima Y., Hanada S. Microstructures and mechanical properties of Nb/Nb-silicide in-situ composites synthesized by reactive hot pressing of ball milled powders // *Mater. Trans. JIM*. 2000. V. 41. № 3. P. 444—451.
10. Yu J. L., Zhang K. F., Wang G. F. Superplasticity of multiphase fine-grained Nb-16Si-2Fe refractory alloy // *Intermetallics*. 2008. V. 16. № 10. P. 1167—1170.
11. Seemüller C., Hartwig T., Mulser M., Adkins N., Wickins M., Heilmaier M. Influence of powder metallurgical processing routes on phase formations in a multicomponent NbSi-alloy // *JOM: J. Miner. Met. Mater.* 2014. V. 66. № 9. P. 1900—1907.
12. Seemüller C., Heilmaier M. Grain boundary sliding-induced creep of powder metallurgically produced Nb-20Si-23Ti-6Al-3Cr-4Hf // *Materials Transactions*. 2018. V. 59. № 4. P. 538—545.
13. Jéhanno P., Heilmaier M., Kestler H., Boning M., Venskutonis A., Bewlay B., Jackson M. Assessment of a powder metallurgical processing route for refractory metal silicide alloys // *Metall. Mater. Trans. A*. 2005. V. 36A. P. 515—523.
14. Drawin S., Monchoux J. P., Raviart J. L., Couret A. Microstructural properties of Nb-Si based alloys manufactured by powder metallurgy // *Adv. Mater. Res.* 2011. V. 278. P. 533—538.
15. Drawin S., Justin J. F. Advanced lightweight silicide and nitride based materials for turbo-engine applications // *J. Aerospace Lab.* 2011. № 3. P. 1—13. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01183642>
16. Didem Ovali, Duygu Ağaoğullari, Lütfi Öveçoğlu M. Mechanochemical synthesis and characterisation of niobium silicide nanoparticles // *Ceramics International*. 2019. V. 45. № 8. P. 10654—10663.
17. Гращенков Д. В., Щетанов Б. В., Ефимочкин И. Ю., Севостьянов Н. В. Композиционные материалы на основе тугоплавких металлов // *Конструкции из композиционных материалов*. 2016. № 4(144). С. 16—22.
18. Ефимочкин И. Ю., Щетанов Б. В., Паэгле С. В., Дворецков Р. М. Исследование особенностей механического легирования при синтезе in-situ композитов на основе тугоплавких металлов // *Тр. ВИАМ*. 2018. № 4(64). С. 38—50. <http://www.viam-works.ru> DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-38-50.
19. Светлов И. Л., Абузин Ю. А., Бабич Б. Н., Власенко С. Я., Ефимочкин И. Ю., Тимофеева О. Б. Высокотемпературные ниобиевые композиты, упрочненные силицидами ниобия // *Журнал функциональных материалов*. 2007. Т. 1. № 2. С. 48—53.
20. Щетанов Б. В., Дмитриева В. В., Дворецков Р. М., Ефимочкин И. Ю. Влияние барьерных покрытий монокристаллических волокон α-Al₂O₃ на межфазные связи и прочность композиционных материалов на основе Nb-Si-эвтектики // *Конструкции из композиционных материалов*. 2020. № 1(157). С. 48—57.
21. Ефимочкин И. Ю., Кузьмина Н. А., Гращенков Д. В., Светлов И. Л., Бобровский А. П. Синтез силицида ниобия методом гибридного электроискрового плазменного спекания порошков // *Тр. ВИАМ*. 2018. № 11(71). С. 54—63. <http://www.viam-works.ru>

www.viam-works.ru (дата обращения: 12.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-54-63.

22. Лощинин Ю. В., Дмитриева В. В., Пахомкин С. И., Размахов М. Г. Теплофизические свойства компактированных композитов системы Nb–Si в диапазоне температур от 20 до 1400 °C // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2(47). С. 41—49. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-41-49.

23. Мурашева В. В., Лощинин Ю. В., Щеглова Т. М., Пахомкин С. И., Размахов М. Г., Карачевцев Ф. Н., Ефимочкин И. Ю., Щетанов Б. В., Бурковская Н. П., Севостьянов Н. В. Исследование влияния состава тугоплавких систем на основе ниобия на микроструктуру и теплофизические свойства // Материаловедение. 2015. № 9. С. 7—14.

24. Каблов Е. Н., Светлов И. Л., Ефимочкин И. Ю. Высокотемпературные Nb–Si-композиты // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2011. № S2. С. 164—173.

25. Yu J. L., Zhang K. F., Li Z. K., Zheng X., Wang G. F., Bai R. Fracture toughness of a hot-extruded multiphase Nb–Si–4Fe in situ composite // Scr. Mater. 2009. V. 61. № 6. P. 620—623.

26. CORDIS [Электронный ресурс]. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/266214> (<http://hysop.onera.fr/>) (дата обращения: 23.08.2018).

27. Seemüller H. Ch. M. Evaluation of Powder Metallurgical Processing Routes for Multi-Component Niobium Silicide-Based High-Temperature Alloys // Materials Science. 2016. P. 1—155. DOI: 10.5445/IR/1000054464.

28. Dicks R., Wang F., Wu X. The manufacture of a niobium/niobium-silicide-based alloy using direct laser fabrication // J. Mater. Process. Technol. 2009. V. 209. № 4. P. 1752—1757.

29. Yueling Guo, Lina Jia, Bin Kong, Fengxiang Zhang, Jinhui Liu, Hu Zhang. Improvement in the oxidation resistance of Nb–Si based alloy by selective laser melting // Corrosion Science. 2017. V. 127. P. 260—269.

30. Kim J. H., Tabaru T., Hirai H., Kitahara A., Hana-da S. Tensile properties of a refractory metal base in situ compo-

site consisting of an Nb solid solution and hexagonal Nb₅Si₃ // Scr. Mater. 2003. V. 48. № 10. P. 1439—1444.

31. Long W., Zeng X., Jia H. Microstructure and properties of Nb/Nb₅Si₃ composites strengthened with multiwalled carbon nanotubes by SPS // Trans Indian Inst Met. 2019. V. 72. № 4. P. 983—991. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-01559-y>

32. Захарова Г. В., Попов А. И., Жорова А. П., Федин Б. В. Ниобий и его сплавы. — М.: Металлургиздат, 1961. — 380 с.

33. Славинский М. П. Физико-химические свойства элементов. — М.: Металлургиздат, 1952. — 764 с.

34. Самсонов Г. В., Константинов В. И. Тантал и ниобий. — М.: Металлургиздат, 1959. — 264 с.

35. Гетцель К. Получение, свойства и применение ниобия и тантала: Ниобий и тантал: сб. переводов статей из иностр. периодич. литературы / под ред. канд. техн. наук Колчина О. П. — М.: Изд-во иностр. лит., 1954. Т. 1. — 168 с.

36. Уполовникова А. Г., Гуляева Р. И., Леонтьев Л. И., Чумарев В. М., Жидовинова С. В. Влияние легирования на окисление эвтектического сплава Nb–Si // Приволжский научный вестник. 2014. Т. 40. № 12–1. С. 55—58.

37. Zamoum F. New niobium- and molybdenum-based materials for aeronautics: phase relationships and oxidation. synthesis of new coatings. Thèse de doctorat, Université Nancy I, 2008.

38. Светлов И. Л. Высокотемпературные Nb–Si композиты // Материаловедение. 2010. № 9. С. 29—38.

39. Светлов И. Л. Высокотемпературные Nb–Si композиты // Материаловедение. 2010. № 10. С. 18—27.

40. Чумарев В. М., Удоева Л. Ю., Леонтьев Л. И., Ларионов А. В. Исследование высокотемпературного окисления *in-situ* композитов Nb–18,7Si, легированных иттрием и скандием // Бутлеровские сообщения. 2015. Т. 43. № 9. С. 121—127.

41. Menon E. S. K., Mendiratta M. G. Effect of powder processing on high temperature oxidation of a Nb-base alloy: Proc. 16th International Plansee Seminar, PLANSEE Holding AG, Reutte, Austria, 2005. P. 857—868.

High-temperature composite materials based on niobium obtained by the powder metallurgy method: properties, application (Part II) (Review)

N. P. BURKOVSKAYA, V. V. DMITRIEVA, B. V. SHCHETANOV,
N. V. SEVOSTYANOV

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM), Moscow, Russia

In the second part of the review article, methods of manufacturing high-temperature composite materials based on niobium are presented. Compared with traditional casting technologies, methods of making niobium materials from powders have become more common. The influence of alloying on the mechanical properties of high-temperature niobium composite materials obtained by casting, in particular, fracture toughness, which is an important characteristic for assessing the practical suitability of the materials being developed, in particular low-plastic materials, is presented. The problem of heat resistance of niobium-based materials is considered. Since niobium itself does not have the ability to form protective oxide films on the surface, and materials based on it are extremely strongly oxidized at temperatures above 500 °C, it becomes necessary to increase their resistance to oxidation or develop protective coatings. The ways of increasing the resistance to oxidation due to the use of alloying elements Al, Cr, Ti, Hf, and Sn, Ge and B, as additives to the solid solution of niobium are shown. Thermal protective coatings for niobium-based materials are described. The research results presented in the review allow developers of high-temperature composite materials based on niobium to give a general idea of the current scientific research in this direction.

Keywords: niobium, niobium based composite materials, niobium-silicide based *in-situ* composites, alloying of solid solution, spark plasma sintering (SPS), dispersion hardening, heat resistance, powder metallurgy, additive technologies.

УДК 546.26-162

Гексагональная алмазная фаза в детонационных нано- и микроалмазах

Н. В. ШЕВЧЕНКО

АО «Петровский научный центр «ФУГАС», Москва, Россия

¹Р. Н. РИЗАХАНОВ, канд. физ.-мат. наук; ¹С. К. СИГАЛАЕВ, канд. физ.-мат. наук;^{1, 2}Е. А. ВЫСОТИНА¹ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва, Россия²НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

В. П. ЕФРЕМОВ, канд. физ.-мат. наук; Л. Р. ОБРУЧКОВА, канд. физ.-мат. наук

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Исследованы свойства и фазовый состав нано- и микрокристаллов алмаза детонационного синтеза в целях выявления гексагональной фазы sp^3 -углерода в изучаемых структурах. Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что микроалмазные частицы имеют в своем составе чередующиеся включения гексагонального sp^3 -углерода, проявляющегося на краевых изломах и гранях микроалмазов. Регистрация спектров комбинационного рассеяния света (КРС) микроалмазов в видимой области показала сложный фазовый состав данных микроструктур и присутствие в них гексагонального лонсдейлита и наночастиц с кубической углеродной структурой. Все использованные марки образцов детонационных наноалмазов от разных производителей имели в своем составе гексагональный sp^3 -углерод, регистрируемый на спектрах КРС при возбуждении в ультрафиолетовой области. Выявленные в исследованных образцах проявления гексагонального sp^3 -углерода служат, по-видимому, свидетельством присутствия включений лонсдейлита в нано- и микроалмазах детонационного синтеза.

Ключевые слова: детонационный синтез, детонационные наноалмазы и микроалмазы, кубический и гексагональный углерод, фазовый состав, электронная микроскопия, комбинационное рассеяние света.

Комплексные исследования процессов детонационного синтеза при использовании смесевых взрывчатых веществ установили наличие целого ряда аллотропных модификаций углерода в составе получаемых продуктов [1—3]. Наибольший интерес представляют нано- и микроалмазы, имеющие кубическую структуру кристаллитов, а также графит, обладающий гексагональной решеткой.

Нано- и микрогабаритные детонационные алмазы являются одними из интенсивно исследуемых современных материалов, обладающих уникальными физическими и механическими свойствами,

обеспечивающими создание новых композиционных структур с управляемыми функциональными возможностями. Существует вероятность присутствия в составе частиц гексагонального поли типа алмаза — лонсдейлита, выявленного в импактных и синтетических алмаз-лонсдейлитных образованиях, проявление которого часто регистрируется в виде дефектов упаковки кристаллической структуры [4—6]. Данная углеродная форма может быть эффективно исследована с применением спектроскопии КРС, позволяющей измерять колебательные взаимодействия атомов в углеродной структуре, идентифицировать и эффективно оценивать фазовый состав [7—9].

Выбор метода исследования с применением спектроскопии КРС обусловлен еще и тем, что при возбуждении в видимой области света он более чувствителен к появляющимся гексагональным sp^2 -формам, чем к кубическому sp^3 -углероду, что обеспечивает эффективное наблюдение за изучаемой структурой. Дополнительная привлекательность применения данного метода исследования вызвана возможностью использования ультрафиолетовой области возбуждения КРС, что повышает чувствительность метода к кубической структуре углерода с sp^3 -гибридизацией связей по сравнению с гексагональной (sp^2) и исключает неспецифическое влияние на КРС люминесценции исследуемого объекта.

Шевченко Николай Владимирович, главный специалист.

E-mail: shevchenkonvnan@ mail.ru

Ризаханов Ражудин Насрединович, начальник отдела.

E-mail: nanocentre@ kerc.msk.ru

Сигалаев Сергей Константинович, ведущий научный сотрудник.

E-mail: nanocentre@ kerc.msk.ru

Высотина Елена Александровна, научный сотрудник, аспирант.

E-mail: evysotina@ gmail.com

Ефремов Владимир Петрович, начальник отдела.

E-mail: v.p.efremov@ yandex.ru

Обручкова Лилия Римовна, ведущий инженер.

E-mail: obruchkoa.liliya@ mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2020 г.

© Шевченко Н. В., Ризаханов Р. Н., Сигалаев С. К.,
Высотина Е. А., Ефремов В. П., Обручкова Л. Р., 2021

Авторами исследованы химически очищенные образцы детонационных нано- и микроалмазов. Цель работы — изучение фазового состава и выявление гексагональной составляющей sp^3 -углерода — лонсдейлита, а также регистрация возможных проявлений присутствия данной структуры.

Экспериментальная часть

Детонационный синтез нано- и микроалмазов проводили в взрывной камере ВК-10 объемом 100 м³. В качестве взрывчатого вещества для синтеза наноалмазов использовали смесь тротил–гексоген в пропорции 50/50, а для детонационного синтеза микроалмазов — тротил, погруженный в водную среду [1, 10]. Полученную детонационную шихту использовали для последующей химической очистки при выделении нано- и микроалмазов.

Химическую очистку образцов проводили методом баротермического окисления [3]. Сущность метода заключается в селективном окислении под действием азотной кислоты неалмазных форм углерода до газообразных оксидов. Реакция протекает с достаточной скоростью и полнотой при температуре не менее 280 °С и давлении 8—10 МПа. Одновременно растворяются практически все примеси в шихте: частицы металлов, оксидов, большинство карбидов. Используемые параметры процесса (температура, давление, скорость реакционной массы) обеспечивают высокое и стабильное качество получаемых нано- и микроалмазных частиц.

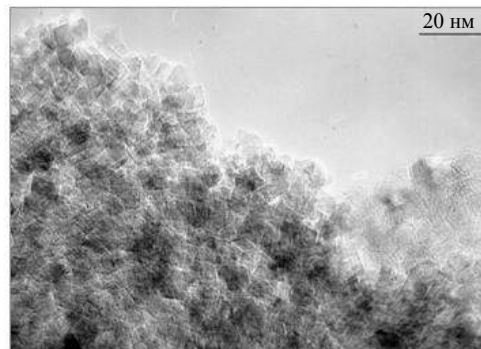
Характеристические особенности и свойства полученных микропорошков исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и спектроскопии КРС. Образцы микроразмерных углеродных частиц (0,2—5 мкм) дополнительно исследовали при нагреве в диапазоне температур 20—1500 °С в атмосфере инертного газа.

Регистрацию комбинационного рассеяния света с возбуждением при 244 и 514 нм проводили на спектрометре КРС Horiba T64000 (Horiba Jobin Yvon, Франция) под управлением программного пакета NGS Lab, который позволяет проводить все необходимые измерения и обработку полученных результатов. Электронные микрофотографии микропорошка были получены на электронном микроскопе JEOL JSM-7600F (JEOL Ltd., Япония) с приставкой для определения примесей [11].

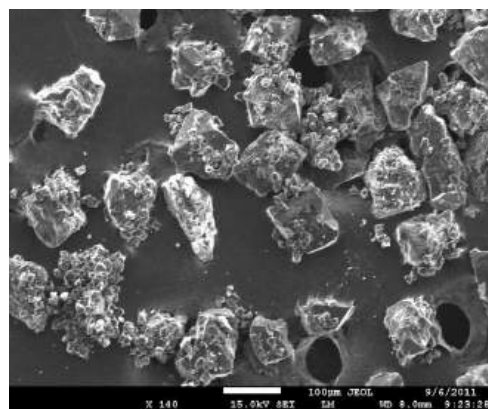
Обсуждение результатов

Проведенные работы по детонационному синтезу углеродной шихты с последующей ее химической очисткой подтвердили эффективное обра-

зование нано- и микродисперсных углеродных частиц (рис. 1). Полученные образцы по своим характеристикам и свойствам соответствовали стандартным показателям для данных образований [1, 3, 12] и были использованы в ходе детальных исследований в дальнейшем.



а



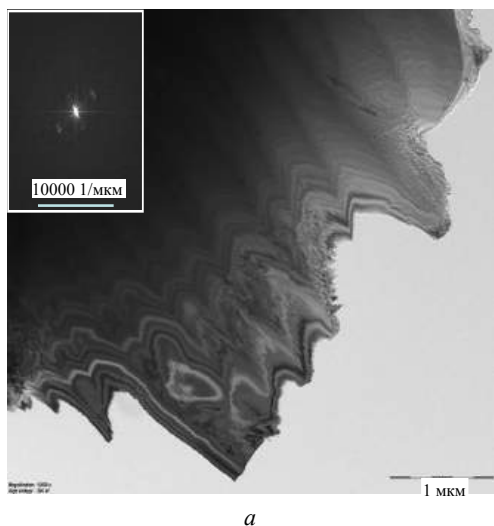
б

Рис. 1. Электронные микрофотографии детонационных нано- (а) и микроалмазов (б)

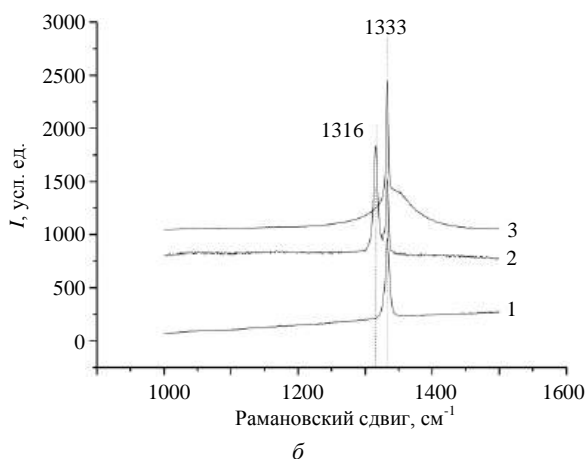
Электронно-микроскопические исследования детонационных микроалмазов при высоком разрешении (рис. 2, а) выявили присутствие в образце микроалмаза слоистой алмаз-лонсдейлитной структуры, представленной главным образом кубическим sp^3 -алмазом с чередующимися включениями гексагонального sp^3 -лонсдейлита. Особенно отчетливо данное образование с чередующимися слоями и различной фазовой плотностью проявляется на краевых участках граней микрокристаллов. Полученный эффект подтверждается дифракцией электронов, регистрируемой при электронно-микроскопических исследованиях (рис. 2, а).

Присутствие в образце микроалмаза слоистой алмаз-лонсдейлитной структуры, выявленное в микроалмазах, не проявляется в образцах детонационных наноалмазов при электронно-микроскопических исследованиях с аналогичным разрешением, что связано, возможно, с индивидуальными размерами частиц.

Регистрация спектров КРС микроалмазных образцов при возбуждении видимым светом с длиной волны 514 нм выявила наличие сложного максимума при 1333 см^{-1} (рис. 2, б, кривая 1). На образце, нагретом до 1200 °C , он распадается на два экстремума, один из которых регистрируется при 1316 см^{-1} (рис. 2, б, кривая 2). Данное проявление, характеризующееся смещением спектра КРС, связано, возможно, с присутствием одновременно двух дополнительных углеродных фаз: наноалмаза и лонсдейлита. При росте температуры нагрева до 1500 °C происходит исчезновение максимума при 1316 см^{-1} , что связано, вероятно, с графитизацией наноалмаза. Дальнейшее повышение температуры сопровождается значительным проявлением экстремума при 1350 см^{-1} (рис. 2, б, кривая 3), что, возможно, свидетельствует о присутствии активной моды лонсдейлита [5], а также накоплением продуктов графитизации алмаза.



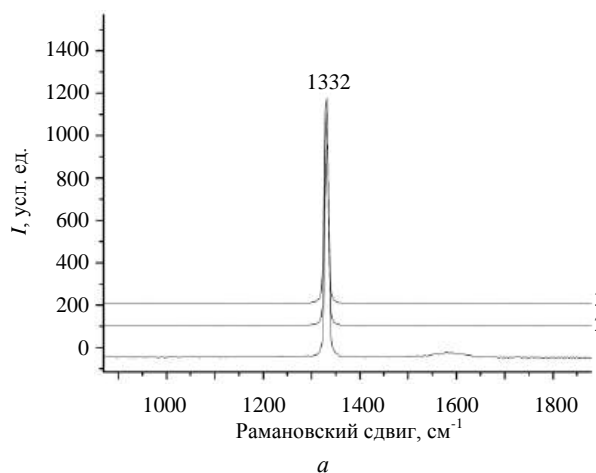
а



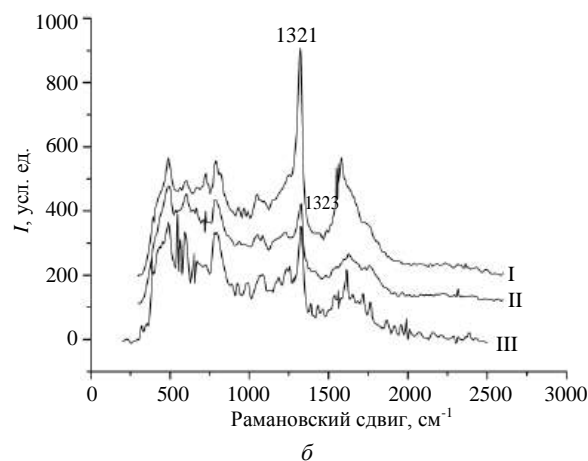
б

Рис. 2. Электронная микрофотография слоистой алмаз-лонсдейлитной структуры со вставкой по дифракции электронов участка образца с включениями лонсдейлита (а) и спектры КРС ($\lambda_{\text{ex}} = 514\text{ нм}$) микроалмазов при различных режимах нагрева образцов в аргоновой среде (б):
1 — температура внешней среды; 2 — до 1200 °C ; 3 — до 1500 °C

Исследование спектральных характеристик КРС микроалмазов с возбуждением в ультрафиолетовой (УФЛ) области не выявило присутствие лонсдейлита в образцах (рис. 3, а).



а



б

Рис. 3. Спектры КРС ($\lambda_{\text{ex}} = 224\text{ нм}$) микроалмазов при различных режимах нагрева образцов в аргоновой среде (а) и спектры КРС наноалмазов, полученные различными производителями (б):

1 — температура внешней среды; 2 — до 1200 °C ; 3 — до 1500 °C ; I — АО "Петровский НЦ "ФУГАС", Россия; II — АО "Алтай", Россия; III — НП ЗАО "Синта", Республика Беларусь

Действие температурного фактора также не способствовало проявлению в спектрах КРС свойств данной аллотропной формы углерода. Вероятной причиной полученного результата является высокая интенсивность максимума при 1332 см^{-1} на спектре КРС микроалмаза, снятом при возбуждении ультрафиолетовым светом, превосходящая в несколько раз соответствующее значение для лонсдейлита [13]. Данные свойства аллотропных форм углерода, связанные с соотношением интенсивностей линий КРС, указывают на очень низкое содержание лонсдейлита, что проявляется в его минимальном влиянии на форму и величину интенсивности регистрируемого спектра КРС микроалмазов.

Исследования спектров КРС, снятых при возбуждении УФЛ образцов детонационных наноалмазов от различных производителей, использующих различные технологии химической очистки, показали, что основной пик на спектрах КРС наночастиц с различной степенью очистки проявляется в области $1321\text{--}1323\text{ см}^{-1}$ (рис. 3, б) со значительным смещением от значений частот, свойственных алмазному углероду, и соответствует показателям, характерным присутствию лонсдейлита в составе включений в наноалмаз [4]. Значимый по интенсивности экстремум в области 550 см^{-1} также может быть отнесен к оптической моде лонсдейлита, характеризующей присутствие на поверхности наноалмазных частиц включений, содержащих в своем составе гексагональный sp^3 -углерод [9].

Совокупность полученных результатов указывает на возможное наличие в образцах детонационных нано- и микроалмазов микровключений гексагональной фазы, характерных для лонсдейлита.

Заключение

Установлены проявления и отличительные особенности гексагональной sp^3 -фазы лонсдейлита в составе детонационных нано- и микроалмазов, имеющих отличающуюся структурную организацию. Электронно-микроскопические исследования показали, что микроалмазные частицы имеют чередующиеся включения гексагонального sp^3 -углерода, особенно заметно проявляющиеся на краевых изломах и микрограницах данных структур. Аналогичные исследования, проведенные с наноалмазами, не выявили присутствия в их составе структур лонсдейлита, что, возможно, связано с особенностями и индивидуальными размерами данных частиц. Регистрация спектров КРС микроалмазов в видимой области показала сложный фазовый состав микроструктур, который изменяется при температурном воздействии, проявляя присутствие в составе гексагонального лонсдейлита и наночастиц с кубической углеродной структурой. При дальнейшем увеличении температурного воздействия на данные образования наблюдается проявление активной моды лонсдейлита при 1350 см^{-1} и, возможно, графитовой фазы. Все образцы детонационных наноалмазов, полученные с использованием различных технологий химической очистки, имели в своем составе гексагональный sp^3 -углерод, регистрируемый на спектрах КРС в области 1322 и 550 см^{-1} . Установленные проявления гексагонального sp^3 -углерода

не связаны с собственными дефектами кубической упаковки углерода и динамическими воздействиями на кристаллиты алмазных структур, а служат свидетельством присутствия включений лонсдейлита в нано- и микроалмазах детонационного синтеза.

Работа выполнена с использованием суперкомпьютерных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСП РАН).

ЛИТЕРАТУРА

1. Даниленко В. В. Взрыв: физика, техника, технология. — М.: Энергоатомиздат, 2010. — 764 с.
2. Шевченко Н. В. Перспективы промышленного получения детонационного наноуглерода: сб. тез. докл. Междунаучно-производственной конф. "Промышленная утилизация вооружения, специальной техники и боеприпасов". — М.: "ИНТЕРПОЛИТЕХ", 2012. С. 335—343.
3. Витязь П. А., Жорник В. И., Ильюшенко А. Ф., Сениуть В. Т., Комаров А. И., Корженевский А. П., Ивахник А. В. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение. — Минск: Бел. Наука, 2013. — 381 с.
4. Shumilova T., Mayer E., Isaenko S. Natural Monocrystalline Lonsdaleite // Doklady Earth Science. 2011. V. 441. P. 1552—1557.
5. Denisov V., Martin B., Serebrynjaja N., Dubinsky G., Aksenenkov V., Kiricheko A., Rumin N., Perezyogin I., Blank V. First principles, UV Raman, X-ray diffraction and TEM study of the structure and lattice dynamics of the diamond-lonsdaleite system // Diamond Related Materials. 2011. V. 20. P. 951—953.
6. Shevchenko N. V., Sigalov S. K., Visotina E. A., Kozakov V. A., Gorbachev V. A., Rizaev R. N. Hexagonal diamond is in detonation nano and microdiamonds: Book of Abstracts of 14 International Conference "Advanced Carbon Nanostructures". — St. Petersburg, 2019. P. 126.
7. Goudec G., Combau P. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2007. V. 53. № 3. P. 1—56.
8. Ferrari A. C. Raman Spectrum // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2002. V. 675. P. 51—72.
9. Shumilova T. G., Isaenko S. I., Ulyashev V. V., Kazakov V. A., Makeev B. A. After-coal diamonds: An enigmatic type of impact diamonds // European J. Mineralogy. 2018. V. 30. № 1. P. 1—16.
10. Бланк В. Д., Голубев А. А., Горбачев В. А., Дерибас А. А., Дубицкий Г. А., Серебряная Н. Р., Шевченко Н. В. Детонационный синтез микроалмазов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 55. Вып. 6. С. 37—41.
11. Шевченко Н. В., Горбачев В. А., Чобанян В. А., Сигалов С. К., Ризаев Р. Н., Голубев А. А., Кириченко А. Н., Ефремов В. П. Свойства и фазовый состав поверхности детонационных алмазов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2016. Т. 59. Вып. 8. С. 40—44.
12. Даниленко В. В. Синтез и спекание алмаза взрывом. — М.: Энергоатомиздат, 2003. — 271 с.
13. Smith D. C., Godard G. UV and VIS Raman spectra of natural lonsdaleites: Toward a recognitions standard // Spectrochimica Acta Part. 2009. № 73. P. 428—435.

Hexagonal diamond phase in detonation synthesized nano- and microdiamonds

N. V. SHEVCHENKO

"Petrovskiy Scientific Center "FUGAS", Moscow, Russia

¹ R. N. RIZAKHANOV, ¹ S. K. SIGALAEV, ^{1,2} E. A. VYSOTINA

¹ Researcher of Keldysh Research Center, Moscow, Russia

² NUST "MISIS", Moscow, Russia

V. P. EFREMOV, L. R. OBRUCHKOVA

Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia

The properties and phase composition of nano- and microcrystals of diamond of detonation synthesis were investigated in order to reveal the hexagonal phase of sp^3 -carbon in the structures under study. Electron microscopic studies have established that micro-diamond particles contain alternating inclusions of hexagonal sp^3 -carbon, which is manifested on the edge fractures and faces of micro-diamonds. The registration of microdiamond's Raman spectra in the visible region showed the complex phase composition of these microstructures established the presence in it of hexagonal lonsdaleite and nanoparticles with a cubic carbon structure. All used brands detonation nanodiamond samples from different manufacturers contained hexagonal sp^3 -carbon recorded by Raman scattering. The manifestations of hexagonal sp^3 -carbon revealed in the studied samples, apparently, serve as evidence of the presence of lonsdaleite inclusions in detonation synthesized nano- and microdiamonds.

Keywords: detonation synthesis, detonation nanodiamonds and microdiamonds, cubic and hexagonal carbon, phase composition, electron microscopy, Raman scattering.

Экспериментальное исследование возможности повышения прочности изделий из стеклопластика

О. Ю. ЕРЕНКОВ, д-р техн. наук; Е. В. ЯВОРСКАЯ

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния электрофизической обработки полимерного связующего непосредственно в пресс-форме на механические свойства стеклопластика. Приведены результаты исследований надмолекулярной структуры и теплофизических свойств полимерного связующего. Изложена физическая интерпретация полученных в работе результатов.

Ключевые слова: стеклопластик, полимерное связующее, надмолекулярная структура, наносекундные электромагнитные импульсы, электромагнитное поле, механические свойства.

Чрезвычайно важной научно-практической задачей при изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является получение материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Один из путей её решения — модификация полимерного связующего. Существует большое многообразие методов модификации эпоксидного связующего [1—3]. В работе [4] научно обосновано применение перед формованием предварительной электрофизической обработки полимерного связующего электромагнитными импульсами и волнами. Эффективность такого подхода экспериментально подтверждена результатами исследований механических свойств стеклопластика. Установлено, что применение предварительной электрофизической обработки полимерного связующего одновременным воздействием наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) и электромагнитным переменным полем (ЭМП) в течение 25 мин позволяет повысить прочностные свойства изделий из стеклопластика Этал Т 210-Т11-ГВС9 в 1,4—1,7 раза.

Цель данной работы — экспериментальное исследование возможности повышения прочности изделий из стеклопластика путем электрофизической обработки полимерного связующего непосредственно в форме (в процессе формования), т. е. без прерывания технологического процесса.

Еренков Олег Юрьевич, профессор, заведующий кафедрой "Химия и химические технологии".

E-mail: erenkov@list.ru

Яворская Елена Владимировна, старший преподаватель.

E-mail: 011316@pnu.edu.ru

Статья поступила в редакцию 6 ноября 2020 г.

© Еренков О. Ю., Яворская Е. В., 2021

Экспериментальные исследования стеклопластика

Задача экспериментального исследования — установить характер изменения механических свойств стеклопластика в зависимости от времени обработки полимерного связующего непосредственно во время технологического процесса формования изделия, а также оценить эффективность такого технического решения по сравнению с предварительной обработкой полимерного связующего.

Электрофизическую обработку полимерного связующего осуществляли в отличие от предыдущих исследований [4] непосредственно в форме для изготовления лопатки рабочего колеса центробежной компрессорной установки. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Номенклатура контролируемых свойств, способ получения образцов, исследуемые материалы, оборудование и параметры электрофизической обработки связующего поддерживались такими же, как и в работе [4].

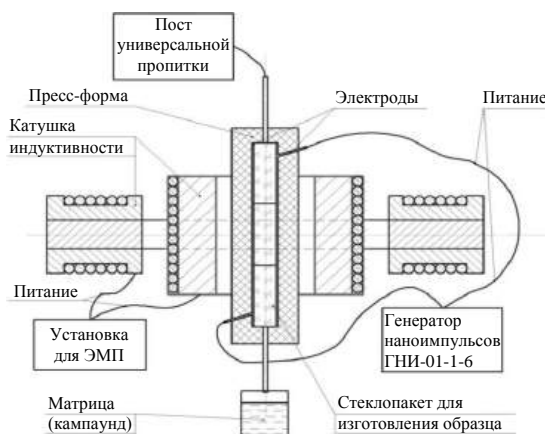


Рис. 1. Схема экспериментальной центробежной компрессорной установки

На рис. 2 представлены экспериментальные данные, позволяющие оценить взаимосвязь между видом и временем электрофизического воздействия на эпоксидное связующее Этал Т 210 и механическими характеристиками образцов из стеклопластика Этал Т 210-Т11-ГВС9.

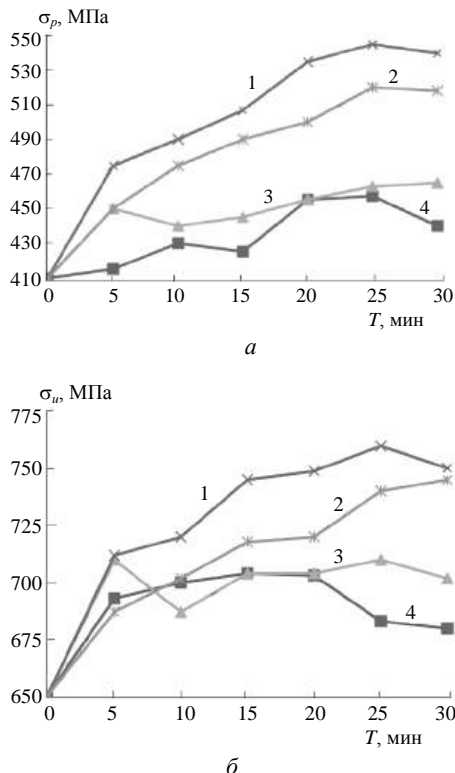


Рис. 2. Зависимость прочности при растяжении (а) и статическом изгибе (б) стеклопластика от времени обработки связующего:

- 1 — совместная обработка связующего НЭМИ и ЭМП непосредственно в форме; 2 — предварительная совместная обработка связующего НЭМИ и ЭМП перед формованием; 3 — обработка связующего НЭМИ в процессе формования; 4 — обработка связующего ЭМП в процессе формования

Анализ полученных данных позволяет заключить, что совместная обработка НЭМИ и ЭМП (кривые 1 на рис. 2) полимерного связующего непосредственно в форме позволяет повысить прочность готового стеклопластика. Об этом свидетельствуют более высокие значения механических свойств материала по сравнению с базовыми

и полученными при индивидуальных обработках НЭМИ (кривые 3 на рис. 2) и ЭМП (кривые 4 на рис. 2). Максимальные приращения значений механических характеристик стеклопластика происходят после совместной обработки полимерного связующего НЭМИ и ЭМП в течение 25 мин.

Для проведения сравнительного анализа эффективности предложенного технического решения по обработке полимерного связующего в процессе формования изделия детали на рис. 2 представлены данные (кривые 2) по влиянию совместной обработки связующего НЭМИ и ЭМП перед формованием, полученные ранее [4]. На основании сопоставления представленных данных можно сделать заключение о том, что электрофизическая обработка полимерного связующего непосредственно в форме способствует совершенствованию технологии изготовления изделий из ПКМ. Реализация такого подхода позволяет получать материал с более высокими прочностными показателями и осуществлять процесс формования деталей и изделий непрерывным образом, т. е. повысить производительность технологического процесса в целом.

Микроструктурные исследования стеклопластика

Авторами проведены микроструктурные исследования образцов отвержденного полимерного связующего в целях определения характера изменения надмолекулярной структуры полимера после электрофизической обработки полимерного связующего совместно НЭМИ и ЭМП в процессе формования. Исследования проводили с помощью растрового электронного микроскопа марки JSM-6480 (фирма JEOL, Япония).

На рис. 3, а представлены микрофотографии необработанного образца. Видно, что структура образца сферолитная, сферолиты размером от 2—6 мкм по длине и от 2,5 мкм по ширине, сколы рельефные, что свидетельствует о хрупком разрушении образцов. После электрофизической обработки связующего НЭМИ и ЭМП в течение 25 мин его надмолекулярная структура (рис. 3, б) заметно меняется.

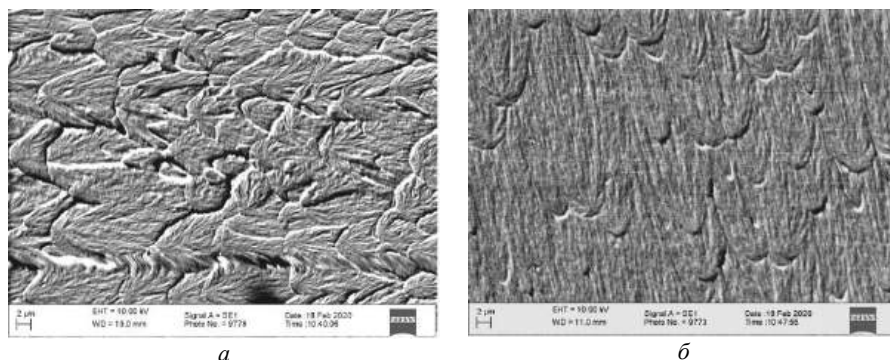


Рис. 3. Надмолекулярная структура полимерного связующего до (а) и после (б) совместной электрофизической обработки в процессе формования в течение 25 мин

В первую очередь это отражается на механизме разрушения образцов, которое происходит по пластическому механизму, т. к. сколы отличаются сглаженными границами разрушения. Во-вторых, наблюдается еще достаточно выраженная анизотропия роста надмолекулярных образований, которые представляют собой в большей степени фибриллярную структуру, чем сферолитную, несмотря на наличие центров кристаллизации по сферолитному типу.

Таким образом, электрофизическая обработка полимерного связующего, находящегося непосредственно в форме, путем совместного воздействия НЭМИ и ЭМП в процессе формования привела к переориентации сферолитных образований в фибриллярные.

Исследование теплофизических свойств стеклопластика

Авторами проведены исследования теплофизических свойств образцов отвержденного полимерного связующего в целях проверки предположения об изменении надмолекулярной структуры полимера после электрофизической обработки полимерного связующего совместно НЭМИ и ЭМП. Исследования проводили на установке Netzsch LFA-457 (ФРГ), принцип действия которой основан на методе лазерной вспышки.

При проведении измерений методом лазерной вспышки нижняя поверхность образца нагревается коротким лазерным импульсом. В результате происходит изменение температуры на верхней поверхности образца, которая регистрируется с помощью инфракрасного детектора. Чем выше температуропроводность образца, тем больше величина сигнала. Таким образом, фиксируется температуропроводность образца. Как известно [5], в неравновесных тепловых процессах температуропроводность характеризует скорость изменения (выравнивания) температуры вещества. Знание температуропроводности крайне важно, так как без него невозможно определить теплопроводность образца. Приведенные значения теплопроводности рассчитываются прибором автоматически исходя из полученных значений температуропроводности. Температуропроводность и теплопроводность являются высокочувствительными индикаторами структурных изменений твердых тел [5, 6].

В таблице приведены значения теплофизических параметров полимерного связующего в зависимости от времени его электрофизической обработки наносекундными электромагнитными импульсами совместно с электромагнитным полем в процессе формования. Анализ представленных данных позволяет сделать заключение о том, что совместная обработка полимерного связующего НЭМИ и ЭМП в течение 25 мин обеспечивает максимальные значения исследуемых теплофизических параметров связующего.

Обсуждение результатов

Эффект влияния предварительного воздействия на связующее НЭМИ и ЭМП, как индивидуального, так и совместного, объясняется следующим образом.

Согласно теории дырочной концепции жидкого состояния полимерного связующего Я. И. Френкеля [7] частицы жидкости находятся в гармоническом колебании около некоторого положения равновесия, а через некий промежуток времени τ атом может перескочить в новое положение равновесия, близкое к межатомному расстоянию.

Воздействие НЭМИ на полимерное связующее в жидкой фазе, очевидно, способно увеличить количество атомов, обладающих избыточной энергией, необходимой для совершения акта перехода частицы из одного положения равновесия в другое. Такой переход [8, 9] вызывает разрыв химических связей. Последний обычно сопровождается образованием на концах связей радикалов, обладающих высокой реакционной способностью, что является причиной последующего восстановления разорванных химических связей. Учитывая малую длительность одного импульса, составляющую 1 нс, можно предположить, что вероятности процессов разрыва связей и их восстановления будут примерно одинаковы, т. е. в одних случаях равновесие между актами разрыва связей и актами их восстановления несколько смещается в сторону преобладания актов разрыва, а в других случаях — в сторону преобладания актов восстановления. Таким образом, индивидуальное воздействие НЭМИ при установленных параметрах на эпоксидный олигомер в жидком состоянии не приводит к значительным изменениям его структуры и, соответственно, не приводит к изменению механических свойств получаемого стеклопластика.

Теплофизические параметры полимерного связующего

Контролируемый параметр	Время электрофизической обработки полимерного связующего, мин						
	0	5	10	15	20	25	30
Температуропроводность, мм ² /с	0,189	0,198	0,255	0,263	0,266	0,293	0,256
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,716	0,753	0,963	0,995	1,007	1,069	0,971

Индивидуальное воздействие ЭМП на исследуемый эпоксидный олигомер в жидком состоянии приводит к образованию в его объеме пондеромоторных сил, т. е. сил давления электромагнитных волн на помещенное в электромагнитное поле вещество. Механизмы возникновения и действия данных сил подробно исследованы и представлены в работе Ландау Л. Д. [10]. Под действием пондеромоторных сил происходит упругое деформирование основных полимерных цепей связующего, что связано с изменением межатомных расстояний и валентных углов в макромолекулах, а также с изменением межмолекулярных расстояний за счет преодоления межмолекулярных вандер-ваальсовых сил упругости.

Таким образом, должны происходить изменения формы макромолекул связующего, т. е. их конформаций. В работах [8, 9] отмечено, что конформационные превращения макромолекул не сопровождаются разрывом химических связей. Следовательно, индивидуальное воздействие ЭМП при установленных параметрах на эпоксидный олигомер в жидком состоянии не приводит к значительным изменениям его структуры и, соответственно, к изменению механических характеристик получаемого стеклопластика.

При комбинированном воздействии на связующее НЭМИ и ЭМП, по всей вероятности, одновременно имеют место описанные эффекты. Изменение конформации макромолекул с большой вероятностью позволит обеспечить интенсивное взаимодействие образующихся во время обработки связующего НЭМИ активных радикалов и концевых групп друг с другом, что приведет к формированию поперечных химических связей между макромолекулами. Это должно привести к образованию, возможно частичному, пространственной надмолекулярной структуры полимерного связующего на данной стадии производства стеклопластика. Возможность протекания реакции сшивания в полимерах до проведения технологической операции отверждения установлена [7]. При последующем отверждении связующего происходит окончательное формирование пространственной структуры полимерного связующего. Структура обладает более высокой степенью однородности по сравнению с исходной (см. рис. 3, а) за счет формирования из макромолекул ориентированных морфологических образований. Её образование приводит к повышению теплопроводности полимера [5, 6] и комплекса физико-механических свойств конечного продукта — стеклопластика, что и подтверждено результатами экспериментальных исследований.

Заключение

Экспериментальным путем доказано, что электрофизическая обработка полимерного связующего непосредственно в процессе формования путем совместного действия наносекундными электромагнитными импульсами и электромагнитным переменным полем способствует совершенствованию технологии производства изделий из ПКМ. Реализация такого подхода позволяет получать материал с более высокими (до 15 %) прочностными свойствами по сравнению с вариантом обработки связующего до формования и осуществлять процесс формования деталей и изделий непрерывно, т. е. повысить производительность технологического процесса в целом.

Методом растровой электронной микроскопии установлена трансформация надмолекулярной структуры полимерного связующего от сферолитной к фибриллярной после его совместной обработки наносекундными электромагнитными импульсами и электромагнитным полем в процессе формования. Трансформация надмолекулярной структуры полимерного связующего приводит к образованию пространственной структуры, что способствует повышению ряда теплофизических и физико-механических свойств стеклопластика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулезнев В. Н., Шершнев В. А. Химия и физика полимеров. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Колос, 2007. — 367 с.
2. Зеленов Ю. В., Хромов В. И. Прогнозирование изменения физических свойств полимерных материалов при разных способах их модификации // Пластические массы. 2002. № 11. С. 11—13.
3. Кестельман В. Н., Стадник А. Д. Терромагнитная обработка полимерных композиционных материалов. — М.: НИИ ТЭХИМ, 1989. — 178 с.
4. Еренков О. Ю., Ягубов Э. З. Исследование механических свойств стеклопластика в зависимости от продолжительности электрофизического воздействия на связующее // Конструкции из композиционных материалов. 2011. № 2. С. 76—81.
5. Новиченок Л. Н., Шульман З. П. Теплофизические свойства полимеров. — Минск: Наука и техника, 1971. — 120 с.
6. Айбиндер С. Б., Андреева Н. Г. Влияние наполнителей на теплофизические, механические и антифрикционные свойства полимеров // Изв. АН Лат. ССР. Сер. "Физ. и техн. наук". 1983. № 5. С. 3—18.
7. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. — Л.: Наука, 1975.
8. Аскадский А. А. Деформация полимеров — М.: Химия, 1973. — 448 с.
9. Тагер А. А. Физикохимия полимеров — М.: Химия, 1978. — 544 с.
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. — М.: Физматгиз, 1959. — 532 с.

Experimental study of the possibility of increased strength fiberglass products

O. Yu. ERENKOV, E. V. YAVORSKAYA

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

The results of experimental studies of effect of electro physical processing of a polymer binder directly in a mold on the mechanical characteristics of glass fiber reinforced plastic are presented. The results of structural studies and their physical interpretation are presented.

Keywords: glass fiber reinforced plastic, polymer binder, supramolecular structure, nanosecond electromagnetic pulses, electromagnetic field, mechanical properties.

УДК 537.226, 539.4

Исследование диэлектрических и прочностных свойств композиционных материалов на основе стеклянных и кварцевых волокон и эпоксидных смол

А. Н. БАРЫШЕВ, канд. техн. наук; Л. П. ТАИРОВА, канд. техн. наук;

О. В. ЛЕБЕДЕВА, канд. техн. наук

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

В. А. ДЬЯКОНОВ, канд. техн. наук

АО «Композит», г. Королев, Московская обл., Россия

Приведены результаты экспериментального исследования диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь композиционных материалов на основе кварцевых и стеклянных волокон и двух типов эпоксидных связующих. Определена прочность при растяжении вдоль волокон по результатам испытания образцов микропластика. Проведено сравнение результатов экспериментов с результатами расчётов по различным моделям.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, стекловолокно, кварцевое волокно, эпоксидная смола, эксперимент, диэлектрическая проницаемость, прочностные свойства, расчётная модель.

При создании ряда электронных устройств необходимо обеспечить не только прочность и жёсткость их конструкции, но также и требуемые теплофизические, радиотехнические (диэлектрические) характеристики. Зачастую противоречивость данного комплекса требований делает выбор подходящего материала конструкции сложной задачей [1].

Композиционные материалы (КМ) на основе стеклонанополнителей и полимерных связующих нашли широкое применение в конструкциях благодаря удачному сочетанию физико-механических, теплофизических и радиотехнических характеристик. Важным достоинством КМ является возможность получения заданных значений характеристик путём подбора компонентов (связующего и наполнителя), способа их расположения (схемы армирования) и объёмного содержания, что делает данный класс материалов наиболее подходящим для обеспечения соответствия изделий всем предъявляемым к ним требованиям.

Значительно возрос уровень требований к диэлектрическим КМ по температурам применения, стабильности диэлектрических и физико-механи-

ческих свойств, химической стойкости к средам эксплуатации [2—4]. Проблема эксплуатации пористых диэлектрических КМ в условиях повышенной влажности рассмотрена в работах [5, 6], проведена оценка изменения диэлектрических свойств материалов. Актуальными являются проблемы прогнозирования сохранности свойств диэлектрических КМ в различных условиях эксплуатации. Правильный расчет компонентного состава, технологических режимов изготовления материалов в значительной степени определяет уровень и стабильность эксплуатационных свойств изделий из них.

При изготовлении диэлектрических КМ широкое применение нашли ткани различного плетения, ровинги, нити на основе стеклянных (алюмоборсиликатных, кремнеземных, кварцевых) и органических волокон.

При эксплуатации материалов при повышенных температурах наиболее предпочтительными являются армирующие наполнители на основе стеклянных волокон, так как температура их разрушения существенно превышает температуры деструкции полимерных органических матриц. Вследствие высокой химической инертности стекла химическая стойкость стеклопластиков также в значительной степени определяется свойствами матрицы.

Большое многообразие связующих (матриц) различной химической природы, применяемых при изготовлении диэлектрических КМ, обусловлено разнообразием эксплуатационных требований к материалам. В качестве диэлектрических связующих нашли применение эпоксидные, кремнийорганические, цианатэфирные, полиимидные

Барышев Антон Николаевич, инженер.

E-mail: abaryshev@inbox.ru

Таирова Людмила Павловна, старший научный сотрудник.

E-mail: com-or@yandex.ru

Лебедева Ольга Васильевна, инженер.

E-mail: ict-olga@mail.ru

Дьяконов Виктор Александрович, начальник отдела.

E-mail: info@kompozit-mv.ru

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2020 г.

© Барышев А. Н., Таирова Л. П., Лебедева О. В.,
Дьяконов В. А., 2021

смолы, а также различные фосфатные связующие и золи [1—4]. В связи с большим разнообразием применяемых составов диэлектрических КМ прогнозирование и модельный расчет комплекса свойств получаемых материалов является важной практической и научной задачей.

Прочностные и упругие характеристики КМ с произвольной схемой армирования при наличии сведений о характеристиках компонентов могут быть достаточно достоверно определены посредством различных моделей и программных комплексов. Для расчёта диэлектрических характеристик существует большое число моделей, как эмпирических, так и имеющих некоторое теоретическое обоснование. Однако ни одна из моделей не может быть признана универсальной. Для их сравнения и выбора наиболее достоверной авторами проведена серия экспериментов.

Объекты исследования

В целях прогнозирования радиотехнических характеристик натурного изделия и выбора модели, позволяющей наиболее корректно оценивать диэлектрическую проницаемость КМ, используя сведения о диэлектрической проницаемости его компонентов, были изготовлены и испытаны образцы. В качестве наполнителя использовали стеклянный ровинг марки РВМПН10-1260-78 [7, 8] и кварцевый ровинг РКН11-300п/эм (производитель НПО "Стеклопластик"), в качестве связующего — эпоксидные компаунды горячего отверждения "Этал-245Х" [9] и "Этал-50Т-210" [10] (производитель АО "ЭНПЦ ЭПИТАЛ"), предназначенные для изготовления изделий из стеклопластиков, работающих при температурах выше 100 °С, контактирующих с горячей водой, горячими растворами солей и кислот, щелочами.

Образцы композита изготавливали вручную методом намотки на плоскую пластину с последующей пропиткой каждого слоя связующим. Изготавливали одновременно по два образца с каждым типом наполнителя. После полимеризации связующего проводили механическую обработку поверхности образцов в целях её выравнивания и получения заданной толщины $h = (3 \pm 0,2)$ мм. Образцы связующего (эпоксидных компаундов) изготавливали заливкой в формы и после отверждения также подвергали механической обработке. Полимеризацию образцов связующего и образцов композита осуществляли одновременно по режимам, рекомендованным производителем.

Всего было изготовлено и испытано шестнадцать образцов: по четыре образца связующего и по два образца композита с двумя типами связующего и двумя типами наполнителя. Общий вид образцов для определения диэлектрических характеристик приведён на рис. 1.

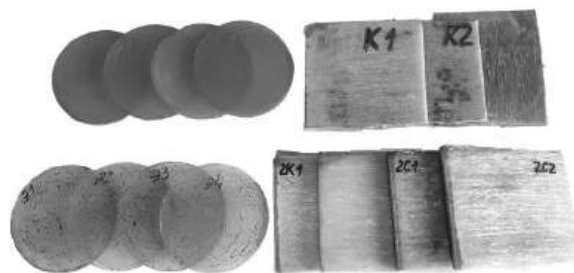


Рис. 1. Образцы для исследования диэлектрических характеристик

Плотность отверждённых эпоксидных связующих и композитов определяли на образцах экспериментально, плотность наполнителей была принята по справочным данным: плотность ВМП-стекла $\rho_{ВМП} = 2,58$ г/см³ [7], плотность кварцевого волокна $\rho_{КВ} = 2,21$ г/см³ [11]. На основе экспериментальных и справочных данных определено объёмное содержание волокон V_f в каждом из образцов композита по правилу смеси:

$$V_f = \frac{\rho_c - \rho_m}{\rho_f - \rho_m},$$

где ρ_c , ρ_f , ρ_m — плотности композита, наполнителя и матрицы соответственно. При расчёте объёмного содержания волокна предполагалось, что композит состоит только из наполнителя и связующего и не имеет пор.

Определение диэлектрических свойств композитов

Относительная диэлектрическая проницаемость (далее диэлектрическая проницаемость) и тангенс угла диэлектрических потерь материалов при частоте 1 МГц и комнатной температуре рассчитывали исходя из первичных данных, полученных контактным методом на измерителе добротности Е4-7 в соответствии с ГОСТом [12]. Измерения проводили на плоских образцах $\varnothing 50$ мм и толщиной $h = (3 \pm 0,2)$ мм. Перед измерением образцы термостатировали при комнатной температуре в течение суток. Расчет диэлектрических характеристик производили по следующим формулам:

$$\varepsilon = \frac{t'}{t''},$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость;

t' — толщина образца;

t'' — расстояние между пластинами конденсатора без образца при емкости измерительной ячейки, такой же, как при измерении с образцом;

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 Q_1} \frac{C_{\text{рез}} t''}{0,0695 d^2},$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь;
 Q_1 — добротность контура в случае, если между электродами находится образец;
 Q_2 — добротность контура в случае удаления образца;
 $C_{\text{рез}}$ — полная емкость контура, равная емкости эталонного конденсатора настроенного прибора, когда измеряемый конденсатор отключен;
 d — диаметр электрода (образца).

Определение прочностных свойств композитов

Для оценки прочностных свойств композита проводили испытания образцов микропластика на основе связующего "Этал-245Х" и ровингов РВМПН10-1260-78 и РКН11-300п/эм. Образцы микропластика представляли собой пропитанные связующим ленты длиной (250 ± 5) мм, собранные из двух жгутов ровинга РВМПН10-1260-78 или четырех жгутов ровинга РКН11-300п/эм. Расчетное объемное содержание волокна в образцах

микропластика составило от 20 до 25 %. Характерный внешний вид образцов показан на рис. 2.

Испытания были проведены на машине FP10/1 с использованием стандартных самозаклинивающих захватов при скорости перемещения захватов 3 мм/мин. На концы образцов клеим холодного отверждения на основе цианоакрилата приклеивали накладки, предотвращающие разрушение образцов в захватах.

Результаты исследований диэлектрических и прочностных свойств композитов

Результаты исследований диэлектрических свойств композитов приведены в табл. 1.

Среднее значение диэлектрической проницаемости компаунда "Этал-245Х" составило $\epsilon_{m1} = 3,47$, компаунда "Этал-50Т-210" — $\epsilon_{m2} = 2,8$. Средние измеренные значения плотности и тангенса угла диэлектрических потерь отвержденных компаундов "Этал-245Х" и "Этал-50Т-210", соответственно, равны $\rho_{m1} = 1,13 \text{ г/см}^3$, $\operatorname{tg} \delta_{m1} = 0,062$ и $\rho_{m2} = 1,16 \text{ г/см}^3$, $\operatorname{tg} \delta_{m2} = 0,0222$.

Результаты испытаний образцов микропластика на растяжение приведены в табл. 2.

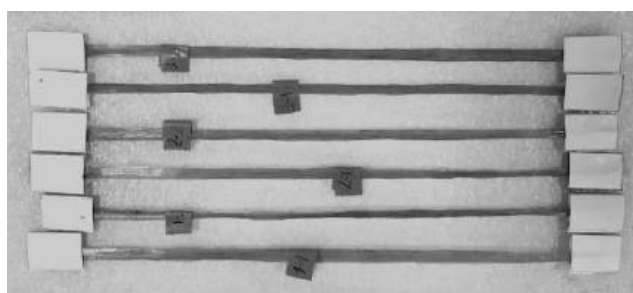


Рис. 2. Образцы микропластика для оценки прочностных свойств композитов

Таблица 1

Состав, характеристики и диэлектрические свойства образцов

Образец	Наполнитель	Связующее	$\rho_c, \text{ г/см}^3$	$V_f, \%$	ϵ	$\operatorname{tg} \delta$
Э1-1	—	Этал-245Х	1,131	—	3,63	0,066
Э1-2	—		1,134	—	3,37	0,063
Э1-3	—		1,128	—	3,6	0,062
Э1-4	—		1,135	—	3,29	0,057
К1-1	РКН11-300п/эм		1,526	36,7	3,53	0,058
К1-2	РКН11-300п/эм		1,507	34,9	3,71	0,065
С1-1	РВМПН10-1260-78		1,724	41,0	3,89	0,070
С1-2	РВМПН10-1260-78		1,686	38,3	4,1	0,076
Э2-1	—	Этал-50Т-210	1,163	—	2,89	0,0232
Э2-2	—		1,160	—	2,95	0,0228
Э2-3	—		1,157	—	2,64	0,0197
Э2-4	—		1,161	—	2,73	0,0230
К2-1	РКН11-300п/эм		1,550	37,2	3,07	0,0093
К2-2	РКН11-300п/эм		1,540	36,2	3,22	0,00985
С2-1	РВМПН10-1260-78		1,672	36,1	3,84	0,0131
С2-2	РВМПН10-1260-78		1,734	40,5	3,72	0,0134

Таблица 2

Прочностные свойства образцов микропластика при растяжении

№ образца	Ровинг	n	m_c , г	m_f , г	$F_{\text{разр}}$, Н	$\sigma_{\text{раз}}$, МПа	σ_f , МПа	F_p , Н/текс
1-1	РВМПН10-1260-78	2	2,052	0,819	2230	512,7	2248	0,885
1-2	РВМПН10-1260-78	2	1,964	0,814	1930	465,8	1945	0,766
2-1	РВМПН10-1260-78	2	1,921	0,814	2480	616,1	2500	0,984
2-2	РВМПН10-1260-78	2	2,059	0,801	2950	656,7	2973	1,171
3-1	РВМПН10-1260-78	2	2,046	0,796	2700	601,1	2721	1,071
3-2	РВМПН10-1260-78	2	2,188	0,801	2180	449,4	2197	0,865
4-1	РКН11-300-п/эм	4	1,046	0,382	1320	551,8	2431	1,1
4-2	РКН11-300-п/эм	4	1,05	0,378	1140	468,9	2099	0,95
5-1	РКН11-300-п/эм	4	1,087	0,365	980	370,4	1805	0,817
5-2	РКН11-300-п/эм	4	1,046	0,374	1090	445,3	2007	0,908
6-1	РКН11-300-п/эм	4	0,928	0,378	1230	589,0	2265	1,025
6-2	РКН11-300-п/эм	4	0,980	0,39	1360	632,7	2505	1,133

В табл. 2 n — число жгутов ровинга в образце; m_c — измеренная масса образца; m_f — расчётная масса волокна в образце; $F_{\text{раз}}$ — разрушающее усилие; $\sigma_{\text{раз}}$ — разрушающее напряжение, определённое как отношение разрушающей нагрузки к расчётной площади поперечного сечения образца; σ_f — расчётное значение разрушающего напряжения в волокне при условии использования нитяной модели, т. е. в предположении, что вся нагрузка воспринимается волокном; F_p — относительная разрушающая нагрузка, полученная как отношение разрушающей нагрузки к линейной плотности волокна в образце.

Как следует из табл. 2, среднее значение разрушающего напряжения σ_f составляет 2430 МПа для ровинга РВМПН10-1260-78 и 2185 МПа для ровинга РКН11-300п/эм. Паспортное значение предела прочности для ровинга из ВПМ-стекла составляет 4200 МПа [8], поэтому требуется дополнительное исследование прочностных характеристик.

Сравнение моделей для расчёта диэлектрической проницаемости композитов

Изучению диэлектрической проницаемости КМ посвящено большое количество как теоретических, так и экспериментальных работ [13—21]. Существует ряд моделей, позволяющих рассчитать значение диэлектрической проницаемости композита ϵ_c по значениям диэлектрической проницаемости волокна (ϵ_f) и матрицы (ϵ_m) и объёмному содержанию волокна V_f . Значения диэлектрической проницаемости волокон были приняты следующими: кварцевого волокна $\epsilon_{\text{кв}} = 3,77$ [6, 16], ВМП-стекла (S-стекла) $\epsilon_{\text{ст}} = 5,5$ [11, 22, 23].

Для сравнения были отобраны следующие модели: правило смеси; модель Хашина [13]; смесевая модель Зарубина, Кувыркина и Савельевой [14]; модель Бруггемана [24, 25]; модель Максвелла-Гарнетта [17]; модель Лихтенеккера [1]. Математически использованные модели записываются в следующем виде:

$$\epsilon_c = V_f \epsilon_f + (1 - V_f) \epsilon_m \text{ — правило смеси;}$$

$$\epsilon_c = \epsilon_m + \frac{V_f}{\frac{1}{\epsilon_f - \epsilon_m} + \frac{1 - V_f}{2\epsilon_m}} \text{ — модель Хашина;}$$

$$\epsilon_c = \left[(1 - V_f) \sqrt[3]{\epsilon_m} + V_f \sqrt[3]{\epsilon_f} \right]^3 \text{ — смесевая модель Зарубина, Кувыркина, Савельевой;}$$

$$V_f \frac{\epsilon_f - \epsilon_c}{2\epsilon_c + \epsilon_f} + (1 - V_f) \frac{\epsilon_m - \epsilon_c}{2\epsilon_c + \epsilon_m} = 0 \text{ — модель}$$

Бруггемана;

$$\frac{\epsilon_c - \epsilon_m}{2\epsilon_m + \epsilon_c} = V_f \frac{\epsilon_f - \epsilon_m}{2\epsilon_c + \epsilon_f} \text{ — модель Максвелла-}$$

Гарнетта;

$$\ln(\epsilon_c) = V_f \ln(\epsilon_f) + (1 - V_f) \ln(\epsilon_m) \text{ — модель}$$

Лихтенеккера.

Результаты расчётов по моделям приведены в табл. 3.

По результатам, приведённым в табл. 3, для каждой модели найдено среднее отклонение полученного по ней расчётного значения диэлектрической проницаемости от экспериментально определённого:

$$\delta = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left| \frac{\epsilon_i^{\text{эк}} - \epsilon_i^{\text{рас}}}{\epsilon_i^{\text{эк}}} \right| 100 \%,$$

где k — число испытанных образцов;

$\epsilon_i^{\text{эк}}$ — экспериментально определенное значение диэлектрической проницаемости для i -го образца;

$\epsilon_i^{\text{рас}}$ — расчётное значение диэлектрической проницаемости i -го образца по модели.

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные значения диэлектрической проницаемости

Образец	Диэлектрическая проницаемость						
	Эксперимент	Правило смеси	Модель Хашина	Модель Зарубина, Кувыркина, Савельевой	Модель Бруггемана	Модель Максвелла–Гарнетта	Модель Лихтенеккера
K1-1	3,53	3,580	3,577	3,578	3,578	3,578	3,577
K1-2	3,71	3,575	3,572	3,573	3,573	3,572	3,572
C1-1	3,89	4,302	4,180	4,228	4,226	4,216	4,191
C1-2	4,1	4,247	4,129	4,175	4,173	4,164	4,139
K2-1	3,07	3,161	3,125	3,139	3,138	3,136	3,128
K2-2	3,22	3,151	3,116	3,129	3,129	3,127	3,118
C2-1	3,84	3,775	3,545	3,637	3,632	3,608	3,573
C2-2	3,72	3,890	3,650	3,749	3,746	3,718	3,680

Значения отклонений составили (%): при расчёте по правилу смеси — 3,46; по модели Хашина — 3,47; по модели Кувыркина, Зарубина и Савельевой — 3,34; по модели Бруггемана — 3,33; по модели Максвелла–Гарнетта — 3,27; по модели Лихтенеккера — 3,35.

Заключение

Результаты проведенного исследования однонаправленных диэлектрических эпоксидных стеклопластиков с объемным содержанием волокна 35—41 % показывают, что все рассмотренные модели позволяют определить диэлектрическую проницаемость волокнистого композита в поперечном направлении со средней погрешностью, не превышающей 3,5 %. Существенных различий между моделями и точностью полученных результатов не выявлено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуртовник И. Г., Соколов В. И., Трофимов Н. Н., Шалгунов С. И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. — М.: Мир, 2003. — 368 с.
2. Дьяконов В. А., Арсланова Н. И., Камалов А. Д., Пронин Б. Ф., Ступакова Н. П., Филатов Е. Н. Радиопрозрачные теплозащитные композиционные материалы, работоспособные в экстремальных условиях: IV Междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи "Функциональные наноматериалы и высококачественные вещества". — Суздаль, 2012. С. 219, 220.
3. Лукин Е. С., Дьяконов В. А., Арсланова Н. И., Пронин Б. Ф., Филатов Е. Н. Высокотемпературные исследования радиотехнических композиционных материалов // Изв. Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова. 2013. № 2. С. 38—41.
4. Дьяконов В. А., Лукин Е. С., Нефедова Н. В., Пронин Б. Ф., Филатов Е. Н. Высокотемпературные исследования теплозащитных композиционных материалов класса "оксид–оксид" // Новые огнеупоры. 2013. № 12. С. 33—35.
5. Дьяконов В. А., Камалов А. Д., Пронин Б. Ф. Исследования диэлектрических характеристик кремнеземных материалов в условиях повышенной влажности // Конструкции из композиционных материалов. 2017. № 3(147). С. 48—52.
6. Кониченко Т. С., Дьяконов В. А., Нефедова Н. В., Степко А. А. Применение технологий химического газоподожжения для уменьшения пористости оксидных материалов // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 3(199). С. 25—27.
7. Материалы на основе высокомодульных высокопрочных стеклянных волокон [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://npo-stekloplastic.ru/products/high-modulus-high-strength-fiber-glass-materials> (дата обращения: 12.10.2020).
8. Технический паспорт. Ровинги из высокомодульных высокопрочных волокон [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://npo-stekloplastic.ru/wp-content/uploads/2020/09/tehnicheskie-harakteristiki-produkczi-rovingi_vmp.pdf (дата обращения: 12.10.2020).
9. Модифицированная эпоксидная смола Этал-245 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.epital.ru/compounds/etal245.html> (дата обращения: 12.10.2020).
10. Эпоксидный компаунд Этал-50 для намотки труб [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.epital.ru/binding/50.html> (дата обращения: 12.10.2020).
11. Павлушкин Н. М. Химическая технология стекла и ситаллов. — М.: Стройиздат, 1983. — 432 с.
12. ГОСТ 22372-77 Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до 5·10⁶ Гц.
13. Dinulović M., Rašuo B. Dielectric Properties Modeling of Composite Materials // FME Transactions. 2009. № 37. P. 117—122.
14. Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю. Оценки диэлектрической проницаемости композита с дисперсными включениями // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2015. № 3. С. 50—64.
15. Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю. Оценки диэлектрической проницаемости композита с включениями в виде эллипсоидов вращения // Вестник МГТУ

им. Н. Э. Баумана. Сер. "Естественные науки". 2016. № 4. С. 40—55.

16. Люкшин П. А., Гришаева Н. Ю., Люкшин Б. А., Панин С. В., Бочкарева С. А., Матолыгина Н. Ю., Уцын Г. Е. Расчет электрофизических свойств дисперсно-наполненного композита // Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т. 10. № 1. С. 5—16.

17. Vasanth Chakravarthy Shunmugasamy, Dinesh Pini-setty, Nikhil Gupta. Electrical properties of hollow glass particle filled vinyl ester matrix syntactic foams // J. Mater Sci. 2014. № 49. P. 180—190.

18. Guo Yalin, Zhang Xiaohu, Cui Hong, Liao Yingqiang, Gao Kezhou, Zhang Shijie, Jing Kuan, Deng Jie, Cheng Minsu. Properties of quartz fabrics reinforced cyanate ester resin composites produced by RTM processing: Proc. Of ICCM-21. Xi'an, China. August 20—25, 2017.

19. Elimat Z., Hamideen M., Schulte K., Wittich H., Vega A., Wichmann M., Buschhorn S. Dielectric properties of epoxy/short carbon fiber composites // J. Mater Sci. 2010. № 45. P. 5196—5203.

20. Дементьева Л. А., Сереженков А. А., Бочарова Л. И., Лукина Н. Ф., Куцевич К. Е., Петрова А. П. Свой-

ства композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. № 6. С. 19—24.

21. Fraga A. N., Frulloni E., de la Osa O., Kenny J. M., Vázquez A. Relationship between Water Absorption and Dielectric Behavior of Glass Fiber Reinforced Unsaturated Polyester Resin // J. Composite Materials. 2007. V. 41. № 4. P. 393—402.

22. Диэлектрические характеристики кварцевого волокна [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.quartz.saint-gobain.com/news/using-quartz-fiber-aerospace-radomes> (дата обращения: 12.10.2020).

23. Диэлектрические характеристики высокопрочного стекла (S-стекла) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=769> (дата обращения: 12.10.2020).

24. Ефимова А. И., Головань Л. А., Кашкаров П. К., Сенин В. М., Тимошенко В. Ю. Инфракрасная спектроскопия систем пониженной размерности: учеб. пособие. — Санкт-Петербург: Изд-во "Лань", 2016. — 246 с.

25. Weiglhofer W. S., Lakhtakia A., Michel B. Maxwell Garnett and Bruggeman formalisms for a particulate composite with bianisotropic host medium // Microw. Opt. Techn. Let. 1997. V. 15. № 4. P. 263—266.

Research of dielectric and strength characteristics of glass fiber and quartz fiber composites with epoxy matrices

A. N. BARYSHEV, L. P. TAIROVA, O. V. LEBEDEVA
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

V. A. DYAKONOV
OJSC "Kompozit", Korolev, Moscow region, Russia

The article presents experimental results of dielectric constant and loss-angle tangent for composite materials based on glass and quartz fibers and two types of epoxy resins. Tensile strength along the fibers was also determined for examined materials with the aid of impregnated and cured yarns (microplastics). Experimental results are compared with the results of calculations for different models.

Keywords: polymer composite material, glass fiber, quartz fiber, epoxy resin, experiment, dielectric constant, strength properties, theoretical model.

Конструкции из композиционных материалов: Межотр. науч.-техн. журн. / Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»; Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»; Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». 2021. Вып. 1 (161). С. 1—52.

Редактор ***О. А. Константинова***
Компьютерная верстка ***Н. В. Ильина, К. В. Трыкина***

Подписано в печать 08.02.2021. Формат 60x84 1/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,0, Уч.-изд. л. 6,2.
Тираж 250 экз. Заказ 1966. Свободная цена.
Адрес редакции: 125424, Москва,
Волоколамское ш., д. 77,
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».
www.ntckompas.ru; E-mail: izdanie@ntckompas.ru
Отпечатано: 101000, Москва,
Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, офис 105.
ИП Кириченко Алексей Викторович.
Индекс 80089.

БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 2021 г.
на издания ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

Наименование издания	Периодичность в год	Цена 1 экз., руб.	Кол-во выпусков в год	Общая сумма, руб.
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России	4	1550,00		
Конструкции из композиционных материалов	4	1700,00		
Экология промышленного производства	4	1500,00		
Информационные технологии в проектировании и производстве	4	1750,00		
Вопросы защиты информации	4	1750,00		
<i>В цену включены: НДС — 10 % и стоимость почтовой доставки.</i>				

Поставка журналов подписчикам через издательство осуществляется почтовыми бандеролями с приложением всех необходимых бухгалтерских документов.

Наши реквизиты:

Полное наименование организации: _____

Сокращенное наименование организации: _____

ИНН/КПП _____

ОКПО _____

Расчётный счёт № _____ в _____

к/с _____ БИК _____

Юридический адрес: _____

Почтовый адрес: _____

Контактное лицо _____ тел. _____

E-mail: _____

(Для оформления счёта и бухгалтерских документов просьба заполнить все строчки).

Справочно:

Заполненный бланк-заказ просьба отправить по факсу: 8(495) 491-44-80 или

E-mail: secretariat@ntckompas.ru

Более подробную информацию об изданиях и подписке можно получить по телефону:

8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-20.

E-mail: ivleva@ntckompas.ru

Адрес редакции: 125424, Москва, Волоколамское шоссе, д.77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».