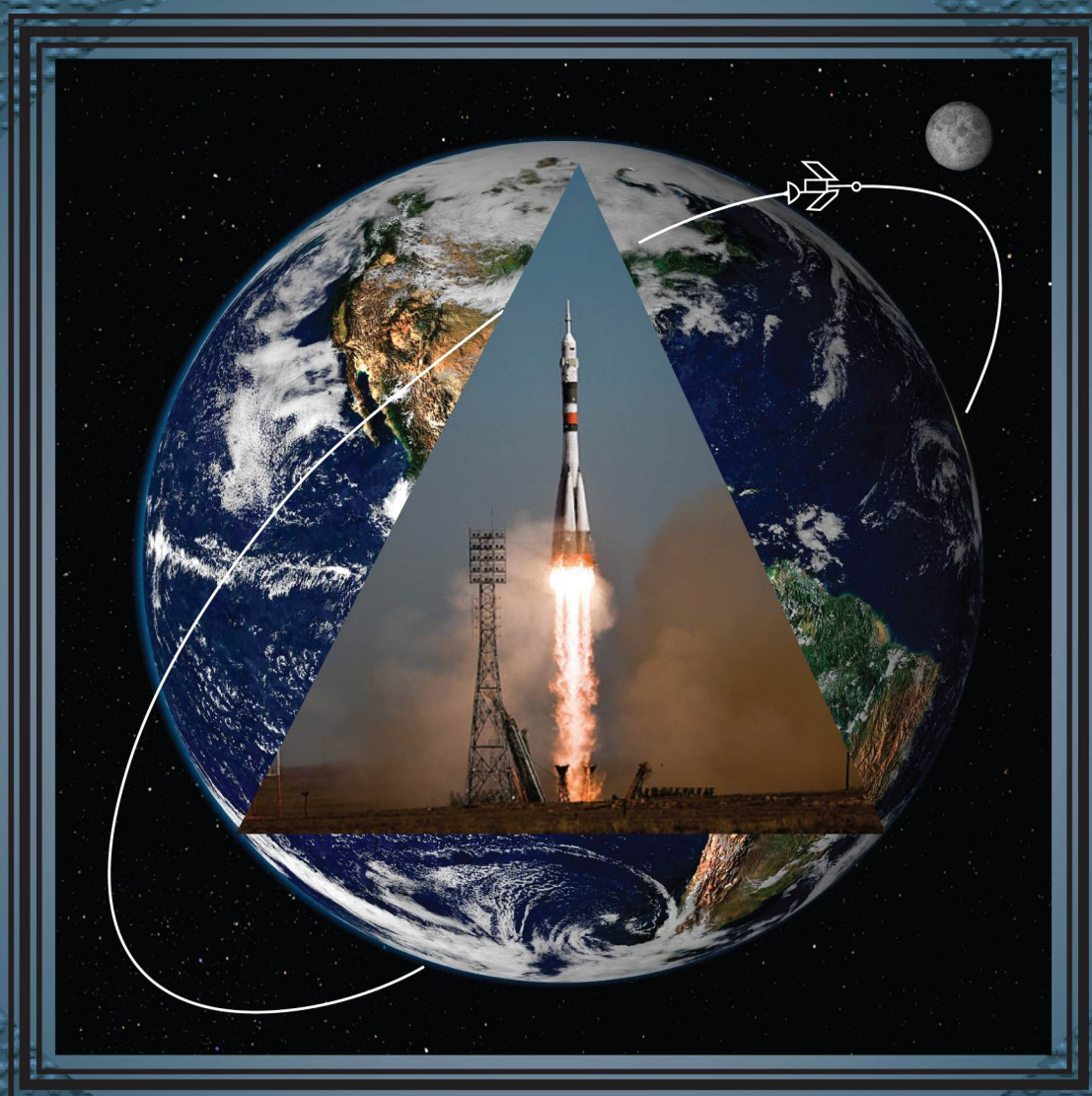


# КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

# 1



Москва 2022





## 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](mailto: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 (165)

Издается с 1981 г.

Москва 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

К 70-летию Афанасия Викторовича Острика ..... 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

Мокин Ю. А., Калашиников С. Т., Швалева Р. К. Оценка дисперсии аэродинамического коэффициента сопротивления тела вращения с малыми случайными искажениями поверхности композитного теплозащитного покрытия при сверхзвуковом обтекании ..... 5

Муравьев В. В., Артёмова Е. П., Сарбаев Б. С., Тимофеев И. А. Оценка влияния конструктивных параметров на эффективные прочностные характеристики трёхслойных панелей из углерод-керамического композиционного материала ..... 11

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, ПРОЦЕССОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Янковский А. П. Моделирование неупругого динамического поведения цилиндрических армированных оболочек при учете зависимости пластических свойств от скорости деформирования ..... 19

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И СОЕДИНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Донецкий К. И., Тимошков П. Н., Сафронов А. М., Гончаров В. А., Мишун М. И. Безавтоклавное формование препрегов ..... 29

### КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Манашев И. Р., Беляков А. В., Церман С. И. Применение в сегментах для алмазного инструмента композитной связки на нитридокремниевой матрице вместо карбидвольфрамовой ..... 35

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Большакова А. Н., Ефимочкин И. Ю., Бобровский А. П. Исследование структуры и механических свойств слоистого композиционного материала, состоящего из чередующихся слоев матричного композиционного материала на основе молибдена и армирующего слоя на основе тугоплавкого металла ..... 45

### КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

Степанова Л. Н., Петрова Е. С., Чернова В. В. Акустико-эмиссионный контроль авиационного лонжерона из углепластика ..... 50

Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О., Овчинников И. Г., Шелемба И. С. Внешнее армирование композитными материалами и оптический мониторинг надежности эксплуатации строительных сооружений (Обзор) ..... 57

**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 Е. И. Андреева**,  
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; **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; **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); **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»), 2022;
- © Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева» (АО «ГРЦ Макеева»), 2022;
- © Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС»), 2022

## К 70-летию АФАНАСИЯ ВИКТОРОВИЧА ОСТРИКА



23 января 2022 г. исполнилось 70 лет доктору технических наук Афанасию Викторовичу ОСТРИКУ. Афанасий Викторович является одним из ведущих специалистов страны в области исследования комплексного действия потоков излучений и частиц на композитные конструкции летательных аппаратов с защитными гетерогенными покрытиями.

После окончания в 1975 г. Московского физико-технического института Афанасий Викторович занимался расчетно-экспериментальными исследованиями механического действия излучения на композитные конструкции. Созданный набор моделирующих газодинамических устройств позволил

провести испытания работающих ракетных двигателей на стойкость к механическому действию высокоинтенсивных потоков излучений в широком диапазоне изменения энергии квантов, на основе результатов этих испытаний был разработан экспериментально обоснованный комплекс программ для численного моделирования деформирования и разрушения многослойных конструкций при механическом действии направленных потоков энергии различной физической природы.

Уникальные результаты работ по исследованию стойкости ракетных двигателей к действию нестационарных нагрузок, возникающих при воздействии высокоинтенсивных потоков энергии, были отмечены премией Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 1996 г.

По инициативе и при непосредственном участии Афанасия Викторовича были продолжены работы по совершенствованию "Комплекса единых межведомственных методик и программ расчета полей излучения и параметров его воздействия на объекты ракетно-космической техники". Основное внимание при этом было уделено учету влияния гетерогенности защитных покрытий на параметры термомеханического и теплового действий излучения. В результате разработан набор моделей температурно-неравновесных элементарных ячеек гетерогенных материалов, существенно расширивших область применения расчетного комплекса.

Афанасий Викторович – автор 7 монографий и 14 изобретений.

В настоящее время Афанасий Викторович, работая главным научным сотрудником в отделе экстремальных состояний вещества Института проблем химической физики РАН, занимается решением проблемы прогнозирования последствий комплексного действия потоков излучений

и частиц различной физической природы на конструкции летательных аппаратов, имеющих гетерогенные покрытия. Им разработан новый вариант неявного SPH-метода, позволяющий численно моделировать многомерные нестационарные процессы, возникающие при интенсивном подводе энергии к веществу.

Много внимания в работах Афанасий Викторович уделяет разработке уравнений состояния сред и определяющих уравнений, адаптированных для использования в газодинамических кодах. Им предложен новый вариант уравнений состояния конденсированных сред в области сжатия, построены определяющие уравнения разрушающихся бетонных композиций с учетом вязкопластических эффектов.

Коллеги по научной работе и члены редколлегии журнала поздравляют Вас, Афанасий Викторович, с юбилеем, желают Вам крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов в деле обеспечения безопасности и процветания России.

Редакционная коллегия

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 533.601.1; 629.7

DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_1\_5

## Оценка дисперсии аэродинамического коэффициента сопротивления тела вращения с малыми случайными искажениями поверхности композитного теплозащитного покрытия при сверхзвуковом обтекании

<sup>1</sup> Ю. А. МОКИН, д-р физ.-мат. наук; <sup>1</sup> С. Т. КАЛАШНИКОВ, канд. техн. наук;  
<sup>1,2</sup> Р. К. ШВАЛЕВА

<sup>1</sup> Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

<sup>2</sup> АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»,  
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

*Рассмотрен один из проблемных вопросов определения аэродинамических характеристик скоростных спускаемых летательных аппаратов (СЛА), имеющих форму тела вращения с малыми случайными вариациями поверхности композитного теплозащитного покрытия (ТЗП), — оценка масштаба дисперсии коэффициента аэродинамического сопротивления  $D\{c_x\}$  при малых углах атаки в зависимости от определяющих параметров. На основе метода дифференциальной гипотезы локальности, используемого для расчета вариаций давления, и разложения вариации поверхности в ряд Фурье получено аналитическое интегральное решение поставленной задачи для тела вращения с заданной автокорреляционной функцией случайных вариаций его поверхности. Представлены графики, иллюстрирующие зависимость практически предельных значений разброса коэффициента  $c_x$  на уровне  $3\sigma\{c_x\}$  от степени корреляционной зависимости для трех модельных автокорреляционных функций случайных искажений поверхности острого конуса с углом полураствора  $30^\circ$  при его обтекании с  $M_\infty \cong 10$ . Проведен качественный анализ полученных зависимостей.*

**Ключевые слова:** сверхзвуковое обтекание, тело вращения, острый конус, композитный теплозащитный материал, слабая случайная вариация поверхности, малый угол атаки, разброс коэффициента аэродинамического сопротивления.

Определение аэродинамических характеристик тел вращения с малыми случайными пространственными искажениями внешней поверхности композитных теплозащитных материалов при сверхзвуковом и гиперзвуковом обтекании под малым углом атаки является одним из проблемных вопросов при проектировании и разработке скоростных СЛА [1]. Один из них — вопрос оценки разброса аэродинамического коэффициента сопротивления  $\Delta c_x$  при нулевом и малом про-

странственном угле атаки. Величина  $\Delta c_x$  за счет искажений поверхности является аддитивной добавкой к номинальным значениям коэффициента сопротивления  $c_x$  при малых углах атаки и скольжения.

Трудности оценки величин  $\Delta c_x$  возрастают при неопределенности, отсутствии полной информации о возможном качественном виде случайных искажений поверхности, обусловленных множеством влияющих факторов, в том числе случайного характера. Вопросу получения оценок коэффициента  $c_x$  СЛА в детерминированной постановке посвящены сотни работ российских и иностранных авторов. Работы, в которых были бы разработаны методы получения или получены оценки вариаций  $\Delta c_x$  без предварительного промежуточного этапа явного моделирования изменения геометрии ЛА, авторам неизвестны.

В настоящей работе рассмотрена практически значимая [2—4] задача оценки дисперсии  $D\{c_x\}$  коэффициента аэродинамического сопротивления

Мокин Юрий Александрович, старший научный сотрудник.

E-mail: ofpat@mail.ru

Калашников Сергей Тимофеевич, начальник отдела "Фундаментальные проблемы аэрокосмических технологий".

E-mail: ofpat@mail.ru

Швалева Роза Камилловна, младший научный сотрудник; инженер I категории.

E-mail: src@makeyev.ru

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2021 г.

© Мокин Ю. А., Калашников С. Т., Швалева Р. К., 2022

тела вращения с малыми случайными искажениями поверхности. Случайные искажения поверхности характеризуются заданной автокорреляционной функцией (АКФ). В качестве модельного иллюстративного примера выбрана геометрия СЛА в форме острого конуса. Выбор качественного вида трех модельных стационарных автокорреляционных функций искажений поверхности учитывает общую тенденцию к ослаблению корреляционной зависимости с увеличением расстояния между рассматриваемыми точками поверхности. Постановка и метод решения рассматриваемой задачи во многом аналогичны работе [5].

Представим уравнение поверхности тела вращения, затупленного или типа острого конуса с малыми искажениями поверхности, в цилиндрической системе координат  $(x, r, \varphi)$ , ось  $OX$  направлена от носка к торцу, в виде

$$r(x, \varphi) = y(x) + \varepsilon \delta r(x, \varphi), \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq L; 0 \leq \varphi \leq 2\pi,$$

где  $y(x)$  — уравнение образующей исходного тела;  
 $\delta r(x, \varphi)$  — слабая случайная вариация поверхности;

$L$  — длина тела;

$\varepsilon$  — параметр малости.

Обозначим  $R_m$  и  $S_m = \pi R_m^2$  — радиус и площадь миделевого сечения исходного тела;  $p(x) = y'(x) = \tan \theta_s$ ;  $\theta_s$  — угол наклона образующей тела к оси  $OX$ . Для частных производных функции (1) используем стандартные обозначения:  $p(x, \varphi) = \partial r(x, \varphi) / \partial x$ ;  $q(x, \varphi) = \partial r(x, \varphi) / \partial \varphi$ . Для острого конуса с углом полураствора  $\theta_s$ :  $y(x) = px$ , где  $p = \tan \theta_s$ . Цилиндрическая система координат связана с декартовой системой координат соотношениями  $x = x$ ;  $y = r \cos \varphi$ ;  $z = r \sin \varphi$ .

Предполагается, что случайная функция (СФ) двух переменных  $\delta r(x, \varphi)$  имеет нулевое математическое ожидание и описывается заданной АКФ:

$$K_{\delta r}(x_1, x_2, \varphi_1, \varphi_2) = M \{ \delta r(x_1, \varphi_1) \cdot \delta r(x_2, \varphi_2) \}.$$

Кроме того, аналогично [5], предполагаются слабость вариаций  $\delta r(x, \varphi)$ , статистическое "равноправие" всех меридиональных сечений ( $\varphi = \text{const}$ ) и инвариантность их статистических характеристик относительно операции зеркального отражения.

Сделанные предположения позволяют рассматривать все аэродинамические коэффициенты, в том числе и  $c_x$ , при заданных условиях обтекания тела с искажениями поверхности как случайные величины (СВ).

Указанные предположения имеют следствия. Во-первых, математическое ожидание СВ  $\Delta c_x$  из соображений линейности и знаковой симметрии ( $\pm$ ) равно нулю:  $M\{\Delta c_x\} = 0$ , т. е. математическое ожидание  $M\{c_x\}$ , равное его номинальной величине, не изменяется. Из основных статистических характеристик СВ  $c_x$  остается оценить только дисперсию  $D\{c_x\} = D\{\Delta c_x\}$ . Также заданная АКФ стационарна по окружной координате  $\varphi$ , является функцией трёх, а не четырех аргументов, и четной по  $\omega$ :

$$K_{\delta r}(x_1, x_2, \varphi_1, \varphi_2) \Rightarrow K_{\delta r}(x_1, x_2, \omega), \quad (2)$$

где  $\omega = \varphi_2 - \varphi_1$ .

При этом  $K_{\delta r}(x, x, 0) = D\{\delta r(x, \varphi)\} = D_0(x) = \sigma_0^2(x)$  определяет дисперсию вариаций поверхности;  $\sigma_0(x)$  — среднее квадратическое отклонение (СКО) вариаций поверхности.

Рассмотрим обтекание тела вращения с малыми искажениями поверхности (1) с заданным числом Маха  $M_\infty$  при  $\alpha = \beta = 0$ . В случае обтекания острого конуса предполагается реализация присоединенного скачка уплотнения ( $\theta \leq 50^\circ$ ). Для расчета коэффициента волнового сопротивления  $c_x$  без учета сил трения и донного сопротивления используем метод дифференциальной гипотезы локальности (ДГЛ) [6, 7]. Здесь и далее фактически рассматриваем только коэффициент волнового сопротивления в предположении, что именно разброс его величины является определяющим при оценке разброса суммарного коэффициента сопротивления.

Расчет коэффициента давления  $\Phi$  на поверхности тела (1) в рамках метода ДГЛ [6] при малых углах атаки производится на основе зависимости типа формулы Тейлора:

$$\Phi(x, \varphi) \approx \Phi(x) + \Phi_t(x) \Delta t + (1/2) \Phi_{tt}(x) \Delta t^2, \quad (3)$$

где  $t = \tan(\alpha_m)$  — тангенс местного угла атаки;

$\Delta t = t(x, \varphi) - p(x)$ ;

$\Phi(x)$ ,  $\Phi_t(x)$ ,  $\Phi_{tt}(x)$  — коэффициенты-функции (3), вычисляемые для заданных условий обтекания для исходного контура тела с использованием "точных" или приближенных методов и (или) программ.

Для острого конуса с фиксированным углом  $\theta$  для заданных условий обтекания величины  $\Phi$ ,  $\Phi_t$ ,  $\Phi_{tt}$  не зависят от координаты  $x$ , являясь постоянными; их приближенные значения для сверхзвуковых и гиперзвуковых чисел Маха могут быть вычислены, например, на основе аппроксимаций  $\Phi(\theta, M_\infty)$  из работы [8].



При известном распределении коэффициента давления  $\Phi(x, \varphi)$  на поверхности тела (1) коэффициент  $c_x$  выражается двойным (поверхностным) интегралом [6]:

$$c_x = \frac{1}{S_M} \int_0^L \int_0^{2\pi} \Phi(x, \varphi) r(x, \varphi) p(x, \varphi) d\varphi dx. \quad (4)$$

В рамках метода ДГЛ выражение (4) представимо в виде [6]

$$c_x = \frac{1}{S_M} \int_0^L \int_0^{2\pi} F(x, \varphi, r, p, q, \alpha) d\varphi dx, \quad (5)$$

где  $F(x, \varphi, r, p, q, \alpha) = \Phi(x, \varphi, r, p, q, \alpha) r p$ .

Представим вариацию поверхности тригонометрическим рядом:

$$\partial r(x, \varphi) = \varepsilon \left\{ a_0(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \begin{bmatrix} a_n(x) \cos n\varphi + \\ + b_n(x) \sin n\varphi \end{bmatrix} \right\}, \quad (6)$$

в котором для удобства через  $a_0(x)$  обозначен соответствующий "стандартный" коэффициент Фурье, уменьшенный в два раза.

Исходя из выражения (5) с учетом равенств (1), (6) и используя технологию метода ДГЛ, соотношения ортогональности для круговых интегралов от произведений гармоник, интегрирование по  $\varphi$ , получим приближенное равенство

$$\begin{aligned} \Delta c_x \approx \delta c_x = \\ = \frac{2\varepsilon}{R_M^2} \int_0^L \left\{ \begin{bmatrix} \Phi(x) p(x) a_0(x) + \\ + \Phi_t(x) y(x) p(x) + \\ + \Phi(x) y(x) \end{bmatrix} a'_0(x) \right\} dx, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\delta c_x$  — первая вариация интеграла (5) в точке  $(y(x), y'(x), 0, 0)$  "фазового пространства"  $(r(x, \varphi), p(x, \varphi), q(x, \varphi), \alpha)$  за счет вариации поверхности (6) и вариации угла атаки  $\delta\alpha = \alpha$ . В линейном по малому параметру  $\varepsilon$  приближении величина приращения  $\Delta c_x$  для фиксированной исходной геометрии тела и заданных условий обтекания зависит только от коэффициента  $a_0(x)$  ряда (6). Для цилиндрических и конических деталей величина  $a_0(x)$  определяет "отклонение размера" — изменение среднего радиуса нормальных круговых сечений по длине детали [9]. Заметим, что величина  $\delta c_x$  не зависит ни от гармоник ряда (6), ни от вариации угла атаки  $\delta\alpha$ . Из последнего следует, что выражение (7) определяет приращение коэффициента  $\Delta c_x$  не только при строго нулевом значе-

нии пространственного угла атаки, но и в его малой окрестности.

Интегрированием по частям выражение (7) приводится к виду без производной  $a'_0(x)$ :

$$\Delta c_x \approx \delta c_x = \frac{2\varepsilon}{R_M^2} \left[ \int_0^L F(x) a_0(x) dx + I(L) a_0(L) \right], \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{где } F(x) = - \left[ \Phi'_t(x) y(x) p(x) + \Phi_t(x) p^2(x) + \right. \\ \left. + \Phi_t(x) y(x) y''(x) + \Phi'(x) y(x) \right]; \\ I(L) = [\Phi_t(L) p(L) + \Phi(L)] y(L). \end{aligned} \quad (9)$$

Левая часть (6) — СФ двух аргументов; аналогично и коэффициенты-функции  $a_n(x)$ ,  $b_n(x)$  в правой части (6) являются СФ. Представим АКФ (2) с учетом её четности по  $\omega$  тригонометрическим рядом:

$$\begin{aligned} K_{\delta r}(x, u, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_n(x, u) \cos n\omega, \\ x, u \in [0, L]. \end{aligned} \quad (10)$$

Можно показать [10], что при условиях, указанных выше, для коэффициентов-функций в (6) с учетом замечания относительно  $a_0(x)$ , справедливы соотношения

$$\begin{cases} M \{a_n(x)\} = M \{b_k(x)\} = 0, & x \in [0, L]; \\ n = 0, 1, 2, \dots; & k = 1, 2, \dots; \\ M \{a_n(x) b_k(u)\} = 0, & x, u \in [0, L]; \\ n = 0, 1, 2, \dots; & k = 1, 2, \dots; \\ M \{a_n(x) a_k(u)\} = M \{b_n(x) b_k(u)\} = \\ = \delta_{n,k} \lambda_n(x, u). \end{cases} \quad (11)$$

То есть указанные коэффициенты являются корреляционно независимыми СФ с АКФ  $\lambda_n(x, u)$  из разложения (10);  $\delta_{n,k}$  — символ Кронекера.

Математическое ожидание квадрата правой части (8) определяет дисперсию  $D\{\Delta c_x\}$ . С учетом (11) на основе [11] получим интегральное соотношение

$$D\{\Delta c_x\} = \frac{4\varepsilon^2}{R_M^4} \left\{ \begin{aligned} & \int_0^L \int_0^L F(x) F(u) \lambda_0(x, u) du dx + \\ & + 2I(L) \int_0^L F(x) \lambda_0(x, L) dx + \\ & + I^2(L) \lambda_0(L, L) \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Выражение (12) определяет общее интегральное аналитическое решение поставленной задачи. Для частного случая обтекания острого конуса при  $y(x) = px$  величины производных  $\Phi'(x)$ ,  $\Phi_t'(x)$ ,  $y''(x)$  равны нулю и для подынтегральной функции (9) имеет место равенство

$$F(x) = p^2 \Phi_t = \text{const.} \quad (13)$$

Используем выражение (12) с учетом равенства (13) для оценки  $D\{\Delta c_x\}$  острого конуса с углом  $\theta = 30^\circ$  со случайными вариациями радиуса круговых сечений поверхности, характеризуемыми модельными двухпараметрическими АКФ трех видов:

$$\lambda_0(x, u) = \sigma_0^2 e^{-|x-u|/(\tau L)}, \quad x, u \in [0, L]; \quad (14)$$

$$\lambda_0(x, u) = \sigma_0^2 \left( xu / L^2 \right) e^{-|x-u|/(\tau L)}, \quad x, u \in [0, L]; \quad (15)$$

$$\lambda_0(x, u) = \sigma_0^2 e^{-|x-u|/(\tau L)} \cos[2\pi(x-u)/L]; \quad x, u \in [0, L]. \quad (16)$$

АКФ (14) описывает искажения поверхности с постоянной дисперсией  $D\{a_0(x)\} = \sigma_0^2 = \text{const}$  по длине конуса. Линейный параметр СКО  $\sigma_0$  выберем постоянным из условия  $3\sigma_0 = 0,01R_m$ . При этом практически предельная величина искажений поверхности составляет 1 % радиуса миделевого сечения [5]. Предполагаем, что корреляционная зависимость вариаций поверхности в различных сечениях стационарна также и по продольной координате и убывает с увеличением расстояния между ними по экспоненциальному закону. Вторым безразмерным параметром  $0 < \tau < \infty$  определяет скорость уменьшения корреляционной зависимости вариаций поверхности с увеличением расстояния между сечениями. Например, при  $\tau = 1$  коэффициент корреляции величин СФ  $a_0(x)$  в начале и середине конуса равен  $k \cong 0,607$ , а в начале и конце конуса  $k \cong 0,368$ . При малых величинах  $\tau$  ( $\tau \rightarrow +0$ ) корреляция быстро уменьшается, а при  $\tau \rightarrow \infty$  коэффициент корреляции приближается к единице по всей длине конуса. В последнем случае искажение поверхности становится эквивалентным малому случайному изменению диаметра конуса при неизменном угле полураствора  $\theta$ .

Функция (15) в отличие от предыдущей описывает искажения поверхности конуса с линейной

зависимостью СКО  $\sigma_0(x) = \sigma_0(x/L)$ . При указанной ранее величине  $\sigma_0$  практически предельная величина искажений поверхности составляет 1 % текущего радиуса конуса. Нормированные АКФ для зависимостей (14) и (15) идентичны, коэффициент корреляции при  $\tau \rightarrow +0$  и  $\tau \rightarrow \infty$  изменяется аналогично. Однако в отличие от предыдущего искажения поверхности при  $\tau \rightarrow \infty$  описывают случайное изменение угла полураствора конуса  $\theta$  за счет случайного изменения радиуса миделевого сечения. При этом случайное изменение угла  $\Delta\theta$  имеет нулевое математическое ожидание и СКО, равное

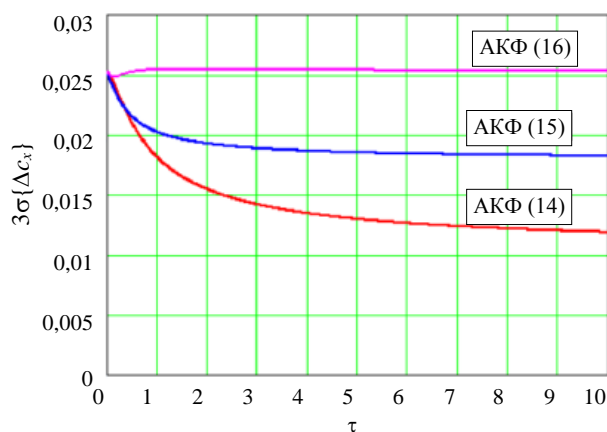
$$3\sigma\{\Delta\theta\} \approx \left( \frac{3\sigma_0}{L} \right) \cos^2\theta = 0,00433.$$

Модельная функция (16), как и функция (14), описывает искажения поверхности с постоянным СКО  $\sigma_0$  по длине конуса. Однако изменения диаметра в начале и конце конуса отрицательно коррелированы с изменениями в его середине и положительно коррелированы друг с другом. При  $\tau \rightarrow \infty$  АКФ (16) описывает вариацию поверхности  $a_0(x)$  как линейную функцию двух независимых СВ:  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ , с математическим ожиданием  $M\{\xi_1\} = M\{\xi_2\} = 0$  и дисперсией  $D\{\xi_1\} = D\{\xi_2\} = \sigma_0^2$  вида [5]

$$a_0(x) = \xi_1 \cos(2\pi x / L) + \xi_2 \sin(2\pi x / L). \quad (17)$$

Для вариаций вида (17) коэффициент корреляции искажений в начале и конце конуса друг с другом  $k \cong 1$  и, соответственно,  $k \cong -1$  с искажениями в его средней части. Возможные случайные искажения поверхности конуса при  $\tau > 3$  можно приближенно ассоциировать с периодическим по его длине (период  $T = L$ ) изменением его радиуса  $r(x)$  в допустимых пределах ( $\pm 1\% R_m$ ).

Значения коэффициента давления  $\Phi$  (коэффициента волнового сопротивления) и производной  $\Phi_t$  у острого конуса с углом  $\theta = 30^\circ$  при числе Маха  $M_\infty = 10$  приближенно примем равными  $\Phi \approx 0,530$ ;  $\Phi_t \approx 1,275$  [5]. Результаты вычислений по формуле (12) для принятых величин  $\Phi$  и  $\Phi_t$  с учетом равенства (13) для случайных искажений поверхности острого ( $\theta = 30^\circ$ ,  $M_\infty = 10$ ) конуса с автокорреляционными функциями (14)–(16) представлены на рисунке в форме  $3\sigma\{\Delta c_x\}(\tau) = 3\sqrt{D\{\Delta c_x\}}$ . Выбранная форма характеризует практически предельный диапазон изменения СВ  $\Delta c_x$  в зависимости от параметра  $\tau$  при заданных ранее практически предельных величинах вариаций поверхности.



Зависимость  $3\sigma\{\Delta c_x\}$  от параметра  $\tau$  предельных уровней вариаций коэффициента сопротивления острого конуса  $\theta = 30^\circ$  при  $M_\infty = 10$  для случайных искажений поверхности, описываемых автокорреляционными функциями (14)–(16)

При  $\tau \rightarrow +0$  все три кривые приближаются к предельному значению  $3\sigma\{\Delta c_x\} \approx 0,0253$ . С физической точки зрения этот результат указывает на то, что при исчезающе малой корреляции вариаций поверхности главная часть  $\Delta c_x$  определяется вариацией поверхности в окрестности кормового сечения конуса. Здесь не рассматривается вопрос об условиях возможного нарушения слабости вариаций поверхности при  $\tau \rightarrow +0$ .

Также отметим, что при определенных условиях,  $a_0(x) \rightarrow 0$  и (или)  $\delta c_x \rightarrow 0$ , не исключена возможность ситуации, когда главная часть приращен  $\Delta c_x$  будет определяться второй вариацией  $\delta^2 c_x$ , зависящей, кроме коэффициента  $a_0(x)$ , и от коэффициентов при гармониках  $a_n(x)$ ,  $b_n(x)$  ряда (8). Анализ такой ситуации, проведенный, например, в работе [12], показал, что при рассмотрении  $\delta^2 c_x$  предположение о равенстве нулю математического ожидания  $M\{\Delta c_x\}$  будет неверным.

При  $\tau \rightarrow \infty$  каждая из кривых асимптотически приближается к своему предельному значению. Для АКФ (16)  $\lim_{\tau \rightarrow \infty} 3\sigma\{\Delta c_x\} = 0,0106$ , что соответствует указанной предельной геометрии искажения поверхности конуса  $a_0(x) = 3\sigma_0 = \text{const}$  (формула (8)).

Для АКФ (17)  $\lim_{\tau \rightarrow \infty} 3\sigma\{\Delta c_x\} = 0,0180$ , что также точно соответствует величине коэффициента  $\Delta c_x$ , для указанной детерминированной предельной геометрии искажения конуса при  $a_0(x) = 3\sigma_0(x/L)$ . Сравнение предельных оценок для АКФ (14) и (15) иллюстрирует ситуацию, когда меньшие по величине случайные искажения поверхности конуса за счет их качественного отличия приводят к существенно большим разбросам  $\Delta c_x$ .

Для АКФ (16)  $\lim_{\tau \rightarrow \infty} 3\sigma\{\Delta c_x\} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} 0,3\sigma\{\Delta c_x\} = 0,0253$ , что также полностью согласуется с детерминированными оценками по формуле (8) для

искажений поверхности вида (17). Можно заметить, что величина  $3\sigma\{\Delta c_x\}$  для искажений поверхности конуса, описываемых АКФ (16), практически не зависит от параметра корреляции  $\tau$  и составляет  $\approx 63\%$  относительно экстремальной оценки  $\sup\{|\Delta c_x|\} \approx 0,0400$  при условии  $|a_0(x)| \leq 3\sigma_0$ .

Соответствие оценок разброса коэффициента  $\Delta c_x$  для рассмотренных модельных АКФ в предельных случаях при  $\tau \rightarrow 0$  и  $\tau \rightarrow \infty$  ожидаемым величинам, полученным на основе детерминированного подхода, можно рассматривать в качестве фрагмента верификации разработанной методики. Подтвержденное соответствие делает более правдоподобными результаты оценок, полученных описанным способом, и для промежуточных значений параметра  $\tau$  как для рассмотренного острого конуса, так и для тел вращения иной исходной формы и (или) возможных АКФ других типов.

## Выводы

Разработана методика и представлено в аналитической интегральной форме общее решение задачи определения дисперсии аэродинамического коэффициента сопротивления  $D\{\Delta c_x\}$  тела вращения с заданной АКФ малых случайных искажений поверхности композитного теплозащитного покрытия при сверхзвуковом обтекании под малым углом атаки.

На основе результатов решения поставленной задачи получены численные оценки дисперсии  $D\{\Delta c_x\}$  (СКО) для острого конуса с углом полураствора  $\theta = 30^\circ$  при числе Маха  $M_\infty \approx 10$  для трех различных модельных АКФ случайных вариаций его поверхности.

Проведен иллюстративный качественный анализ различных возможных видов зависимости дисперсии  $D\{\Delta c_x\}$  (СКО) от степени и вида корреляционной зависимости случайных вариаций поверхности острого конуса для заданных условий обтекания. Подтверждена существенность влияния качественного вида и степени корреляционной зависимости случайных вариаций поверхности композиционного ТЗП скоростных ЛА на дисперсию их аэродинамических коэффициентов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Degtyar V. G., Kalaschnikov S. T., Mokin Yu. A. On problem of analyzing aerodynamic properties of blunted rotary bodies with small random surface distortions under supersonic and hypersonic flows: Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM 2017), AIP Conf. Proc. 1893, 020004-1–020004-6. <https://doi.org/10.1063/1.5007442>
2. Ярошевский В. А. Движение неуправляемого тела в атмосфере. — М.: Машиностроение, 1978. — 168 с.

3. Дегтярь В. Г., Костин Г. Ф., Савельев В. Н., Тюменцев В. А., Хлыбов В. И. Влияние структуры углерод-углеродных композиционных материалов на обгарные формы и аэродинамические характеристики гиперзвуковых летательных аппаратов // Конструкции из композиционных материалов. 2014. № 4. С. 15—26.
4. Липницкий Ю. М., Красильников А. В., Покровский А. Н., Шманенков В. Н. Нестационарная аэродинамика баллистического полета. — М.: Физматлит, 2003. — 176 с.
5. Мокин Ю. А., Калашников С. Т., Швалева Р. К. Оценка дисперсии коэффициента возмущающей аэродинамической нормальной силы тела вращения с малыми случайными искажениями поверхности композитного теплозащитного покрытия при сверхзвуковом обтекании // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 3. С. 3—8.
6. Мокин Ю. А. О возможностях решения задач гиперзвуковой аэродинамики на основе дифференциальной формы представления обобщенной гипотезы локальности и ее композиции с точными численными методами // Космонавтика и ракетостроение. 2008. Вып. 2(51). С. 136—145.
7. Калашников С. Т., Мокин Ю. А., Швалева Р. К. Об изменении положения центра давления острого конуса с малыми вариациями поверхности при гиперзвуковом обтекании // Труды МАИ. 2017. № 96. С. 2.
8. Краснов Н. Ф., Кошевой В. Н., Данилов А. Н., Захарченко В. Ф. Аэродинамика ракет / под ред. Краснова Н. Ф. — М.: Высш. шк., 1968. — 772 с.
9. Бородачев Н. А., Абдрашитов Р. М., Веселова И. М., Колемаев В. А., Курапов А. Н., Райбман Н. С., Сизенов Л. К. Точность производства в машиностроении и приборостроении / под ред. Гаврилова А. Н. — М.: Машиностроение, 1973. — 567 с.
10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1964. — 464 с.
11. Абезгауз Г. Г., Тронь А. П., Копенкин Ю. Н., Корovina И. А. Справочник по вероятностным расчетам. — М.: Воениздат, 1970. — 536 с.
12. Мокин Ю. А. Анализ зависимости вариаций аэродинамических коэффициентов сопротивления и момента крена при сверхзвуковом обтекании тел вращения с малыми вариациями поверхности // Космонавтика и ракетостроение. 2009. Вып. 1(54). С. 168—174.

## Estimate of variance of an aerodynamic drag coefficient of a rotary body with small random surface distortions of composite thermal protection coating at supersonic flow

<sup>1</sup> Yu. A. MOKIN, <sup>1</sup> S. T. KALASHNIKOV, <sup>1,2</sup> R. K. SHVALEVA

<sup>1</sup> South Urals Federal Research Centre of Mineralogy and Geoecology of the UB RAS,  
Miass, Chelyabinsk Region, Russia

<sup>2</sup> Joint Stock Company "Academician V. P. Makeyev State Rocket Centre", Miass, Chelyabinsk Region, Russia

*The article is devoted to one of acute issues of definition of aerodynamic characteristics of high-speed re-entry vehicles (RV) of the rotary-body shape with small random surface distortions of composite thermal protection coating, i. e. an issue of assessment of a scale of the aerodynamic drag coefficient variance  $D\{c_x\}$  at small attack angles versus governing parameters. An analytical integral solution of the set problem for a rotary body with a given autocorrelated function of random distortions of its surface is obtained on the basis of a method of differential locality hypothesis used to evaluate pressure variations and expansion of the surface distortion into a Fourier series. Curves of practically ultimate values of variance of the coefficient  $c_x$  at  $3\sigma\{c_x\}$  versus a degree of correlation dependence for three modeled autocorrelated functions of random surface distortions of a sharp 30°-half angle cone flown around at  $M_\infty \cong 10$  are provided. The obtained curves are qualitatively analyzed.*

**Keywords:** supersonic flow, rotary body, sharp cone, composite thermal protection material, small random surface distortion, small attack angle, variance of an aerodynamic drag coefficient.



УДК 620.22

DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_1\_11

## Оценка влияния конструктивных параметров на эффективные прочностные характеристики трёхслойных панелей из углерод-керамического композиционного материала

В. В. МУРАВЬЕВ, канд. техн. наук; Е. П. АРТЁМОВА

АО «Институт композитных технологий», Москва, Россия

Б. С. САРБАЕВ, д-р техн. наук

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

И. А. ТИМОФЕЕВ, канд. техн. наук

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

*Предложен подход к оценке показателей прочности и массовой эффективности конструктивных вариантов трёхслойных панелей из высокотемпературных композиционных материалов для элементов корпуса многоразовых воздушно-космических летательных аппаратов (ЛА). Указаны типовые расчётные случаи для наружных панелей ЛА. Для сравнения вариантов конструкции предложена удельная характеристика. Её применение показано на примере ряда трёхслойных панелей, отличающихся размерами заполнителя. Для панелей определено напряженно-деформированное состояние (НДС) в расчётных случаях и оценено влияние конструктивных параметров по удельной характеристике.*

**Ключевые слова:** трёхслойная панель, удельная прочность трёхслойного материала, керамоматричные материалы, летательные аппараты.

Улучшение физико-механических и теплофизических свойств, совершенствование технологий формообразования и уточнение математических моделей керамоматричных композиционных материалов (ККМ) объясняют рост популярности материалов в несущих конструкциях многоразовых воздушно-космических ЛА [1—3].

К сдерживающим использование данных материалов факторам помимо высокой трудоёмкости производства можно отнести отсутствие устоявшихся апробированных методик проектирования изделий из них.

Так как для ЛА крайне важно высокое весовое совершенство, важен выбор конструктивно-силовой схемы с высокой массовой эффективностью. Одними из наиболее рациональных и широко применяемых силовых элементов являются трёхслойные (сэндвич) панели и оболочки из полимерных композиционных материалов. Большие

прочность и жёсткость при сравнительно малой массе обусловили, например, трёхслойную конструкцию обечаяк и днищ криогенных баков многоразового ЛА Х-33 [4]. Высокая массовая эффективность востребована и у элементов внешних поверхностей многоразовых ЛА. Однако эти элементы отличаются конструктивно и испытывают намного большие тепловые нагрузки. Потому разумно применять в трёхслойных панелях для наружных поверхностей многоразовых ЛА именно ККМ. Они имеют высокие удельную прочность и окислительную стойкость при температурах более 1000 °С, позволяющие создавать панели и оболочки без наружного теплозащитного покрытия.

Создание работоспособной трёхслойной панели из ККМ требует учёта температурных полей со значительными градиентами как по толщине, так и в плоскости обшивок. Анализ НДС такой конструкции становится нетривиальной задачей. Если дополнительно учесть, что толщины панели и заполнителя сопоставимы с её размерами в плане, то и проектные исследования, и проверочные расчёты остаются за границами применимости подходов, описанных в [5—8].

Трёхслойные панели могут быть сложны конструктивно [8, 9]. На начальном этапе проектных исследований варьирование всеми конструктивными параметрами чрезмерно трудоёмко. Учёт технологических, эксплуатационных и экономических ограничений не изменяет ситуации. Поэтому необходимы априорные оценки влияния характе-

---

Муравьев Василий Викторович, ведущий научный сотрудник.

E-mail: vasilii.muravyev@gmail.com

Артёмов Екатерина Павловна, инженер.

E-mail: kaartemovate@yandex.ru

Сарбаев Борис Сафиулович, профессор.

E-mail: BSSarbayev@mail.ru

Тимофеев Иван Анатольевич, начальник отдела.

E-mail: timofeev.ivan@mail.ru

---

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2021 г.

---

© Муравьев В. В., Артёмов Е. П., Сарбаев Б. С., Тимофеев И. А., 2022

ристик панели на показатели прочности и массовой эффективности. Подход к получению таких оценок авторы предлагают в данном исследовании. Сами оценки привязаны к условиям работы, нагрузкам и конструкции типовой панели.

### Объект исследования и постановка задачи исследования

Конструкция трёхслойной панели предполагает наличие двух слоёв обшивок и слоя заполнителя между ними. При анализе НДС обшивки традиционно представляют оболочками или пластинками. Заполнитель в значительном числе случаев состоит из регулярно повторяющихся ячеек. Каждая из таких ячеек составлена из тонкостенных оболочек или пластин. Данному описанию заполнителя соответствуют соты шестигранные и прямоугольные, а также профилированные волной, трапецией, треугольником или иначе [8, 9] в одном или двух направлениях листы (гофры). На рис. 1 изображена трёхслойная панель с заполнителем в виде трапециевидальной гофры в двух направлениях. Также проведены геометрические параметры, необходимые для описания математической модели панели. Варьируя этими параметрами, можно описать заполнитель в форме прямоугольной соты, трапециевидальной и треугольной гофры.

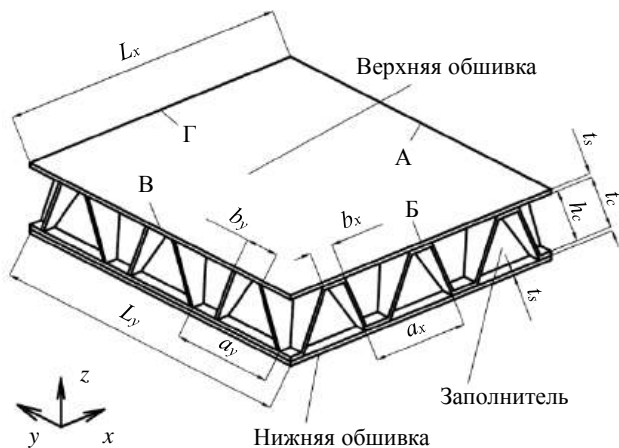


Рис. 1. Параметры геометрии трёхслойной панели

Отечественной промышленностью освоен выпуск панелей с однонаправленным гофровым заполнителем трапециевидальной формы со следующими параметрами: толщины обшивок и листа гофры  $t_s$  и  $t_c$  — около 2 мм; размер регулярной ячейки  $a_x$  — от 71 до 116 мм; высота заполнителя  $h_c$  — от 18 до 32 мм; ширина примыкания гофры к обшивкам  $b_x$  — от 18 до 26 мм. Объём панели рассчитывается как  $V = L_x L_y (2t_s + h_c) \text{ м}^3$ . Линейные размеры  $L_x$  и  $L_y$  принимают равными 300 мм. Тогда площадь панели в плане  $S = L_x L_y = 0,09 \text{ м}^2$ .

Ожидается, что конструкции подобных размеров будут востребованы многоразовыми ЛА нового поколения. Панели с указанными геометрическими параметрами будут использованы в численных экспериментах при демонстрации предлагаемого подхода по оценке влияния характеристик панели на показатели прочности и массовой эффективности.

Материал обшивок и заполнителя — трансверсально изотропный углерод-керамический композиционный материал (УККМ). Модуль упругости в плане принимают равным 73 ГПа, коэффициент Пуассона равен 0,05, пределы прочности на одноосное растяжение в плане 130 МПа, на сжатие — 80 МПа при нормальной температуре. Для оценки предельного состояния материала применима теория наибольших нормальных напряжений.

Конструктивные элементы внешних аэродинамических поверхностей современных многоразовых ЛА включены в его силовую схему. Поэтому элементы подвержены воздействиям разной физической природы на всех этапах эксплуатации. Основные расчётные случаи относятся к выведению на орбиту и входу в плотные слои атмосферы и посадке. Элемент наружной поверхности ЛА испытывает следующие воздействия: перегрузки, силы инерции со стороны смежной конструкции, давление со стороны набегающего потока или внутренних объёмов ЛА. Основные механические нагрузки можно привести к следующим:

- сжимающая сила, приложенная к одной из граней;
- изгибающий момент, приложенный к одной из граней;
- избыточное давление с наружной стороны одной из обшивок панели.

Нагрузки могут быть приложены в комбинации при температуре панели в диапазоне от близкой к нормальной до максимальной рабочей.

Кинематические граничные условия при анализе НДС трёхслойной панели должны учитывать наличие смежной конструкции и её жёсткости. На настоящем этапе исследований ЛА, использующий панель, не конкретизирован, его конструкция неизвестна. Рассмотрено несколько вариантов закрепления при выполнении численных экспериментов. Для иллюстрации предлагаемого подхода выбрано два характерных расчётных случая с двумя вариантами кинематических граничных условий при нормальной температуре и линейной постановке задачи.

Первый расчётный случай — чистый изгиб панели, вызванный моментами вокруг оси  $x$  на гранях Б и Г (см. рис. 1).

Второй расчётный случай — избыточное внешнее давление на наружной поверхности верхней обшивки панели, все боковые грани которой заделаны.

В каждом из расчётных случаев для большого числа вариантов трёхслойной панели, отличающихся высотой заполнителя  $h_c$ , размером регулярной ячейки  $a_x$  и параметром  $b_x$ , ставится несколько задач. Во-первых, необходимо определить НДС панели, во-вторых, коэффициенты запаса по прочности в самых нагруженных точках обшивок и гофры. Третья задача — оценить влияние характеристик панели на показатели прочности и массового совершенства конструкции. В данном исследовании в качестве характеристик используем геометрические параметры  $h_c$ ,  $a_x$  и  $b_x$ . Сравним массовое совершенство вариантов панелей по численному критерию. Критерий включает в себя коэффициент запаса по прочности и поверхностную плотность конструкции.

### Критерии оценки массового совершенства и сравнения вариантов панелей

Как уже отмечалось, для конструкций аэрокосмической техники важно массовое совершенство, критерием которого часто выступают масса  $M$  или вес конструкции  $g_0M$  [10, 11], где  $g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения на уровне Земли. В работах [8, 12] при сравнении панелей используют параметры "кажущаяся плотность"  $\rho_V = M/V$ ,  $\text{кг/м}^3$ , и "поверхностная плотность"  $\rho_A = M/S$ ,  $\text{кг/м}^2$ . Данные параметры показательны при сравнении готовых вариантов конструкций, но не при проектном анализе. Для такого анализа предлагали иные критерии. В частности, в работе [11] сравнивали процентное изменение массы и процентное изменение запаса по прочности при изменении высоты заполнителя. Можно обобщить и развить известные подходы к оценке массового совершенства и сравнению материалов с точки зрения их прочности и веса. Для трёхслойных панелей используем показатель "удельная прочность трёхслойного материала".

Этот размерный показатель позволяет сравнить варианты конструкции и оценить эффективность изменений. Удельная прочность трёхслойного материала  $\eta$  содержит показатели прочности и плотность, как и классическая удельная прочность. Количественно  $\eta$  определим по соотношению

$$\eta = \frac{nf}{g_0\rho_A}, \quad (1)$$

где  $n$  — безразмерный коэффициент запаса по прочности конструкции при воздействии нагрузки величиной  $f$ . В роли  $f$  могут выступать погонная растягивающая/сжимающая сила, погонный изгибающий момент или внешнее давление на одну из обшивок. Представленное определение удельной

прочности трёхслойного материала имеет под собой обоснование.

Во-первых, в трёхслойной панели в конструктивных элементах можно использовать разные материалы, характеризующиеся разными критериями разрушения. Для каждого из конструктивных элементов должна быть оценена своя величина  $n$ , соответствующая применимой теории прочности. В многоразовом ЛА достижение предельного состояния хотя бы в одной области одного элемента конструкции, обшивки или заполнителя эквивалентно предельному состоянию всей панели. Поэтому для соотношения (1) необходимо выбирать наименьшее  $n$  из определённых для элементов панели.

Во-вторых, произведение  $nf$  (предельная нагрузка), позволяет уйти при сравнении вариантов панелей от числовых значений внешней нагрузки и напряжений в элементах. Нагрузка  $f$  не зависит от конструкции панели и её размеров для рассматриваемых расчётных случаев и вариантов панели. Отметим, что механические напряжения в панели пропорциональны  $f$ , а коэффициенты запаса по прочности  $n$  обратно пропорциональны  $f$ . Тогда произведение  $nf$  не зависит от числовой величины  $f$ .

В-третьих, из всех массовых характеристик трёхслойного материала именно поверхностный вес панели  $g_0\rho_A$  наиболее информативен для корпусных панелей ЛА. Геометрию ЛА выбирают до проектирования корпусных панелей. Она определяет и устанавливает площадь, закрываемую панелями. Чтобы оценить вес корпусных панелей и их вклад в полный вес ЛА, остаётся оперировать только поверхностным весом панелей.

Важно отметить, что параметр "удельная прочность трёхслойного материала" определяют индивидуально для каждого вида механического воздействия, кинематических граничных условий и температурных полей в конструкции.

Удельная прочность трёхслойного материала, определённая указанным способом, позволяет количественно сравнить увеличение или уменьшение напряжений в элементах панели с уменьшением или увеличением её массы при изменении конструктивных параметров. Рост значения удельной прочности соответствует меньшей массе панели при равных механических напряжениях в них или меньшим напряжениям и большему запасу по прочности при той же массе. Чем больше значение удельной прочности трёхслойного материала панели, тем он предпочтительнее. Удельная прочность трёхслойного материала при действии сжимающей или растягивающей силы имеет размерность  $\text{м}$ , при действии изгибающего момента —  $\text{м}^2$ , при действии давления — единицы.

Удельная прочность трёхслойного материала имеет геометрическую интерпретацию для некоторых видов нагрузки. Для наглядности рассмотрим частный случай, когда вся панель выполнена из однородного изотропного материала постоянной толщины  $h$ . Пусть плотность материала  $\rho$ , а прочность самого материала оценивается по пределу прочности  $\sigma_L$ .

Рассмотрим ситуацию с погонной растягивающей силой  $f$  вдоль оси  $y$  (см. рис. 1) и закреплённым торцом  $y = 0$ . Тогда соотношение (1) будет определено следующим образом:

$$\eta = \frac{nf}{g_0 \rho_A} = \frac{\frac{\sigma_L}{(fL_x / hL_x)} f}{g_0 \frac{\rho h L_x L_y}{L_x L_y}} = \frac{\sigma_L h}{g_0 \rho h} = \frac{\sigma_L}{g_0 \rho}. \quad (2)$$

Представленное выражение соответствует классическому определению удельной прочности материала. Теперь нагрузим панель собственным весом, направив  $g_0$  вдоль оси  $y$  (см. рис. 1). Удельная прочность трёхслойного материала  $\eta$  имеет размерность  $m$  при действии растягивающей силы. Назначим  $\eta = L_y^*$  и умножим левую и правую части выражения (2) на площадь боковой грани Б панели  $S_y = L_x h$ :

$$L_y^* L_x h = \frac{\sigma_L L_x h}{g_0 \rho} \Rightarrow g_0 \rho V = \sigma_L S_y \Rightarrow g_0 M = \sigma_L S_y.$$

Левая часть последнего равенства — вес панели. Правая часть равенства — это предельная сила, растягивающая панель. Соответственно  $\eta = L_y^*$  — предельная длина панели, которая не разрушается под собственным весом в однородном гравитационном поле.

Рассмотрим нагружение панели погонным изгибающим моментом  $f$ , действующим вокруг оси  $x$  на грани Г (см. рис. 1). Также заделаем панель вдоль торца  $y = 0$ . Тогда соотношение (1) будет определено следующим образом:

$$\eta = \frac{nf}{g_0 \rho_A} = \frac{\frac{\sigma_L}{\left(fL_x / \frac{1}{6} L_x h^2\right)} f}{g_0 \frac{\rho h L_x L_y}{L_x L_y}} = \frac{\sigma_L h^2}{6 g_0 \rho h} = \frac{\sigma_L h}{6 g_0 \rho}. \quad (3)$$

Теперь нагрузим панель собственным весом, направив  $g_0$  вдоль оси  $z$  (см. рис. 1). Удельная прочность трёхслойного материала  $\eta$  имеет размерность  $m^2$  при действии изгибающего момента. Назначим  $\eta = L_y^{*2} / 2$  и умножим левую и правую

части выражения (3) на площадь боковой грани Б панели  $S_y = L_x h$ :

$$\begin{aligned} \frac{L_y^{*2} L_x h}{2} &= \frac{\sigma_L L_x h^2}{6 g_0 \rho} \Rightarrow \frac{g_0 \rho L_y^{*2} L_x h}{2} = \\ &= \sigma_L \frac{L_x h^2}{6} \Rightarrow g_0 M \frac{L_y^*}{2} = \sigma_L \frac{L_x h^2}{6}. \end{aligned}$$

Левая часть последнего равенства — изгибающий момент от веса конструкции у закреплённого торца. Правая часть — это предельный момент, изгибающий панель. Соответственно  $\eta = L_y^{*2} / 2$  — половина предельной площади квадратной консоли закреплённой панели, которая ещё не разрушается под собственным весом в однородном гравитационном поле.

### Подход к проведению численных экспериментов

Вычислению удельной прочности трёхслойного материала предшествует определение НДС панели в расчётных случаях для каждого из вариантов конструкции. Выбор подхода и метода анализа НДС не принципиален при выбранной цели исследования. Тем не менее инструменты анализа НДС в значительной степени определяют трудоёмкость и применимость на практике. Поэтому выбору метода анализа НДС трёхслойной панели уделим особое внимание.

Геометрическая сложность конструкции трёхслойных панелей с неомогенным наполнителем и обилие внутренних сопряжений затрудняют получение аналитических решений при анализе НДС. Тем не менее такие методики были разработаны и представлены в многочисленных трудах. В частности, подходы аналитического и полуаналитического плана содержатся в работах [5—8, 10, 12, 13]. Не меньшую популярность получили приближённые методы, прежде всего метод конечных элементов (МКЭ) [11, 13—17]. Значительная часть исследований [9, 11—16] ориентирована только на один вид наполнителя, например шестигранные соты, прямоугольные гофру, сплошной или трубчатый наполнитель. Авторы исследования получили собственный опыт анализа НДС трёхслойных панелей аналитическими методами, описанными в [5—8], и приближёнными методами. Для панелей, размер которых в плане сопоставим с размерами регулярной ячейки, значительно более точные результаты получаются при использовании МКЭ. Чтобы снизить трудоёмкость создания большого числа конечно-элементных моделей вариантов панелей, авторами исследования разработан алгоритм автоматической генерации моделей, кинема-



тических и силовых граничных условий, расчётных случаев и предварительного анализа результатов. Алгоритм реализован в виде кода на языке программирования современной САЕ среды Siemens Femap с её решателем и интерфейсами пре- и постпроцессинга. В работе [17] использовали похожий подход. Он позволит в будущем проводить анализ НДС трёхслойных панелей с учётом крепёжных элементов и смежного конструктива.

### Анализ напряженно-деформированного состояния конструкции в расчётных случаях

С помощью разработанных алгоритма и программного кода создан ряд конечно-элементных моделей, отличающихся параметрами гофрового заполнителя в указанных диапазонах. Также автоматически был выполнен анализ НДС в расчётных случаях, вычислены массовые параметры панелей и величины удельной прочности трёхслойного материала. Результаты представлены на рис. 2—5.

Расчёты показали, что напряжения  $\sigma_y$  определяют наименьший коэффициент запаса по прочности. Поэтому эти напряжения и приведены как  $\sigma$  на рис. 2—5.

Для панели, нагруженной изгибающим моментом, максимальные абсолютные напряжения (рис. 2) монотонно возрастают при увеличении размера регулярной ячейки в плане и монотонно убывают при стремлении формы гофрового заполнителя к прямоугольной.

Характер зависимости удельной прочности трёхслойного материала аналогичен. При увеличении высоты заполнителя (рис. 3) напряжения монотонно убывают, а удельная прочность трёхслойного материала монотонно возрастает. Представленные результаты демонстрируют, что удельная прочность трёхслойного материала, определяемая по обшивке, в большей степени зависит от высоты заполнителя, чем от размера регулярной ячейки в плане и ширины области приоткрытия гофры к обшивке.

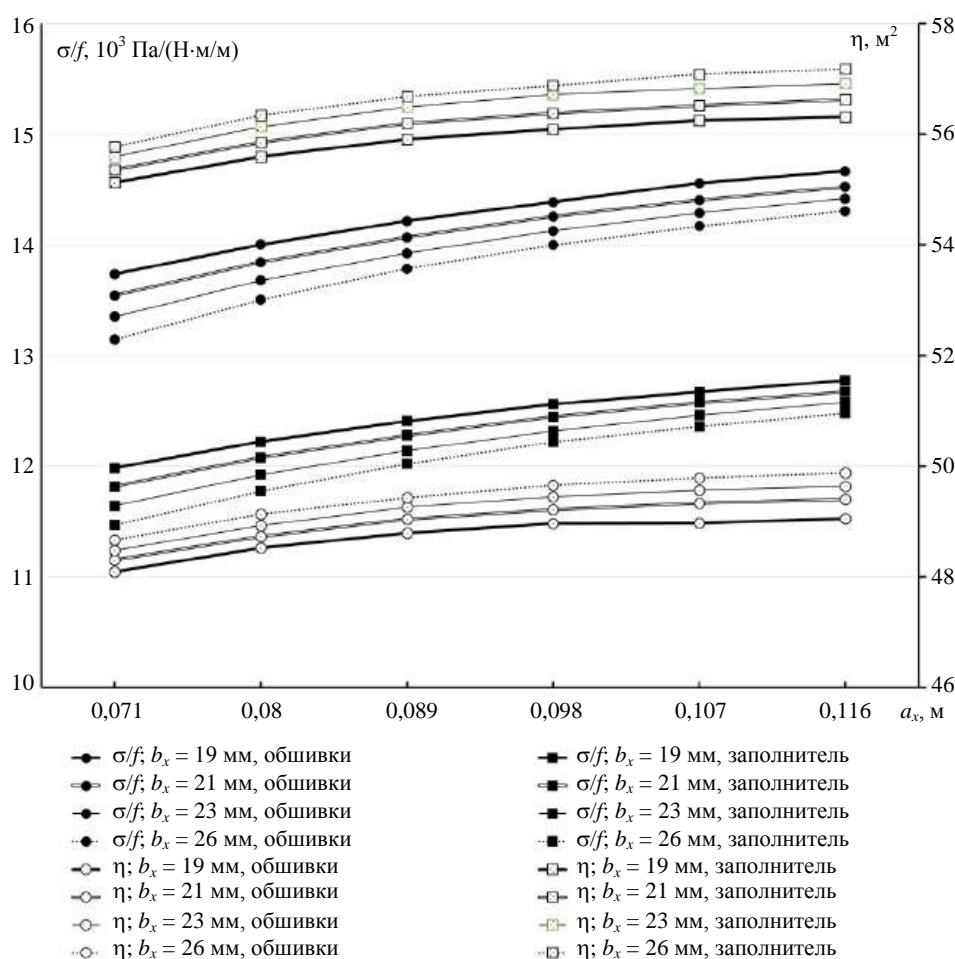


Рис. 2. Зависимость напряжений и удельной прочности трёхслойного материала при изгибе от абсолютных размеров профиля однонаправленного гофрового заполнителя

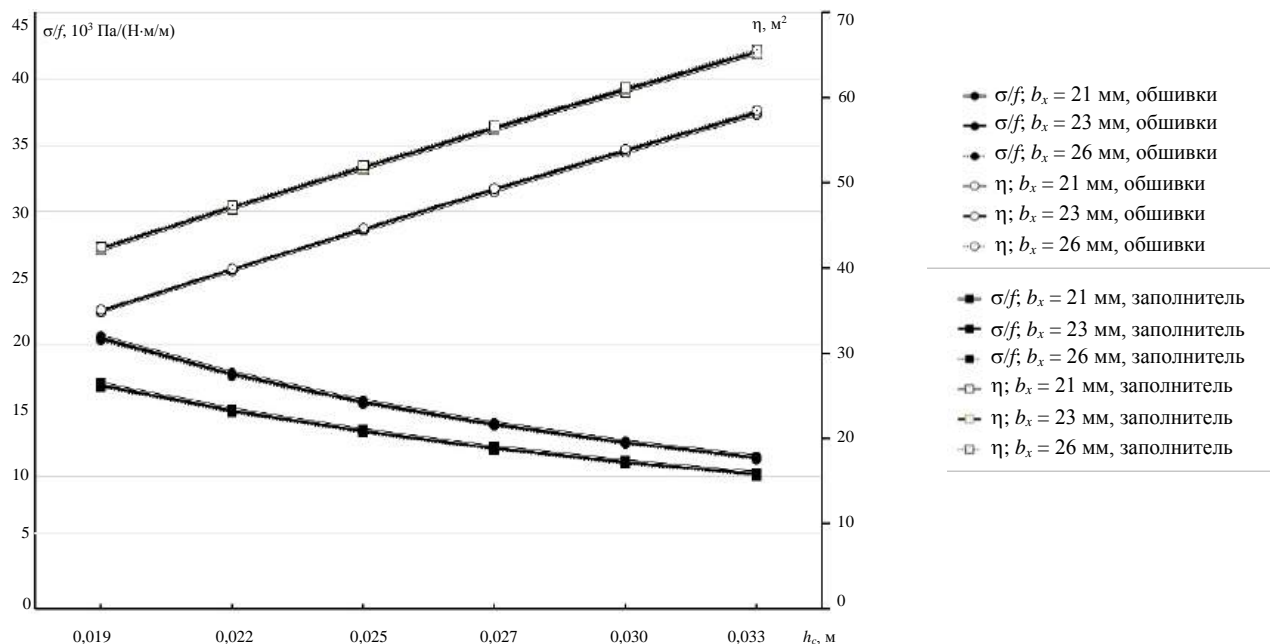


Рис. 3. Зависимость напряжений и удельной прочности трёхслойного материала при изгибе от ширины ячейки и высоты однонаправленного гофрового заполнителя

При нагружении избыточным внешним давлением характер зависимостей сложнее. Максимальные абсолютные напряжения в обшивках (рис. 4) монотонно возрастают при увеличении размера в плане регулярной ячейки, монотонно возрастают при стремлении её формы к треугольной и, как и ожидалось, практически не зависят от высоты заполнителя (рис. 5). Напряжения в заполнителе уменьшаются при стремлении формы гоф-

ры к прямоугольной, при увеличении высоты заполнителя и немонотонно зависят от размера регулярной ячейки в плане. Наибольшая удельная прочность трёхслойного материала достигается при малом размере в плане регулярной ячейки и малой ширине области примыкания гофры к обшивке. В этом случае она определяется по заполнителю, в остальных случаях — по обшивкам.

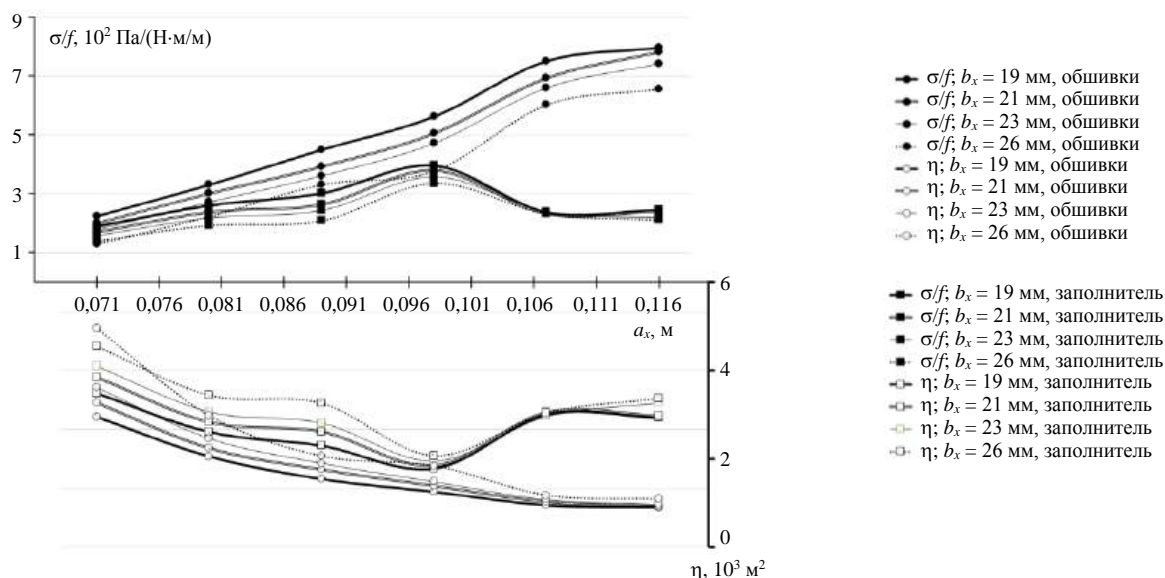


Рис. 4. Зависимость напряжений и удельной прочности трёхслойного материала при нагружении избыточным внешним давлением со стороны одной из обшивок от абсолютных размеров профиля однонаправленного гофрового заполнителя

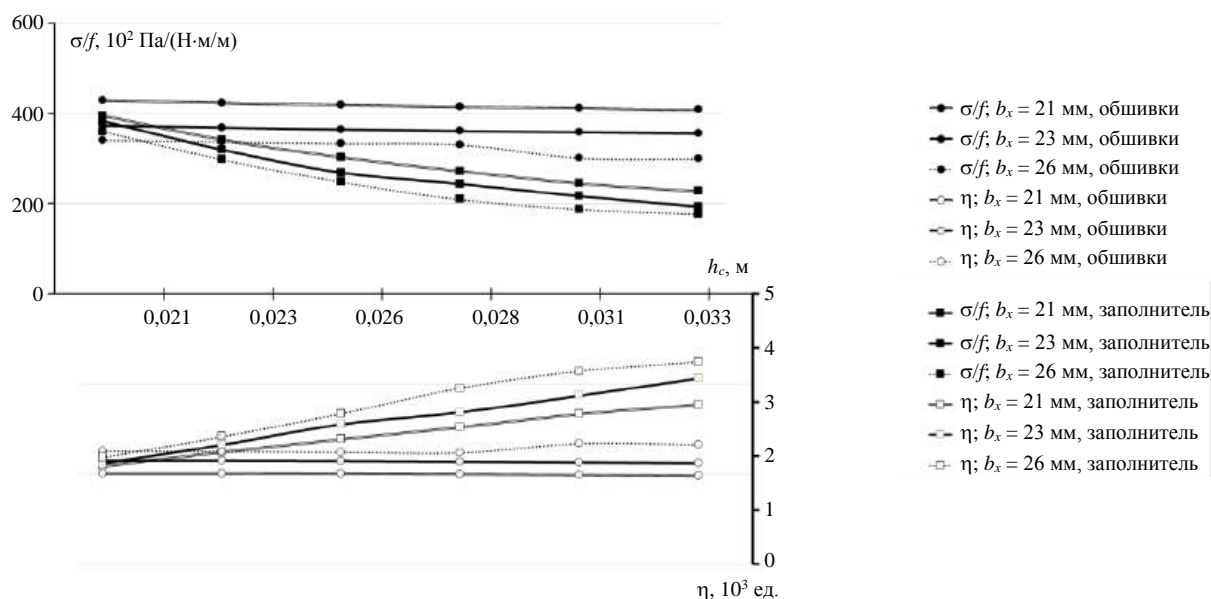


Рис. 5. Зависимость напряжений и удельной прочности трёхслойного материала при нагружении избыточным внешним давлением со стороны одной из обшивок от ширины ячейки и высоты однонаправленного гофрового заполнителя

### Заключение

Проектирование оптимальной трёхслойной панели для многоразового ЛА необходимо проводить, располагая полной информацией о силовых и тепловых нагрузках, механических интерфейсах, технологических и дополнительных ограничениях. Предложенный подход к оценке влияния параметров панели на показатели прочности и массовой эффективности может быть полезен при проектировании. Для объективного сравнения конструктивных вариантов панелей предложен параметр "удельная прочность трёхслойного материала". Разработаны алгоритм и программа автоматического создания математических моделей трёхслойных панелей с различными заполнителями, позволяющие снизить трудоёмкость процесса анализа НДС и сравнения вариантов панелей. Первые полученные результаты позволили для рассмотренных расчётных случаев и диапазона варьируемых параметров сделать некоторые заключения:

- зависимость напряжений и удельной прочности трёхслойного материала от величин конструктивных параметров определяется множеством параметров и может иметь монотонный, немонотонный или индифферентный характер;
- разные виды внешних нагрузок могут диктовать противоположные требования к изменению параметров конструкции трёхслойной панели для улучшения её массовой эффективности. Перед проектированием необходимо определить внешние нагрузки и закрепление;
- наибольшие абсолютные напряжения и наименьшие удельные прочности трёхслойного

материала могут достигаться как в обшивках, так и в заполнителе. Возможны ситуации, когда коэффициенты запаса по прочности в обшивках и заполнителе одинаковы.

В рамках дальнейших исследований авторы планируют расширить количество варьируемых конструктивных параметров и их диапазоны, создать соответствующие им математические модели панелей, провести анализ НДС в ряде эксплуатационных расчётных случаев и выработать рекомендации по рациональному изменению параметров трёхслойных панелей в процессе проектирования. Разработанные и изготовленные с учётом сформулированных рекомендаций трёхслойные панели из УККМ планируется подвергнуть тепломеханическому нагружению в целях проверки расчётных моделей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Bansal N. P., Lamon J.** Ceramic Matrix Composites: Materials, Modeling and Technology: ISBN: 978-1-118-23116-6, November 2014. — 712 p.
2. **Тимофеев П. А., Тимофеев И. А., Богачев Е. А., Тимофеев А. Н.** Современные подходы к изготовлению керамоматричных композиционных материалов для длительной эксплуатации при температурах выше 1000 °C. Обзор мирового опыта и возможности АО "Композит": сб. мат. Междунар. науч.-практ. конф. "Ключевые тренды в композитах: наука и технологии". 2019. С. 710—716.
3. **Lacombe A., Bonnet C.** Ceramic Matrix Composites, key materials for future space planes technologies: AIAA Second international aerospace planes Conference. Orlando, 1990. P. 48—62.
4. **Kessler S., Matuszeski T., McManus H.** Cryocycling and mechanical testing of CFRP for the X-33 liquid H<sub>2</sub> fuel tank structure: Proceedings of the ASC-2001 16th Annual Technical Conference, Blacksburg, VA, USA, September 9—12. 2001. Blacksburg: American Society for Composites. 2001. P. 9—12.

5. **Васильев В. В.** Механика конструкций из композиционных материалов. — М.: Машиностроение, 1988. — 272 с.
6. **Ko W. L., Jackson R. H.** Combined Compressive and Shear Buckling Analysis of Hypersonic Aircraft Structural Sandwich Panels: NASA Technical Memorandum 4290. NASA.: Office of Management, Scientific and Technical Information Division, 1991. — 38 p.
7. **Libove C., Batdorf S. B.** General Small-Deflection Theory for Flat Sandwich Plates: NASA TN-1526, 1948. — 24 p.
8. **Кобелев В. Н., Коварский Л. М., Тимофеев С. И.** Расчёт трёхслойных конструкций: Справочник. — М.: Машиностроение, 1984. — 304 с.
9. **Heidenreich B., Gottschalk N., Klett Y., Reimer T., Koch T.** C/C-SiC Sandwich Structures for Lightweight TPS and Hot Structures: Proceeding of the 8th European Workshop on Thermal Protection Systems and Hot Structures. Noordwijk, Netherlands, April 19—22. 2016. Noordwijk: ESA, 2016. P. 2—22.
10. **Смердов А. А., Шон Ф. Т.** Анализ эффективности оптимальных композитных оболочек многостеночной и трехслойной схем для отсеков ракет-носителей и разгонных блоков // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 3. С. 58—65.
11. **Tiwari N. D.** Analysis of honeycombed sandwiched panels: thesis ... B.tech. degree in civil engineering. Vellor, India, 2017.
12. **Тестоедов Н. А., Наговицын В. Н., Пермяков М. Ю.** Применение трёхслойных сотовых конструкций в космических аппаратах // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17. № 1. С. 200—211.
13. **Rosdal A.** Analysis and Optimization of Sandwich Panels: thesis ... M. tech. degree in engineering design. Narvik, Norway, 2017.
14. **Смердов А. А., Шон Ф. Т.** Расчетный анализ и оптимизация многостеночных композитных несущих оболочек // Изв. вузов. Машиностроение. 2014. № 11. С. 90—98.
15. **Хайруллин Л. Р.** Несущая способность трёхслойных панелей с металлическими обшивками и технологическими стыками среднего слоя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань. 2012.
16. **Наливкин Е. В., Шетько Е. В.** Математическая модель облегчённого щита с бумажным сотовым наполнителем, работающая на изгиб // Труды БГУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2015. № 2. С. 146—151.
17. **Catapano A., Montemurro M.** Optimal design of sandwich plates with honeycomb core: Special Issue "Current and Future Developments of Composites Materials: Design, Modelling and Manufacturing Technologies" Conference paper. 16<sup>th</sup> European Conference on Composite materials. Seville, Spain, June 22—26. 2014. Seville: MDPI, 2014. P. 1—8.

## Evaluation of design parameters influence on the effective strength characteristics of C-SiC sandwich panels

V. V. MURAVYEV, E. P. ARTEMOVA

JSC Institute of Composite Technologies, Moscow, Russia

B. S. SARBAEV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

I. A. TIMOFEEV

JSC "Kompozit", Korolev, Moscow region, Russia

*In this article authors propose the method of strength and mass efficiency estimations for C-SiC sandwich panels manufactured for reusable space vehicles frames. The typical analysis cases for the panels are presented. The specific characteristic is proposed to compare panel designs. The use of the specific characteristic is demonstrated on the set of sandwich panels which differ in their core geometry parameters. The stress-strain state is obtained for these panels in the typical analysis cases and influence of the core geometry parameters is estimated.*

**Keywords:** sandwich panels, effective strength of sandwich materials, C-SiC materials, space vehicles.



## Моделирование неупругого динамического поведения цилиндрических армированных оболочек при учете зависимости пластических свойств от скорости деформирования

А. П. ЯНКОВСКИЙ, д-р физ.-мат. наук

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*Сформулирована задача неупругого динамического поведения гибких армированных цилиндрических оболочек. Механическое поведение компонентов композиции описывается уравнениями теории пластического течения при учете чувствительности пластических свойств к скорости деформирования (упруговязкопластичность). Геометрическая нелинейность задачи учитывается в приближении Кармана. Возможное ослабленное сопротивление армированных оболочек поперечным сдвигам моделируется в рамках неклассической теории Амбарцумяна. Численное решение поставленной начально-краевой задачи определяется по явной схеме "крест". Исследовано упругопластическое и упруговязкопластическое динамическое деформирование стеклопластиковых и металлокомпозитных длинных замкнутых цилиндрических оболочек разной относительной толщины. Продemonстрировано, что неучет чувствительности пластических свойств материалов композиции к скорости их деформирования (упругопластичность) приводит к значительному увеличению расчетных значений интенсивности деформаций компонентов композиции и к существенному искажению функции прогибов, особенно для металлокомпозитных изделий. Показано, что замена традиционной структуры армирования в продольном и окружном направлениях на пространственную 4D-структуру приводит к положительному эффекту только в случае относительно толстых стеклопластиковых оболочек. Этот эффект возрастает при уменьшении длины такой конструкции.*

**Ключевые слова:** замкнутые цилиндрические оболочки, пространственное армирование, неупругое деформирование, чувствительность к скорости деформирования, теория Амбарцумяна, динамические нагрузки, численная схема "крест".

Армированные цилиндрические оболочки находят все более широкое применение в различных изделиях [1—10], причем часто они могут испытывать высокоинтенсивное кратковременное нагружение [6, 9, 10], при котором компоненты композиции деформируются пластически [6, 9]. Следовательно, актуальной является проблема моделирования неупругого динамического поведения цилиндрических оболочек из композиционных материалов (КМ). Несмотря на ее важность, теоретические исследования, выполненные в этом направлении, немногочисленны [11—13]. В подавляющем большинстве публикаций исследуется лишь упругое поведение КМ-конструкций [1—3, 6—10]. В работе [6] моделировалось упругопластическое динамическое деформирование слоистых оболочек с изотропными слоями, а в [14] теоретически исследовалось аналогичное поведение

армированных оболочек. Однако в [6, 14] не учитывалась зависимость упругого или пластического поведения компонентов композиции от скорости их деформирования. В работе [15] учтены вязкие свойства при упругом деформировании материалов композиции цилиндрических оболочек, что позволило определить остаточные состояния таких конструкций после их неупругого динамического деформирования. В [16] моделировалось неупругое динамическое поведение армированных оболочек при учете зависимости пластических свойств компонентов композиции от скорости их деформирования. Согласно терминологии, принятой в [17], такое механическое поведение материала называют упруговязкопластическим. До настоящего времени упруговязкопластическое динамическое деформирование цилиндрических армированных оболочек не исследовалось.

Для описания волновых процессов, возникающих в динамически нагружаемых тонкостенных КМ-конструкциях, традиционно используют неклассические теории их изгибного деформирования: теорию Тимошенко–Рейсснера [2, 6, 8, 9], теорию Амбарцумяна [1, 14—16] или теорию Ред-

**Янковский Андрей Петрович**, ведущий научный сотрудник лаборатории "Физика быстропротекающих процессов".  
E-mail: lab4nemir@rambler.ru; yankovsky\_ap@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 12 марта 2021 г.

© Янковский А. П., 2022

ди—Немировского [3, 7]. Для устранения такого негативного явления, как плохое сопротивление изгибаемым тонкостенным конструкциям, армированным по эквидистантным поверхностям, поперечным сдвигам, используют пространственные структуры армирования [18].

Численные решения нелинейных динамических задач для тонкостенных КМ-конструкций, как правило, получают с помощью явной схемы "крест" [6, 14—16] или неявного метода Ньюмарка [19, 20].

Настоящее исследование посвящено математическому моделированию упруговязкопластического деформирования гибких армированных цилиндрических оболочек при их интенсивном кратковременном нагружении. Численное интегрирование сформулированной начально-краевой задачи осуществляется с использованием явной схемы "крест".

### Постановка задачи

Рассмотрим замкнутую круговую цилиндрическую оболочку длиной  $L$ , радиусом  $R$  и толщиной  $2h \ll \min(L, R)$  (рис. 1), с которой свяжем цилиндрическую систему координат  $x_i$  так, что  $x_1$  — осевая (продольная) координата ( $0 \leq x_1 \leq L$ ),  $x_2$  — окружная (угловая) координата ( $0 \leq x_2 < 2\pi$ ),  $x_3$  — радиальная координата ( $R - h \leq x_3 \leq R + h$ ).

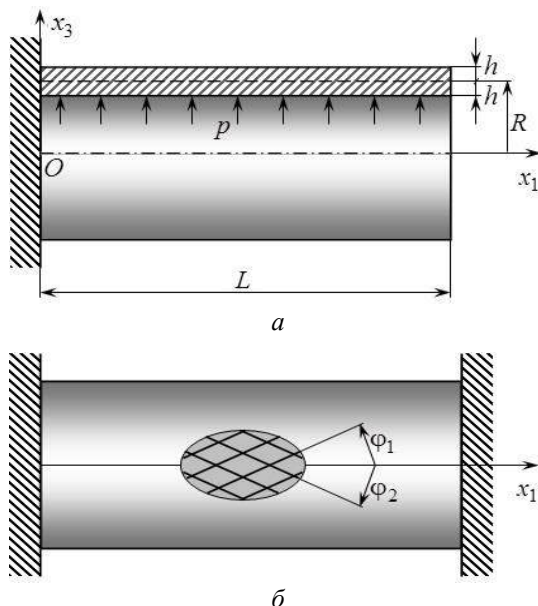


Рис. 1. Замкнутые круговые цилиндрические КМ-оболочки с жестким закреплением левой кромки (а) и с жестким закреплением обеих кромок (б)

Конструкция усилена перекрестно по эквидистантным цилиндрическим поверхностям или

пространственно  $K$  семействами волокон с интенсивностями армирования  $\omega_k$  ( $1 \leq k \leq K$ ). Структура армирования по толщине оболочки однородна. На рис. 2, а изображена традиционная продольно-окружная структура 2D-армирования ( $K = 2$ ) репрезентативной ячейки композиции [18, 21], а на рис. 2, б — пространственная структура с армированием в четырех ( $K = 4$ ) направлениях [11].

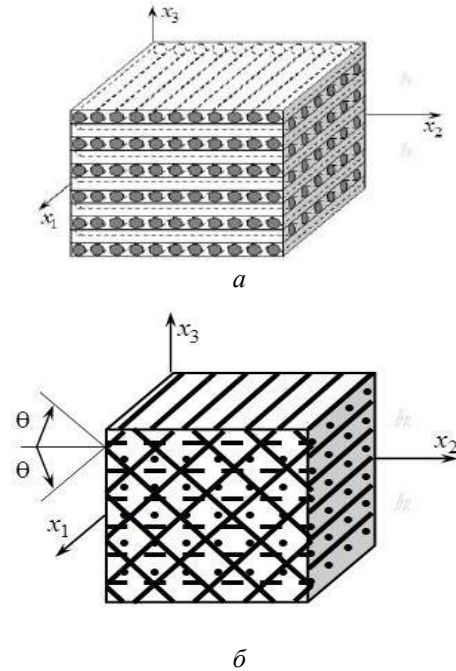


Рис. 2. Репрезентативная ячейка КМ-конструкции с ортогональной 2D-структурой армирования по эквидистантным поверхностям (а) и с пространственной 4D-структурой армирования (б)

С каждым  $k$ -м семейством волокон свяжем локальную прямоугольную систему координат  $x_i^{(k)}$ : ось  $x_1^{(k)}$  ориентируем вдоль арматуры, и зададим ее направление углами сферической системы координат  $\theta_k$  и  $\varphi_k$  (рис. 3). Направляющие косинусы  $l_{ij}^{(k)}$  между осями локальной  $x_i^{(k)}$  и глобальной  $x_j$  ( $i, j = \overline{1, 3}$ ) систем координат вычисляются по формулам (2.12) из [22].

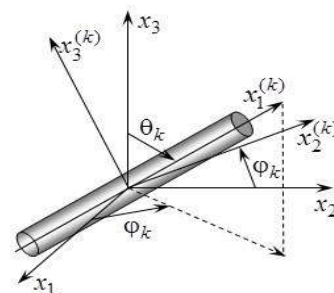


Рис. 3. Локальная прямоугольная система координат, связанная с арматурой  $k$ -го семейства

Для учета возможного слабого сопротивления КМ-оболочки поперечным сдвигам используем неклассическую теорию Амбарцумяна [1]. При этом по тем же причинам, что и в [16, 22], будем предполагать, что касательные внешние силы на лицевых поверхностях конструкции можно не учитывать, а структура пространственного армирования должна обладать следующими свойствами: при наличии некоторого  $k$ -го наклонного семейства волокон ( $0 < \theta_k < \pi/2$ ) обязательно должно присутствовать и некоторое  $l$ -е наклонное семейство волокон, выполненное из того же материала и имеющее параметры армирования  $\theta_l = \pi - \theta_k$ ,  $\varphi_l = \varphi_k$  и  $\omega_l = \omega_k$ ,  $1 \leq k, l \leq K$ ,  $l \neq k$  (см. рис. 3). Такие структуры пространственного армирования часто встречаются в приложениях [18]. К ним относятся ортогональные структуры армирования в трех направлениях, а также структуры, аналогичные изображенной на рис. 2, б.

При выполнении указанных предположений согласно [14] осредненные деформации композиции  $\varepsilon_{ij}$  и перемещения  $U_i$  точек гибкой цилиндрической КМ-оболочки при учете изменения метрики по ее толщине в рамках теории Амбарцумяна аппроксимируются соотношениями (геометрическая нелинейность учитывается в приближении Кармана)

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11}(t, \mathbf{r}) &= \partial_1 u_1 - z \partial_1^2 w + f_1^0(z) \partial_1 \varepsilon_{13}^0 + 0,5(\partial_1 w)^2; \\ \varepsilon_{22}(t, \mathbf{r}) &= (R+z)^{-1} \times \\ &\times [(R+z) R^{-1} \partial_2 u_2 + \partial_2^2 w + w + f_2^0(z) \partial_2 \varepsilon_{23}^0] + \\ &+ 0,5(R+z)^{-2} (\partial_2 w)^2; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} 2\varepsilon_{12}(t, \mathbf{r}) &= (R+z)^{-1} \times \\ &\times [\partial_2 u_1 - z \partial_1 \partial_2 w + f_1^0(z) \partial_2 \varepsilon_{13}^0] + (R+z) R^{-1} \partial_1 u_2 + \\ &+ \partial_1 \partial_2 w + f_2^0(z) \partial_1 \varepsilon_{23}^0 + (R+z)^{-1} \partial_1 w \partial_2 w; \\ \varepsilon_{i3}(t, \mathbf{r}) &= h^{-2} (h^2 - z^2) \varepsilon_{i3}^0(t, \mathbf{x}), \quad i=1, 2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_1(t, \mathbf{r}) &= u_1(t, \mathbf{x}) - z \partial_1 w + f_1^0(z) \varepsilon_{13}^0(t, \mathbf{x}); \\ U_2(t, \mathbf{r}) &= (R+z) R^{-1} u_2(t, \mathbf{x}) + \partial_2 w + \\ &+ f_2^0(z) \varepsilon_{23}^0(t, \mathbf{x}); \\ U_3(t, \mathbf{r}) &= w(t, \mathbf{x}); \quad \mathbf{x} = \{x_1, x_2\}; \quad \mathbf{r} = \{x_1, x_2, x_3\}; \\ x_3 &\equiv R+z; \quad \mathbf{x} \in G; \quad |z| \leq h; \quad t \geq t_0; \\ G &= \{\mathbf{x}: 0 \leq x_1 \leq L, \quad 0 \leq x_2 < 2\pi\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} f_i^0(z) &\equiv 2h^{-2} [h^2 \Phi_i^{(0)}(z) - \Phi_i^{(2)}(z)] \quad (i=1, 2); \\ \Phi_1^{(l)}(z) &\equiv h^{-l} (1+k)^{-1} z^{l+1}; \\ \Phi_2^{(l)}(z) &\equiv h^{-l} (R+z) \Psi_l(z); \\ \Psi_l(z) &\equiv \sum_{m=0}^{l-1} \frac{(-1)^m R^m z^{l-m}}{l-m} - R^l \ln(R+z), \quad l=0, 2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $w$  — прогиб точек срединной поверхности ( $z=0$ );  
 $u_1, u_2$  — продольное и окружное перемещения точек той же поверхности;  
 $\varepsilon_{i3}^0$  — деформации поперечных сдвигов в точках той же поверхности;  
 $\mathbf{r}$  — вектор места;  
 $\mathbf{x}$  — то же для точек отсчетной поверхности ( $z=0$ );  
 $z$  — введенная для удобства новая радиальная координата, отсчитываемая от срединной поверхности;  
 $t_0$  — начальный момент времени  $t$ ;  
 $G$  — область, занимаемая отсчетной поверхностью в координатах  $x_1, x_2$ ;  
 $\partial_i$  — оператор частного дифференцирования по координате  $x_i$  ( $i=1, 2$ ).

В выражениях (1) и (2) при учете (3) неизвестными являются функции  $w$ ,  $u_i$  и  $\varepsilon_{i3}^0$  ( $i=1, 2$ ), которые зависят от времени  $t$  и только двух пространственных переменных:  $x_1$  и  $x_2$ .

В данной работе цилиндрическая оболочка рассматривается в качестве гибкой тонкостенной механической системы, поэтому с приемлемой для практических приложений точностью напряжение  $\sigma_{33}(t, \mathbf{r})$  можно линейно аппроксимировать по поперечной координате  $z$  [2]:

$$\begin{aligned} \sigma_{33}(t, \mathbf{r}) &= \frac{\sigma_{33}^{(+)}(t, \mathbf{x}) - \sigma_{33}^{(-)}(t, \mathbf{x})}{2h} z + \\ &+ \frac{\sigma_{33}^{(+)}(t, \mathbf{x}) + \sigma_{33}^{(-)}(t, \mathbf{x})}{2}, \quad \mathbf{x} \in G, \quad |z| \leq h, \quad t \geq t_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\sigma_{33}^{(\pm)}(t, \mathbf{x}) \equiv \sigma_{33}(t, \mathbf{x}, \pm h)$  — нормальные напряжения на внутренней (–) и внешней (+) лицевых поверхностях конструкции, известные из силовых граничных условий.

Уравнения движения гибкой цилиндрической КМ-оболочки при учете соотношений (2)–(4) имеют вид (22) и (23) из [14].

Компоненты композиции оболочки предполагаются изотропными, а их упруговязкопластическое деформирование описано механической моделью в [22]. Используя структурную модель механики композитов из [22], в данный момент времени  $t$  определяющие уравнения для КМ запишем в матричной форме:

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{p}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &\equiv (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23}, \sigma_{31}, \sigma_{12})^T; \\ \boldsymbol{\varepsilon} &\equiv (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, 2\varepsilon_{23}, 2\varepsilon_{31}, 2\varepsilon_{12})^T; \end{aligned} \quad (6)$$

$\boldsymbol{\sigma}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  — векторы-столбцы осредненных напряжений  $\sigma_{ij}$  и деформаций  $\varepsilon_{ij}$  в КМ; шестикомпонентный вектор-столбец  $\mathbf{p}$  и 6×6-матрица  $\mathbf{B}$  определяются матричными равенствами (2.17) в [22], причем их компоненты зависят от механических характеристик материалов композиции, от текущего упруговязкопластического состояния и от структурных параметров (углов  $\theta_k$ ,  $\phi_k$  и плотностей  $\omega_k$  ( $1 \leq k \leq K$ ) армирования); точка — частное дифференцирование по  $t$ ; индекс "Т" — операция транспонирования.

Матричное равенство (5), которое предполагается линеаризованным (см. [22]) по методу переменных параметров упругости [23], — это система шести алгебраических уравнений. Согласно обозначениям (6) из третьего уравнения указанной системы получим

$$\dot{\varepsilon}_{33} = b_{33}^{-1} \left( \dot{\sigma}_{33} - p_3 - b_{31}\dot{\varepsilon}_{11} - b_{32}\dot{\varepsilon}_{22} - 2b_{34}\dot{\varepsilon}_{23} - 2b_{35}\dot{\varepsilon}_{31} - 2b_{36}\dot{\varepsilon}_{12} \right), \quad (7)$$

где  $b_{3i}$  ( $i = \overline{1, 6}$ ) и  $p_3$  — элементы матрицы  $\mathbf{B}$  и вектора-столбца  $\mathbf{p}$  в равенстве (5); производная  $\dot{\sigma}_{33}$  получается путем дифференцирования по времени аппроксимации (4). Скорости деформаций  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  в правой части (7) вычисляются за счет дифференцирования по  $t$  соотношений (1).

Для однозначного интегрирования рассматриваемой динамической задачи необходимо задать граничные и начальные условия (см. соотношения (26)—(31) в [14]).

### Метод расчета

Для численного решения исследуемой задачи используем метод шагов по времени [6, 14—16, 19, 20, 22, 23], т. е. значения неизвестных функции будем вычислять в дискретные моменты времени  $t_{n+1} = t_n + \tau$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ), где  $\tau = \text{const} > 0$  — шаг

по времени. Предполагаем, что при  $t = t_m$  уже определены значения следующих функций [16, 22]:

$$\begin{aligned} w(\mathbf{x}) &\equiv w(t_m, \mathbf{x}); \quad u_l(\mathbf{x}) \equiv u_l(t_m, \mathbf{x}); \\ \sigma_{33}^{(\pm)}(\mathbf{x}) &\equiv \sigma_{33}^{(\pm)}(t_m, \mathbf{x}); \quad \dot{\sigma}_{33}^{(\pm)}(\mathbf{x}) \equiv \dot{\sigma}_{33}^{(\pm)}(t_m, \mathbf{x}); \\ \sigma_{ij}^m(\mathbf{r}) &\equiv \sigma_{ij}(t_m, \mathbf{r}); \quad \sigma_{ij}^{m(k)}(\mathbf{r}) \equiv \sigma_{ij}^{(k)}(t_m, \mathbf{r}); \\ \varepsilon_{ij}^{m(k)}(\mathbf{r}) &\equiv \varepsilon_{ij}^{(k)}(t_m, \mathbf{r}); \quad \dot{\varepsilon}_{ij}^{m(k)}(\mathbf{r}) \equiv \dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)}(t_{n-1}, \mathbf{r}); \\ \ddot{\varepsilon}_{ij}^{m(k)}(\mathbf{r}) &\equiv \ddot{\varepsilon}_{ij}^{(k)}(t_{n-1}, \mathbf{r}); \quad \chi^{(k)}(\mathbf{r}) \equiv \chi^{(k)}(t_m, \mathbf{r}), \\ l &= 1, 2, \quad i, j = \overline{1, 3}; \quad m = n-1, n; \\ 0 &\leq k \leq K; \quad \mathbf{x} \in G; \quad |z| \leq h, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\sigma_{ij}^{(k)}$ ,  $\varepsilon_{ij}^{(k)}$  — компоненты тензоров напряжений и деформаций в  $k$ -м материале композиции ( $k = 0$  — связующее;  $k \geq 1$  — волокна  $k$ -го семейства);

$\chi^{(k)}$  — параметр упрочнения (Одквиста) того же материала.

Производные по времени  $t$  (исключая лишь преобразования, аналогичные соотношениям (2.8) и (2.9) в [22]) аппроксимируем их центральными конечными разностями на трехточечном шаблоне  $\{t_{n-1}, t_n, t_{n+1}\}$  [6, 14—16, 22], что позволит получить явную численную схему типа "крест". После замены в уравнениях динамического равновесия вторых производных по времени от прогиба и обобщенных кинематических переменных их конечно-разностными аналогами при учете (2)—(4) и обозначений, аналогичных (8), получим (см. (38) в [14])

$$\begin{aligned} \frac{2h\rho}{\tau^2} \left( \frac{n+1}{w} - 2 \frac{n}{w} + \frac{n-1}{w} \right) &= \partial_1 \left( M_{13}^{(0)} + M_{11}^{(0)} \partial_1 w + \bar{M}_{12}^{(0)} \partial_2 w \right) + \\ &+ \partial_2 \left( \bar{M}_{23}^{(0)} + \bar{M}_{21}^{(0)} \partial_1 w + \bar{M}_{22}^{(0)} \partial_2 w \right) - \bar{M}_{22}^{(0)} + \sigma_{33}^{(+)} - \sigma_{33}^{(-)}; \\ \frac{\rho}{\tau^2} \left( u_1^{(l)} - 2u_1^{(l)} + u_1^{(l)} \right) &= \partial_1 \left( M_{11}^{(l)} - M_{13}^{(l)} \partial_1 w \right) + \\ &+ \partial_2 \left( \bar{M}_{12}^{(l)} - \bar{M}_{23}^{(l)} \partial_1 w \right) - l M_{13}^{(l-1)} + \\ &+ l M_{33}^{(l-1)} \partial_1 w - h^l \left[ \sigma_{33}^{(+)} - (-1)^l \sigma_{33}^{(-)} \right] \partial_1 w; \end{aligned} \quad (9)$$



$$\begin{aligned} \frac{\rho}{\tau^2} \left( u_2^{(l)} - 2u_2^{(l)} + u_2^{(l-1)} \right) &= \partial_1 \left( M_{21}^{(l)} - \bar{M}_{13}^{(l)} \partial_2 w \right) + \\ &+ \partial_2 \left( \bar{M}_{22}^{(l)} - \bar{M}_{23}^{(l)} \partial_2 w \right) - l M_{23}^{(l-1)} + \\ &+ l \bar{M}_{33}^{(l-1)} \partial_2 w - h^l \times \\ &\times \left[ (R+h)^{-1} \sigma_{33}^{(+)} - (-1)^l (R-h)^{-1} \sigma_{33}^{(-)} \right] \partial_2 w + \bar{M}_{23}^{(l)}; \\ l &= 0, 1; \quad \mathbf{x} \in G; \quad n = 1, 2, 3, \dots, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} M_{ij}^{(l)}(t, \mathbf{x}) &\equiv \int_{-h}^h \sigma_{ij}(t, \mathbf{r}) z^l dz; \quad \bar{M}_{ij}^{(l)}(t, \mathbf{x}) \equiv \\ &\equiv \int_{-h}^h \frac{\sigma_{ij}(t, \mathbf{r})}{R+z} z^l dz; \quad \bar{\bar{M}}_{ij}^{(l)}(t, \mathbf{x}) \equiv \int_{-h}^h \frac{\sigma_{ij}(t, \mathbf{r})}{(R+z)^2} z^l dz; \\ u_m^{(l)}(t, \mathbf{x}) &\equiv \int_{-h}^h U_m(t, \mathbf{r}) z^l dz; \\ \rho &= \rho_0 \omega_0 + \sum_{k=1}^K \rho_k \omega_k; \quad \omega_0 = 1 - \sum_{k=1}^K \omega_k; \\ l M_{33}^{(l-1)}(t, \mathbf{x}) &= l \int_{-h}^h \sigma_{33}(t, \mathbf{r}) z^{l-1} dz = \\ &= \frac{h^l}{2} \left\{ \left( \sigma_{33}^{(+)} + \sigma_{33}^{(-)} \right) \left[ 1 - (-1)^l \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{l}{l+1} \left( \sigma_{33}^{(+)} - \sigma_{33}^{(-)} \right) \left[ 1 + (-1)^l \right] \right\}; \\ l \bar{M}_{33}^{(l-1)}(t, \mathbf{x}) &= l \int_{-h}^h \frac{\sigma_{33}(t, \mathbf{r})}{R+z} z^{l-1} dz = \\ &= \frac{l}{2h} \left( \sigma_{33}^{(+)} + \sigma_{33}^{(-)} \right) \left[ \Psi_l(h) - \Psi_l(-h) \right] + \\ &+ \frac{l}{2} \left( \sigma_{33}^{(+)} - \sigma_{33}^{(-)} \right) \left[ \Psi_{l-1}(h) - \Psi_{l-1}(-h) \right], \\ l &= 0, 1; \quad i, j = \overline{1, 3}, \quad m = 1, 2; \end{aligned} \quad (10)$$

$\rho_0, \rho_k$  — объемная плотность связующей матрицы и волокон  $k$ -го семейства;

$M_{ij}^{(l)}, \bar{M}_{ij}^{(l)}, \bar{\bar{M}}_{ij}^{(l)}$  — обобщенные силовые факторы;

$u_m^{(l)}$  — введенные для удобства обобщенные кинематические переменные;

$\omega_0$  — относительное объемное содержание связующего в репрезентативной ячейке композиции. Массовые внешние нагрузки в уравнениях (9) не учитываются.

Согласно соотношениям (10) при учете предположений (8) в рассматриваемый момент времени  $t_n$  можно вычислить все силовые факторы  $M_{ij}^{(l)}, \bar{M}_{ij}^{(l)}, \bar{\bar{M}}_{ij}^{(l)}$  и внешние нагрузки  $\sigma_{33}^{(\pm)}$ , которые входят в правые части уравнений (9). После добавления к (9) необходимых граничных условий (см. (26)—(29) в [14]) по явной схеме определяем значения функций  $w$  и  $u_i^{(l)}$  ( $l=0, 1$ ) в следующий момент времени  $t_{n+1}$ . Далее по формулам (35)

из [14] вычисляем  $u_i^{n+1}$  и  $\varepsilon_{ij}^{n+1}$ , а затем, используя соотношения (1), получаем значения осредненных деформаций композиции  $\varepsilon_{ij}^{n+1}$  ( $i=1, 2; j=\overline{1, 3}$ ). Дальнейшее решение рассматриваемой задачи при учете выражений (4) и (7) численно реализуется так же, как и в [22].

Для начала проведения расчетов по формулам (9) ( $n=1$ ) необходимо знать значения функций  $w$  и  $u_i^{(l)}$ , которые определяются из начальных условий (см. (30) и (31) в [14]), а также функций  $w$  и  $u_i^{(l)}$  ( $i=1, 2; l=0, 1$ ), которые можно предварительно вычислить по формулам (39) из [14]. Необходимые условия устойчивости построенной численной схемы типа "крест" вытекают из условия Куранта—Фридрихса—Леви и приведены в [6, 22].

### Обсуждение результатов расчетов

Рассмотрим упруговязкопластическое и упругопластическое динамическое деформирование длинных замкнутых круговых цилиндрических оболочек с радиусом  $R=1$  м, длиной  $L=4$  м и разной относительной толщиной. Конструкции жестко закреплены на обеих кромках:  $U_{*3} \equiv 0$  и  $u_{*i}^{(l)} \equiv 0$  ( $i=1, 2; l=0, 1$ ) при  $x_1=0, L$  (см. рис. 1, б и соотношения (28), (29) в [14]), и до начального момента времени  $t=t_0=0$  находятся в покое (см. равенства (30) и (31) в [14] при учете  $U_{0i} \equiv 0$  и  $V_{0i} \equiv 0, i=\overline{1, 3}$ ). Конструкции нагружаются внутренним давлением  $p(t)$ , которое соответствует воздушной взрывной волне [19]:

$$\sigma_{33}^{(+)} \equiv 0; \quad -\sigma_{33}^{(-)} \equiv p(t) = \begin{cases} p_{\max} t / t_{\max}, & 0 \leq t \leq t_{\max}; \\ p_{\max} \exp[-\alpha(t-t_{\max})], & t > t_{\max}; \end{cases} \quad (11)$$

$$\alpha = -\ln(0,01) / (t_{\min} - t_{\max}) > 0; \quad t_{\min} \gg t_{\max}.$$

Смысл величин  $p_{\max}$ ,  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$  здесь вполне очевиден и подробно описан в [14]. Согласно экспериментальным данным [19] в расчетах примем  $t_{\max} = 0,1$  мс и  $t_{\min} = 2$  мс.

Оболочки изготовлены из эпоксисвязующего [24] и армированы стеклянными волокнами [21] (стеклопластик) или волокнами из магниевого (Mg) сплава ВМ65 [25] и усилены стальной проволокой У8А [21] (металлокомпозиция). Упруго-пластическое деформирование материалов композиций при фиксированной скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$  аппроксимируется билинейной диаграммой растяжения—сжатия:

$$\sigma = \begin{cases} E^{(k)} \varepsilon, & |\varepsilon| \leq \varepsilon_s^{(k)} = \sigma_s^{(k)} / E^{(k)}; \\ \text{sign}(\varepsilon) \sigma_s^{(k)} + E_s^{(k)} [\varepsilon - \text{sign}(\varepsilon) \varepsilon_s^{(k)}], & |\varepsilon| > \varepsilon_s^{(k)}, \quad 0 \leq k \leq K, \end{cases}$$

где  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  — осевые напряжение и деформация;

$E^{(k)}$ ,  $E_s^{(k)} = E_s^{(k)}(\dot{\varepsilon})$  — модули Юнга и упрочнения  $k$ -го компонента композиции;

$\sigma_s^{(k)} = \sigma_s^{(k)}(\dot{\varepsilon})$  — предел текучести того же материала при  $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ .

Физико-механические характеристики компонентов рассматриваемых композиций приведены в таблицах в [16, 22], а аппроксимации зависимостей  $\sigma_s^{(k)}(\dot{\varepsilon})$  и  $E_s^{(k)}(\dot{\varepsilon})$  по табличным данным обсуждаются в [22].

КМ-оболочки имеют один из двух типов однородных ( $\omega_k = \text{const}$ ,  $\theta_k = \text{const}$  и  $\varphi_k = \text{const}$ ) структур армирования:

- ортогональное армирование в двух ( $K=2$ ) направлениях (см. рис. 2, а), причем первое семейство волокон уложено в продольном направлении  $x_1$  с плотностью армирования  $\omega_1 = 0,1$ , а второе семейство — в окружном направлении  $x_2$  с интенсивностью  $\omega_2 = 0,3$ ;

- пространственное армирование в четырех ( $K=4$ ) направлениях (см. рис. 2, б), когда первое и второе семейства по-прежнему уложены в продольном  $x_1$  и окружном  $x_2$  направлениях, а третье и четвертое — наклонно по направлениям, которые задаются углами (см. рис. 3)  $\theta_3 = \pi/4$ ,  $\theta_4 = 3\pi/4$ ,  $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$  (т. е. на рис. 2, б угол  $\theta = \pi/4$ , а оси  $x_1$  и  $x_2$  следует поменять местами).

Плотности армирования в пространственной структуре армирования:  $\omega_1 = 0,05$ ;  $\omega_2 = 0,3$  и  $\omega_3 = \omega_4 = 0,025$ . В обеих структурах общий расход арматуры одинаков.

Рассматриваются относительно тонкие (с толщиной  $2h = 2$  см,  $2h/R = 1/50$ ) и относительно тол-

стые (с толщиной  $2h = 10$  см,  $2h/R = 1/10$ ) КМ-конструкции.

Форма оболочек, их закрепление, нагружение и структура армирования являются осесимметричными, поэтому решения рассматриваемых задач не зависят от окружной координаты  $x_2$ . Кроме того, так как толщины конструкций и нагрузка (11) не зависят от продольной координаты  $x_1$ , решения обладают симметрией относительно центральных поперечных сечений КМ-оболочек  $x_1 = L/2$ , т. е., например,  $w(-x) = w(x)$  (где  $x = x_1 - L/2$ ,  $|x| \leq L/2$ ,  $0 \leq x_1 \leq L$ ) и т. п.

На рис. 4 изображены осцилляции прогиба точек центрального сечения ( $w_0(t) \equiv w(t, x)$ ,  $x = 0$ ) относительно тонкой металлокомпозитной оболочки, рассчитанные при  $p_{\max} = 40$  МПа (см. (11)) в случае использования первой (рис. 4, а) и второй (рис. 4, б) структур армирования. На рис. 4 и последующих рисунках номера кривых соответствуют номерам структур армирования, причем кривые, номера которых помечены штрихом, получены без учета влияния скорости деформирования на пластические свойства материалов композиции (упругопластический расчет [14]).

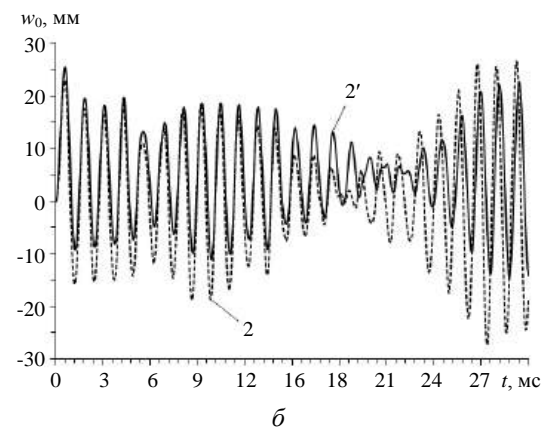
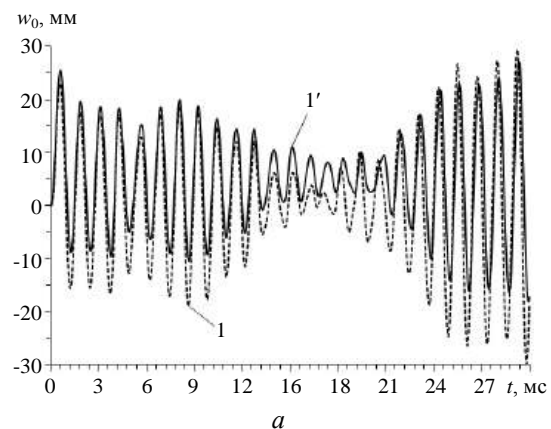
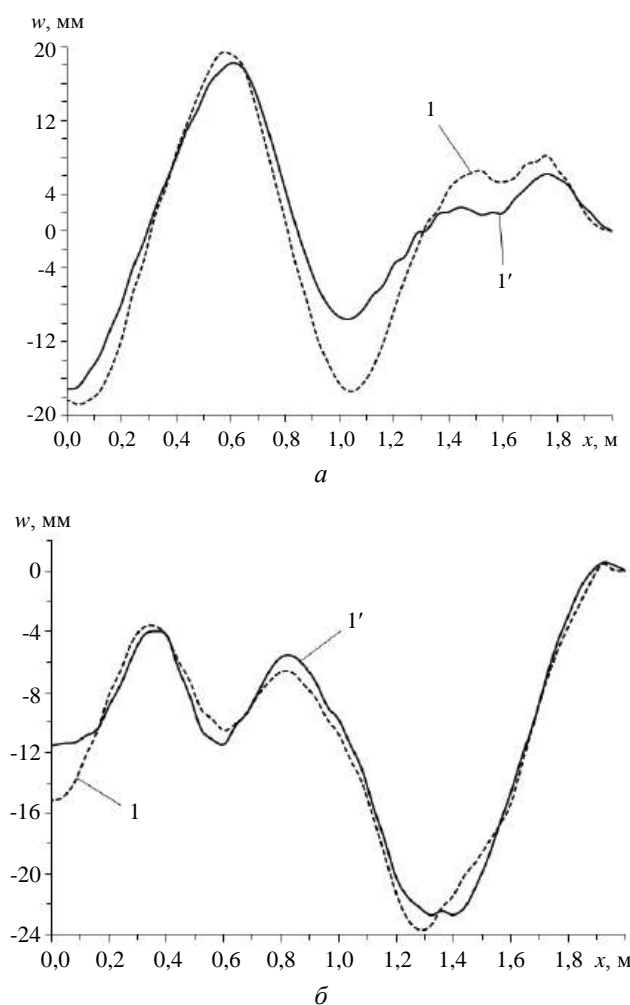


Рис. 4. Осцилляции прогибов точек центрального сечения тонкой металлокомпозитной цилиндрической оболочки с 2D- (а) и с 4D- (б) структурой армирования, рассчитанные по разным теориям

Сравнение поведения кривых 1, 1' и 2, 2' (см. рис. 4) свидетельствует о том, что для относительно тонких Mg–У8А-оболочек зависимость  $w_0(t)$ , рассчитанная по упругопластической и упруговязкопластической теориям, существенно различается для рассматриваемых структур армирования.

Еще одной демонстрацией этого различия являются кривые, изображенные на рис. 5, где приведены эпюры прогибов тонких КМ-оболочек с 2D-структурой армирования (см. рис. 2, а), рассчитанные в разные моменты времени: на рис. 5, а — при  $p_{\max} = 40$  МПа и  $t = 30$  мс для металлокомпозитной конструкции; на рис. 5, б — при  $p_{\max} = 10$  МПа и  $t = 50$  мс для стеклопластиковой оболочки.



**Рис. 5. Эпюры прогибов точек тонкой цилиндрической оболочки с 2D-структурой армирования, рассчитанные по разным теориям:**

а — из Mg–У8А-композиции при  $p_{\max} = 40$  МПа и  $t = 30$  мс;  
б — из стеклопластиковой композиции при  $p_{\max} = 10$  МПа и  $t = 50$  мс

На рис. 5 в силу ранее указанной симметрии изображены зависимости  $w(x)$  только для правой половины оболочки. Поведение кривых на рис. 5,

а показывает, что к моменту времени  $t = 30$  мс зависимость  $w(x)$ , полученная по упругопластической теории (кривая 1'), существенно отличается от аналогичной зависимости, определенной по упруговязкопластической теории (кривая 1), причем наибольшее различие может наблюдаться не в точках центрального сечения ( $x = 0$ ). Так, на рис. 5, а максимальное различие между кривыми 1 и 1' наблюдается в окрестности поперечного сечения  $x = 1$  м.

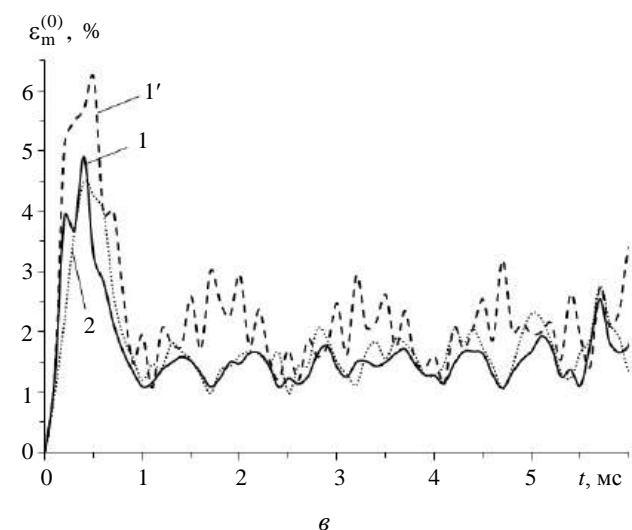
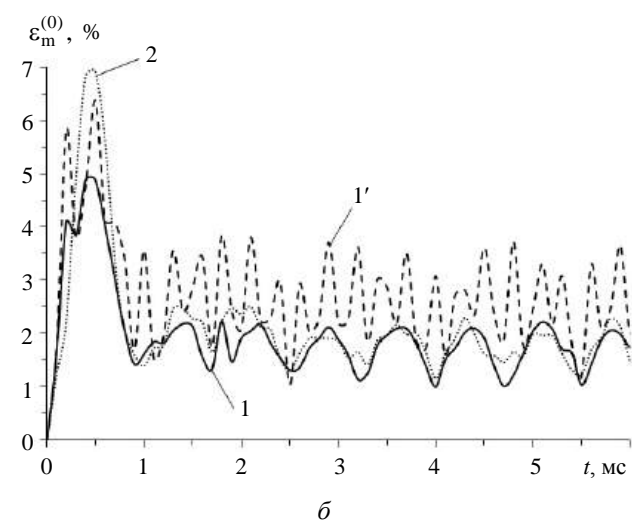
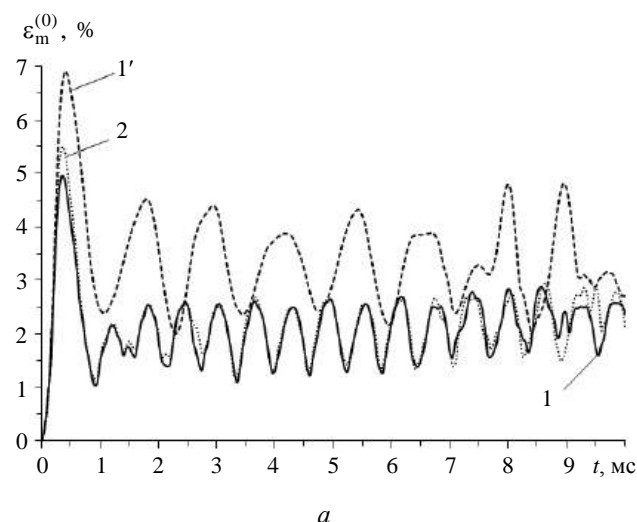
Сопоставление кривых 1 и 2 на рис. 4 в окрестности момента времени  $t = 30$  мс свидетельствует о том, что для относительно тонкой металлокомпозитной конструкции замена традиционной 2D-структуры армирования на пространственную 4D-структуру позволяет несколько снизить по модулю величину прогибов точек центрального сечения такой оболочки.

На рис. 6 изображены осцилляции наибольших значений интенсивности деформаций связующей матрицы  $\varepsilon_*^{(0)}$  ( $\varepsilon_m^{(0)}(t) = \max_r \varepsilon_*^{(0)}(t, \mathbf{r})$ ,  $0 \leq x_1 \leq L$ ,  $|z| \leq h$ ) в относительно тонкой Mg–У8А-оболочке (рис. 6, а) при нагрузке  $p_{\max} = 40$  МПа (см. (11)), относительно тонкой стеклопластиковой конструкции при  $p_{\max} = 10$  МПа (рис. 6, б) и стеклопластиковой относительно толстой оболочке при  $p_{\max} = 40$  МПа (рис. 6, в).

Сравнение кривых 1 и 1' на рис. 6, а показывает, что упругопластический расчет (кривая 1') приводит к существенному завышению деформированного состояния связующего материала металлокомпозитной тонкой оболочки по сравнению с расчетом, выполненным по упруговязкопластической теории (кривая 1). Так, ординаты точек глобальных максимумов на кривых 1 и 1' на рис. 6, а различаются на 33,6 %. Сопоставление таких же максимумов на кривых 1 и 2 указывает на то, что замена традиционной 2D-структуры армирования на 4D-структуру в тонкой металлокомпозитной оболочке приводит к увеличению значения  $\varepsilon_{\max}^{(0)} = \max_t \varepsilon_m^{(0)}(t)$  на 6,2 %.

Дополнительные расчеты, проведенные для относительно толстых Mg–У8А-оболочек при  $2h = 10$  см и  $p_{\max} = 200$  МПа, продемонстрировали значение  $\varepsilon_{\max}^{(0)}$ :

- определенное по упругопластической теории, на 54,6 % большее аналогичной величины, рассчитанной по упруговязкопластическим соотношениям;
- полученное по упруговязкопластической теории при 4D-структуре армирования, на 11,9 % большее аналогичной величины в случае 2D-структуры армирования.



**Рис. 6. Осцилляции максимальных значений интенсивности деформаций связующего материала в КМ-оболочках с разными структурами армирования, рассчитанные по разным теориям:**

*a* — тонкие Mg–У8А-конструкции при  $p_{\max} = 40$  МПа;  
*б* — тонкие стеклопластиковые оболочки при  $p_{\max} = 10$  МПа;  
*в* — относительно толстые стеклопластиковые конструкции при  $p_{\max} = 40$  МПа

Следовательно, как в относительно тонких, так и в относительно толстых длинных металлокомпозиционных цилиндрических оболочках замена традиционной структуры армирования по эквидистантным поверхностям (см. рис. 2, *а*) на пространственную структуру армирования (см. рис. 2, *б*) не приводит к уменьшению максимальных значений интенсивности деформаций связующего материала. Объясняется это тем, что в металлокомпозициях степень анизотропии является малой (так, для рассматриваемой Mg–У8А-композиции  $E^{(1)} / E^{(0)} \approx 5$  [16, 21, 25]), поэтому "жесткое" металлическое связующее достаточно хорошо сопротивляется поперечным сдвигам изгибаемой оболочки с 2D-структурой армирования.

Были рассмотрены металлокомпозитные цилиндрические оболочки из Mg–У8А-композиции, в которых пластические свойства материала связующей матрицы — магниевого сплава ВМ65 — сильно чувствительны к изменению скорости деформирования. Расчеты, проведенные для таких КМ-конструкций по упругопластической и упруговязкопластической теориям, сильно различаются (см. кривые 1 и 1' на рис. 4, *а*; 5, *а*; 6, *а* и кривые 2 и 2' на рис. 4, *б*).

Проанализируем динамическое поведение стеклопластиковых оболочек, пластические свойства компонентов композиции которых слабо зависят от скорости деформирования по сравнению со свойствами сплава ВМ65 (см. таблицу в [17]).

На рис. 5, *б* изображены эпюры прогибов  $w(x)$ , рассчитанные в момент времени  $t = 50$  мс для относительно тонкой ( $2h = 2$  см) стеклопластиковой оболочки с 2D-структурой армирования при  $p_{\max} = 10$  МПа (см. (11)). Как видно, кривые 1 и 1' на рис. 5, *б* в окрестности центрального сечения ( $x = 0$ ) существенно различаются. С увеличением расчетного времени это различие становится еще более заметным. В случае пространственного армирования стеклопластиковых оболочек различие прогибов, рассчитанных с учетом и без учета чувствительности пластических свойств материалов композиции к скорости их деформирования, на рассматриваемом интервале времени ( $0 \leq t \leq 50$  мс) пренебрежимо мало. Аналогичный результат получается и для относительно толстых ( $2h = 10$  см) стеклопластиковых конструкций в случае  $p_{\max} = 40$  МПа как при 2D-структуре, так и при 4D-структуре армирования. Поэтому соответствующие зависимости  $w_0(t)$  и  $w(x)$  для фиксированных моментов времени  $t$  не приведены.

На рис. 6, *б* и 6, *в* изображена зависимость  $\varepsilon_m^{(0)}(t)$  для относительно тонких и толстых стек-

лопластиковых оболочек с разными структурами армирования. Сравнение глобальных максимумов на кривых 1 и 1' на этих рисунках показывает, что расчет по упругопластической теории завышает наибольшее значение интенсивности деформаций эпоксисвязующего  $\varepsilon_{\max}^{(0)}$  на 30,3 % в случае тонкой оболочки и на 26,5 % в случае толстостенной конструкции по сравнению с расчетом, выполненным по упруговязкопластическим соотношениям. Сопоставление глобальных максимумов на кривых 1 и 2 на рис. 6, б и 6, в свидетельствует о том, что в случае тонкой цилиндрической оболочки замена 2D-структуры армирования на 4D-структуру приводит к возрастанию величины  $\varepsilon_{\max}^{(0)}$  на 41,9 %, а в случае относительно толстых длинных оболочек такая замена структур армирования приводит к уменьшению величины  $\varepsilon_{\max}^{(0)}$  на 8,2 %.

Таким образом, в случае относительно тонких длинных цилиндрических стеклопластиковых оболочек замена традиционной структуры армирования по эквидистантным поверхностям (см. рис. 2, а) на пространственную структуру 4D-армирования (см. рис. 2, б) не приводит к положительному эффекту. В случае относительно толстых длинных оболочек такая замена структур армирования позволяет уменьшить максимально достигаемое в процессе осцилляций значение интенсивности деформаций эпоксисвязующего. Эффект от такой замены структуры армирования возрастает с уменьшением длины КМ-конструкции и наиболее ярко проявляется в относительно толстых коротких цилиндрических оболочках.

### Выводы

Проведенные расчеты упругопластического и упруговязкопластического динамического поведения изгибаемых длинных цилиндрических КМ-оболочек показали, что неучет чувствительности пластических свойств материалов композиции к скорости их деформирования приводит к существенному завышению наибольших значений интенсивности деформаций компонентов композиции и к значительному искажению эпюр прогибов в фиксированные моменты времени, причем с увеличением времени эти искажения возрастают. Данные результаты справедливы как для металлокомпозитных конструкций, пластические свойства компонентов которых сильно чувствительны к изменению скорости их деформирования, так и для стеклопластиковых оболочек, материалы композиции которых слабо чувствительны к указанному изменению. Эти выводы также справедливы

как для относительно тонких, так и для относительно толстых цилиндрических КМ-оболочек, причем в случае стеклопластиковых конструкций различие в таких расчетах для относительно тонких оболочек проявляется в большей степени, чем для относительно толстых (с относительной толщиной порядка 1/10).

Замена традиционной перекрестной структуры армирования по эквидистантным поверхностям (см. рис. 2, а) на пространственную структуру 4D-армирования (см. рис. 2, б) в длинных цилиндрических оболочках приводит к положительному эффекту только в относительно толстых стеклопластиковых конструкциях, причем с уменьшением длины конструкции этот эффект усиливается.

Сопоставление результатов данного исследования с результатами, полученными ранее в [16], показывает, что неучет чувствительности пластических свойств материалов композиции к скорости их деформирования сказывается в гораздо большей степени в пологих КМ-оболочках [16], чем в замкнутых цилиндрических КМ-конструкциях. Кроме того, замена традиционной перекрестной структуры армирования на пространственную структуру в искривленных панелях [16] приводит к большему положительному эффекту, чем в случае замкнутых цилиндрических оболочек.

*Работа выполнена в рамках государственного задания (№ госрегистрации 121030900260-6).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Амбарцумян С. А. Общая теория анизотропных оболочек. — М.: Наука, 1974. — 446 с.
2. Богданович А. Е. Нелинейные задачи динамики цилиндрических композитных оболочек. — Рига: Зинатне, 1987. — 295 с.
3. Андреев А. Н., Немировский Ю. В. Многослойные анизотропные оболочки и пластины. Изгиб, устойчивость и колебания. — Новосибирск: Наука, 2001. — 287 с.
4. Mouritz A. P., Gellert E., Burchill P., Challis K. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines // Compos. Struct. 2001. V. 53. № 1. P. 21—42.
5. Bannister M. Challenger for composites into the next millennium — a reinforcement perspective // Composites. 2001. Part A 32. P. 901—910.
6. Абросимов Н. А., Баженов В. Г. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. — Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. — 400 с.
7. Reddy J. N. Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and analysis. Ed. 2<sup>nd</sup>. — N. Y.: CRC Press, 2004. — 831 p.
8. Каледин В. О., Аульченко С. М., Миткевич А. Б., Решетникова Е. В., Седова Е. А., Шпакова Ю. В. Моделирование статки и динамики оболочечных конструкций из композиционных материалов. — М.: Физматлит, 2014. — 196 с.



9. Соломонов Ю. С., Георгиевский В. П., Недбай А. Я., Андришин В. А. Прикладные задачи механики цилиндрических оболочек. — М.: Физматлит, 2014. — 408 с.
10. Димитриенко Ю. И. Механика композитных конструкций при высоких температурах. — М.: Физматлит, 2019. — 448 с.
11. Mao-hong Yu. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20<sup>th</sup> century // ASME. Appl. Mech. Rev. 2002. V. 55. № 3. P. 169—200.
12. Qatu M. S., Sullivan R. W., Wang W. Recent research advances on the dynamic analysis of composite shells: 2000–2009 // Composite Structures. 2010. V. 93. P. 14—31.
13. Alderliesten R. C., Benedictus R. Modelling of impact damage and dynamics in fibre-metal laminates. — A review // Int. J. Impact Eng. 2014. V. 67. P. 27—38.
14. Янковский А. П. Моделирование упругопластического поведения гибких цилиндрических оболочек с пространственными структурами армирования // Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 2. С. 9—21.
15. Янковский А. П. Моделирование динамического осесимметричного вязкоупругопластического деформирования цилиндрических композитных оболочек с различными структурами армирования // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 2. С. 12—20.
16. Янковский А. П. Моделирование упруговязкопластического динамического поведения гибких армированных пологих оболочек // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 4. С. 3—10.
17. Коларов Д., Балтов А., Бончева Н. Механика пластических сред. — М.: Мир, 1979. — 302 с.
18. Тарнопольский Ю. М., Жигун И. Г., Поляков В. А. Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник. — М.: Машиностроение, 1987. — 224 с.
19. Houlston R., DesRochers C. G. Nonlinear structural response of ship panels subjected to air blast loading // Computers & Structures. 1987. V. 26. № 1, 2. P. 1—15.
20. Kazanci Z. Dynamic response of composite sandwich plates subjected to time-dependent pressure pulses // International J. Non-Linear Mechanics. 2011. V. 46. P. 807—817.
21. Композиционные материалы. Справочник / под ред. Карпиноса Д. М. — Киев: Наук. думка, 1985. — 592 с.
22. Янковский А. П. Моделирование упругопластического изгиба пространственно-армированных пластин при учете чувствительности компонентов композиции к изменению скорости деформирования // Прикладная математика и механика. 2019. Т. 83. № 4. С. 660—686.
23. Хажинский Г. М. Модели деформирования и разрушения металлов. — М.: Научный мир, 2011. — 231 с.
24. Справочник по композитным материалам. В 2-х кн. Кн. 1 / под ред. Любина Дж. / Пер. с англ. Геллера А. Б., Гельмонта М. М. / под ред. Геллера Б. Э. — М.: Машиностроение, 1988. — 448 с.
25. Безухов Н. И., Бажанов В. Л., Гольденблат И. И., Николаенко Н. А., Синюков А. М. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур / под ред. Гольденблата И. И. — М.: Машиностроение, 1965. — 567 с.

## Modeling the inelastic dynamic behavior of cylindrical reinforced shells taking into account the dependence of plastic properties on the strain rate

A. P. YANKOVSKIY

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia

*The problem of inelastic dynamic behavior of flexible reinforced cylindrical shells is formulated. The mechanical behavior of the components of the composition is described by the equations of the theory of plastic flow, taking into account the sensitivity of plastic properties to the rate of deformation (elastic-visco-plasticity). The geometric nonlinearity of the problem is taken into account in the Karman approximation. Possible weak resistance of reinforced shells to transverse shears is modeled in the framework of Ambartsumyan's non-classical theory. The numerical solution of the stated initial-boundary value problem is determined according to the explicit "cross"-scheme. The elastic-plastic and elastic-visco-plastic dynamic deformation of fiberglass and metal-composite long closed cylindrical shells of different relative thicknesses is investigated. It has been demonstrated that if we do not take into account the sensitivity of the plastic properties of the materials of the composition to the rate of their deformation (elastic-plasticity), this leads to a significant increase in the calculated values of the intensity of deformations of the components of the composition, as well as to a significant distortion of the deflection function, especially for metal-composite products. It is shown that replacing the traditional structure of reinforcement in the longitudinal and circumferential directions with a spatial 4D structure leads to a positive effect only in the case of relatively thick fiberglass shells. This effect increases with decreasing length of such a construction.*

**Keywords:** closed cylindrical shells, spatial reinforcement, inelastic deformation, sensitivity to strain rate, Ambartsumyan's theory, dynamic loads, numerical "cross"-scheme.

## Безавтоклавное формование препрегов

К. И. ДОНЕЦКИЙ, канд. хим. наук; П. Н. ТИМОШКОВ; А. М. САФРОНОВ;  
В. А. ГОНЧАРОВ; М. И. МИЩУН

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»  
национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ГНЦ РФ, Москва, Россия

*Исследован процесс изготовления углепластика методом вакуумного формования препрегов. Рассмотрены причины образования пористости в углепластике, вопросы подготовки исходных материалов для проведения процесса изготовления материала — углеродной ткани, а также препрега и технологии изготовления препрега и полимерного композиционного материала (ПКМ) на его основе. Исследованы физико-механические свойства получаемого материала (как элементарных образцов, так и конструктивно-подобного элемента изделия). Проведено сопоставление свойств углепластика, изготавливаемого как вакуумным, так и автоклавным формованием препрега.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, безавтоклавное формование, вакуумные препреги, семипреги, физико-механические свойства, пропитка, пористость.

В авиационной промышленности полимерные композиционные материалы (ПКМ) ввиду их уникальных свойств (низкой плотности и значительных механических характеристик) применяют с самого начала их создания: стеклопластики освоены с первой половины 40-х годов двадцатого века, а со второй половины — уже органопластики и углепластики. Такие важные факторы переработки, как температура и давление, отвечают за свойства изготовленных изделий, причём первоначально при производстве использовали давление атмосферы и вакуумируемые пакеты. Таким способом изготавливали слабонагруженные конструкции, а также сотовые или монолитные. Указанный способ являлся не единственным.

В советской авиапромышленности до применения автоклавов были внедрены методы нагнетания связующего в форму, пресс-камерный, намотки, прессования в жесткой форме и т. д. [1].

Однако свойства изготавливаемых вакуумной формовкой материалов были невысокими ввиду их значительной пористости. При увеличении масштаба использования и роста требований к свойствам готовых конструкций разработчики и изготовители перешли на автоклавный процесс изготовления, позволяющий гарантировать высокое давление и, соответственно, изготавливать более высококачественные материалы. Позже этот метод стал главным для получения высоконагруженных изделий [2], поскольку он позволяет получать конструкции из низкопористого материала. Формованию подвергают заранее пропитанные связующим полуфабрикаты (препреги) — тканый наполнитель или однонаправленные жгуты с нанесённым связующим. Однако существует потребность замены энергоёмкой технологии автоклавного формования на дешёвую и простую, с низкими капиталовложениями, позволяющую изготавливать конструкции без ограничений размеров изготавливаемых изделий, которые налагают использование автоклава.

Рост потребности в ПКМ, связанный с увеличением объема выпуска изделий, изготовленных из ПКМ, и их размеров, потребовал обеспечить применение экономичных альтернатив использованию автоклава. Разработанные ранее способы формовки [3, 4] с применением атмосферного дав-

Донецкий Кирилл Игоревич, заместитель начальника лаборатории 625 по науке.

E-mail: doneckijki@viam.ru

Тимошков Павел Николаевич, начальник НИО "ПКМ и технологии их переработки".

E-mail: timoshkovpn@viam.ru

Сафронов Андрей Михайлович, ведущий инженер лаборатории 611.

E-mail: krasssaa@gmail.com

Гончаров Виталий Александрович, начальник лаборатории 625.

E-mail: goncharovva@viam.ru

Мищун Михаил Игоревич, техник 1-й категории лаборатории 625.

E-mail: mishun.mihail@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 3 августа 2021 г.

© Донецкий К. И., Тимошков П. Н., Сафронов А. М.,  
Гончаров В. А., Мищун М. И., 2022

ления оказались наиболее дешевыми (пропитка тканого наполнителя в фиксированной жёсткой форме под избыточным давлением с использованием вакуумируемого пакета, а также изготовление пластиков с применением связующего пленочного типа). В описываемой работе изготовление и исследование пластиков проводили по программе, приведённой в "Стратегических направлениях развития ... на период до 2030 года" [5—8].

Получение низкопористых пластиков с использованием автоклавных препрегов методом вакуумной формовки не увенчалось успехом. При сборке технологического пакета между слоями препрега может оставаться воздух или присутствовать остаточная влага в материале [9]. Высокая монолитность отформованной детали обеспечивается значительным давлением в автоклаве, происходит сжатие пор до незначительных размеров. Грунненфельд и Нутт указали, что происходит образование пор при использовании влажного препрега (в процессе формования под вакуумом), но в случае автоклавного формования имеет место подавление роста порообразования [10].

Задача изготовления низкопористых конструкций формовкой под вакуумом привела к появлению как "классических" препрегов для этого метода формования, так и частично пропитанных препрегов — семипрегов. Закончены исследования по определению технологии производства, а также её воздействия на материалы и при формовании ПКМ [11—15]. Замена материалов для формовки в автоклаве на вакуумные возможна только тогда, когда характеристики изготавливаемых пластиков будут сопоставимы. Основные изготовители материалов для формовки в автоклаве, такие, как фирмы Hexcel, Cytec или Tencate (США), изготавливают и препреги для формования под вакуумом, и семипреги, используя различную степень наполнения связующим пропитываемого волокна [16].

Основным отличием формования препрега под давлением вакуума от автоклавного является разница в давлении при сборке слоёв препрега при формовании. Если при автоклавном формовании давление, как правило, составляет от 5—7 атмосфер и выше, то при вакуумном — около 1 атмосферы. Как следствие при формовании в автоклаве высокое давление обеспечивает вывод ("задавливание") из пакета присутствующих там влаги и воздуха, а также не дает возможности оставшейся влаге увеличиваться в объеме в процессе нагрева при проведении режима формования. В результате углепластик, полученный автоклавным формованием, оказывается плотно упакованным и низкопористым.

При вакуумном формовании препрега создаваемое давление недостаточно как для полного вы-

вода влаги и воздуха с поверхности препрега, так и для сдерживания разрастания пор при нагреве в процессе режима формования оставшейся в препреге влаги. В результате композиционный материал, полученный методом вакуумного формования, оказывается пористым, а объемная доля пор может достигать неприемлемых для использования пластика значений. Ввиду этого подготовка как самого вакуумного препрега, так и вакуумного пакета перед формованием является принципиальной задачей.

Несмотря на указанные сложности, метод вакуумного формования препрегов является весьма перспективным. Его применение позволит исключить дорогостоящие энергоёмкие автоклавы, что примерно на четверть снизит стоимость изделий за счет удешевления оборудования и в несколько раз энергопотребление [17].

### Материалы и методы

Как было указано ранее, одной из основных причин снижения физико-механических свойств пластиков является пористость, причина образования которой — запертый внутри углепластика воздух и перешедшая в газообразное состояния влага, изначально находившаяся в препреге углепластика.

Если воздух попадает внутрь препрега при пропитке ткани на пропиточной машине и в процессе сборки пакета препрега для формования углепластика, то влага находится изначально в компонентах препрега — в связующем и в самой ткани.

Исследования авторы проводили на разработанных материалах ФГУП "ВИАМ": углеродной ткани марки ВТкУ-2.200 и расплавном эпоксидном связующем ВСЭ-1212.

Методом термогравиметрического анализа (ТГА) исследована потеря массы углеродной ткани ВТкУ-2.200 и связующего ВСЭ-1212 в диапазоне температур от + 25 до + 110 °С (табл. 1).

Таблица 1

Результаты определения потери массы связующего ВСЭ-1212 и углеродной ткани ВТкУ-2.200

Наименование показателя	Связующее марки ВСЭ-1212	Углеродная ткань марки ВТкУ-2.200
Потеря массы в диапазоне температур от 25 до 110 °С, %	0,15	0,28

Исследования показали, что как в связующем, так и в наполнителе присутствует незначительное количество влаги.

Связующее ВСЭ-1212 не может быть подвержено сушке, так как воздействие на него темпера-

туры приведет к началу процесса отверждения. Однако следует принимать во внимание, что в процессе изготовления препрега связующее проходит предварительный разогрев в термощкафу в течение нескольких часов, а затем в коутере пропиточной машины — еще в течение минимум получаса (рис. 1). За это время влага практически уходит из состава связующего и дополнительные действия по удалению влаги из связующего не требуются.

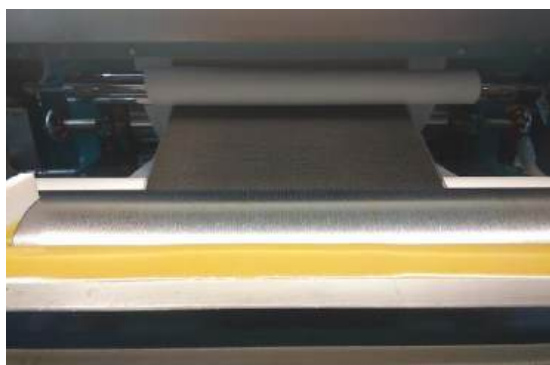


Рис. 1. Прогрев связующего на коутере пропиточной машины перед его нанесением на углеродную ткань

Углеродную ткань ВТкУ-2.200 изготавливают в помещении в условиях повышенной влажности (65—75 %). В процессе изготовления на ткацких станках она проходит через узел сушки. На практике после изготовления проводят испытания на содержание влаги в данной ткани. На момент изготовления на ткацком станке оно обычно составляет 0,2—0,7 %.

В зависимости от условий хранения и транспортировки может произойти как уменьшение, так и увеличение содержания влаги в углеродной ткани. Таким образом, для получения низкопористого пластика необходимо тщательно проверять исходную пористость ткани и выполнять надлежащие условия её хранения.

Ещё одной возможной причиной возникновения пористости пластика, изготавливаемого вакуумным формованием препрега, может быть присутствие летучих компонентов в препреге. Для выявления этого авторами была исследована потеря массы методом ТГА в диапазоне температур от +25 до +110 °С препрега углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты определения потери массы препрега углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200**

Наименование показателя	Препрег ВКУ-39/ВТкУ-2.200
Потеря массы в диапазоне температур от 25 до 110 °С, %	0,32

Исследования показали, что в препреге присутствует незначительное количество летучих компонентов, которые косвенно могут влиять на качество изготавливаемого пластика. Тем не менее, как будет показано далее, при тщательном соблюдении технологических процессов получение низкопористого пластика является вполне реальным результатом безавтоклавного формования препрега.

Для получения качественного пластика методом вакуумного формования со свойствами, приближенными к свойствам аналогичного автоклавного материала, авторами была уточнена технология процесса вакуумного формования препрега.

В качестве базового варианта режима формования выбран режим, разработанный ранее для автоклавного формования препрега. Для сокращения общего времени изготовления углепластика подобрана схема сборки вакуумного пакета, позволяющая получить высококачественный низкопористый пластик.

Ранее сборку заготовки плиты проводили из собранных предварительно отвакуумированных заготовок препрега, что приводило к резкому увеличению времени изготовления пластика. Разработанный технологический процесс послойной выкладки заготовок препрега без предварительного вакуумирования обеспечил получение материала с необходимыми свойствами.

По разработанной схеме методом вакуумного формования был изготовлен углепластик ВКУ-39/ВТкУ-2.200. Для предварительной проверки качества материала методом УЗК проведён неразрушающий контроль сплошности полученных образцов углепластиков, показавший отсутствие дефектных зон в материале. Из практики известно, что для углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200, изготовленного в автоклаве, плотность составляет примерно 1,45—1,60 г/см<sup>3</sup>.

Измерение плотности методом гидростатического взвешивания аналогичного углепластика, изготовленного формованием под вакуумом, показала значение 1,55 г/см<sup>3</sup>, что также косвенно свидетельствует о получении материала надлежащего качества.

Также принципиальным критерием качества, как было указано ранее, является объёмная доля пор материала. Определение объёмной доли пор в углепластике проводили как методом рентгеновской компьютерной томографии (рис. 2, а), так и количественным анализом пористости путем исследования микроструктуры образцов оптическим методом на металлографическом комплексе фирмы "Leica" (Германия) при увеличениях от ×12,5 до ×50. Съёмку изображений вели при помощи цифровой камеры VEC-335 с разрешением 3 мегапикселя. Подготовку изображений к количественному ана-

лизу и их математическую обработку выполняли при помощи компьютерной программы Image Expert Pro 3х. Для определения объемной доли пор общую площадь найденных на шлифе пор относили к общей площади, которая должна быть не менее 200 мм<sup>2</sup>. Для набора необходимой площади шлифа вырезали фрагменты из разных частей плиты углепластика (из центра и краев). В результате проделанной работы выявлено, что в углепластике марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 содержание пор не превышает 0,3 % (рис. 2, б).

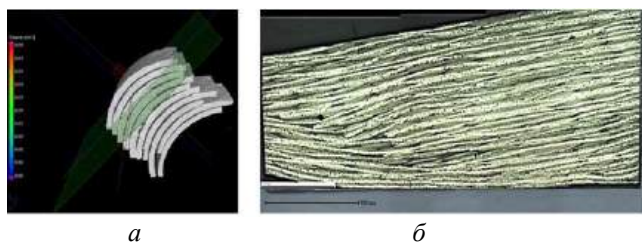


Рис. 2. Микроструктура КПО из препрега углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200, полученная методом рентгеновской компьютерной томографии (а) и металлографией (б)

Для проведения корректного сравнения с аналогичным материалом, изготовленным автоклавным формованием препрега, определена степень полимеризации связующего в углепластике марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200, которая составляет 98,2 %, что свидетельствует о полноценности проведения режима отверждения и позволяет прогнозировать высокие физико-механические свойства ПКМ.

### Результаты и обсуждение

Для подтверждения разработанной технологии процесса вакуумного формования препрега принято решение об изготовлении конструктивно-подобного элемента (КПО) и исследовании его свойств. Из полученного образца изготовлены образцы шириной 10 мм для определения объемной доли пор (рис. 3).



Рис. 3. Образец конструктивно-подобного элемента детали и схема вырезки образцов для определения объемной доли пор

Проведено исследование объемной доли пор методом металлографии (шлифы; см. рис. 2) и степени полимеризации полученных образцов. Установлено, что объемная доля пор в образцах КПО из углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 не превышает 0,4 %, а степень полимеризации — 98,8 %, что удовлетворяет основным требованиям, которые авторы поставили перед началом этой работы. Проведенные методом рентгеновской компьютерной томографии исследования подтвердили полученные значения пористости (объемная доля пор не выше 0,35 %).

Анализируя процесс изготовления методом вакуумного формования КПО из препрега углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 и полученные результаты по его пористости, можно сделать вывод, что препрег пригоден для изготовления деталей изделий сложной криволинейной формы методом вакуумного формования. Однако еще необходимо проверить комплекс механических свойств углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 и провести сопоставление полученных результатов со свойствами материала, полученного автоклавным формованием.

По отработанным ранее технологическим параметрам методом вакуумного формования изготовлены плиты углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 из препрега. Для возможного "отсева" дефектных образцов методом УЗК проведен неразрушающий контроль сплошности полученных плит углепластика. Установлено, что все образцы материала пригодны для дальнейшей работы с ними, что в дальнейшем подтвердилось при определении объемной доли пор (содержание объемной доли пор не превысило 0,1 %).

Из плит углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 изготовлены образцы. Проведены исследования их свойств при температуре испытаний  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Одной из основных целей данной работы является сопоставление и подтверждение уровня физико-механических свойств углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200, полученного методом вакуумного формования и методом автоклавного формования, чтобы узнать, оказывает ли влияние метод изготовления ПКМ на его свойства. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Как видно из приведённой таблицы, свойства углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200, изготовленного вакуумным и автоклавным формованием, по своим значениям находятся приблизительно на одном уровне, что доказывает возможность использования метода вакуумного формования при изготовлении деталей сложной криволинейной формы.



Таблица 3

**Некоторые свойства углепластика ВКУ-39/ВТКУ-2.200, изготовленного вакуумным и автоклавным формованием**

Наименование характеристик	Вакуумное формование	Автоклавное формование
Предел прочности при растяжении, [0] при 20 °С при 120 °С	905 810	890 805
Модуль упругости при растяжении, [0] при 20 °С при 120 °С	63 60	66 59
Коэффициент Пуассона при 20 °С, [0]	0,04	0,05
Предел прочности при растяжении, [90] при 20 °С при 120 °С	850 850	870 880
Модуль упругости при растяжении, [90] при 20 °С при 120 °С	61 57	62 61
Коэффициент Пуассона при 20 °С, [90]	0,04	0,06
Предел прочности при сжатии, [0] при 20 °С при 120 °С	760 610	740 610
Модуль упругости при сжатии, [0] при 20 °С при 120 °С	58 58	55 57
Предел прочности при изгибе при 20 °С	940	950
Модуль упругости при изгибе при 20 °С	58	59
Предел прочности при межслоевом сдвиге при 20 °С	72	83
Ударная вязкость (по методу Шарпи), кДж/м <sup>2</sup>	135	140
Изменение массы образца в течение 30 сут., % (при температуре 60 °С, φ = 85 %)	0,73	0,70

### Заключение

Использование углепластика, изготавливаемого безавтоклавным формованием препрегов, является эффективным способом изготовления как материала, так и элементов конструкций на его основе. Реализация всех достоинств этого метода напрямую связана с пониманием особенностей как процесса подготовки формовки препрега, так и формования изделия под его практическое использование. Представляется несомненно важным знание закономерностей процесса и технологии изготовления полимерных композиционных материалов на основе вакуумных технологий формования в целях получения материала со свойствами, которые от него ожидают. Развитие и применение данных решений в высокотехнологичных отраслях российской промышленности позволит придать дополнительный импульс в изготовлении новых образцов техники различного применения.

Основным результатом данной работы является то, что свойства углепластика ВКУ-39/ВТКУ-2.200, изготовленного вакуумным и автоклавным формованием, находятся приблизительно на одном

уровне, что доказывает возможность использования вакуумного формования при изготовлении высококачественных изделий сложной формы. Это позволит в ряде случаев исключить применение дорогостоящего и энергоёмкого автоклавного формования.

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Климатические испытания" ФГУП "ВИАМ" по программе "Стратегические направления развития ... на период до 2030 года" по направлению 13 "Полимерные композиционные материалы. Комплексная проблема 13.2 "Конструкционные ПКМ".*

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Теребенин Б. П.** Технологические особенности изготовления крупногабаритных изделий из стеклопластика. Стеклотекстолиты и другие конструкционные пластики. — М.: Оборонгиз, 1960. — 168 с.
2. **Душин М. И., Хрульков А. В., Мухаметов Р. Р.** Исследование технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Клеи, герметики, технологии. 2013. № 8. С. 12—15.

3. Loos A. C. Low-cost fabrication of advanced polymeric composites by resin infusion processes Adv // Composite Mater. 2001. V. 10. № 2–3. P. 99–106.
4. Душин М. И., Мухаметов Р. Р., Платонов А. А., Меркулова Ю. И. Исследование фильтрационных характеристик армирующих наполнителей и связующих при разработке технологии безавтоклавного формования полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 2. С. 22–25.
5. Ткачук А. И., Донецкий К. И., Терехов И. В., Караваев Р. Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1. С. 03. <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-49-55
6. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ по реализации "Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года" // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1(34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
7. Каблов Е. Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
8. Каблов Е. Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
9. Душин М. И., Донецкий К. И., Караваев Р. Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // Труды ВИАМ. 2016. № 6(42). С. 08. <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-8-8.
10. Grunenfelder L. K., Nutt S. R. Void formation in composite prepregs — effect of dissolved moisture // Composites Science Technologies. 2010. V. 70. P. 2304–2309.
11. Ridgard C. Out of Autoclave Composite Technology for Aerospace, Defense and Space Structures // SAMPE International Symposium. 2009. P. 134–136.
12. Thomas S., Bongiovanni C., Nutt S. R. In Situ Estimation of through-Thickness Resin Flow using Ultrasound // Composites Science and Technology. 2008. V. 68. № 15–16. P. 3093–3098.
13. Grunenfelder L. K., Nutt S. R. Void Formation in Composite Prepregs — effect of Dissolved Moisture // Composites Science and Technology. 2010. V. 70. № 16. P. 2304–2309.
14. Донецкий К. И., Душин М. И., Мищун М. И., Севастьянов Д. В. Некоторые особенности применения препрегов для вакуумного формования ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 12(60). С. 08. <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-8-8.
15. Out-of-autoclave prepregs: Hype or revolution? CompositesWorld [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.compositesworld.com/articles/out-of-autoclave-prepregs-hype-or-revolution> (дата обращения: 31.07.2018).
16. Cender T. A., Simacek P., Advani S. G. Resin film impregnation in fabric prepregs with dual length scale permeability // Composites: Part A. 2013. V. 53. P. 118–128.
17. Тимошков П. Н., Хрульков А. В., Язвенко Л. Н., Усачева М. Н. Композиционные материалы для безавтоклавной технологии (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 3(63). С. 08. <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48.

## Out-of-autoclave prepreg formation

K. I. DONETSKIY, P. N. TIMOSHKOV, A. M. SAFRONOV, V. A. GONCHAROV,  
M. I. MISHCHUN

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials of National Research Center "Kurchatov Institute",  
SRC RF, Moscow, Russia

*Considered process of manufacturing carbon fiber by vacuum forming prepregs. The reasons for the formation of porosity in carbon fiber, the preparation of raw materials for the manufacturing process of the material — carbon fabric and prepreg, as well as the technology of manufacturing prepreg and polymer composite material (PCM) based on it are considered. The physicomechanical properties of the resulting material, both elementary samples and a structurally similar element of the product, are investigated. A comparison of the properties of carbon fiber produced by both vacuum and autoclave molding prepreg.*

**Keywords:** polymer composite materials, non-autoclave molding, vacuum prepregs, semi-prepregs, physical and mechanical properties, impregnation, porosity.

## Применение в сегментах для алмазного инструмента композитной связки на нитридокремниевой матрице вместо карбидвольфрамовой

И. Р. МАНАШЕВ, канд. техн. наук

ООО «Научно-техническая производственная фирма «Эталон», г. Магнитогорск, Россия

А. В. БЕЛЯКОВ, д-р хим. наук

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия

С. И. ЦЕРМАН

ООО «Дельта», Москва, Россия

*Композиционные сегменты состоят из наполнителя (алмазных зерен) и металлической матрицы. Предложено минимальное количество конструкций универсальных композиционных сегментов, охватывающее основные случаи алмазной обработки. Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на базе соединений кремния получен композиционный материал — нитроферросилиций, успешно примененный для модификации матрицы композиционных сегментов вместо более дорогого и тяжелого карбида вольфрама. Инструмент изготовлен, испытан, введен в производство и успешно применяется на строительных объектах.*

**Ключевые слова:** обрабатываемость и абразивность, хрупкие неметаллические материалы, композиционные сегменты для алмазного инструмента на металлической связке, алмазное шлифование, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, композиционный нитроферросилиций.

Обработку алмазным инструментом применяют, как правило, на заключительной стадии производства изделий из хрупких неметаллических материалов (ХНМ).

Наиболее распространен инструмент, состоящий из алмазосодержащего режущего слоя, закрепленного на металлическом корпусе. Режущий слой применяют в сплошном исполнении либо разбивают на структурные единицы — сегменты.

Алмазосодержащие сегменты представляют собой оснащающие инструмент режущие элементы, основными компонентами которых являются алмазные режущие зерна и удерживающая их в сегментах матрица. Формально их можно считать изделиями из композиционных материалов (КМ), состоящими из двух и более компонентов: армирующих алмазных зерен, закрепленных в связующей их матрице, свойства которых по отдельности отличаются от специфических общих свойств режущего слоя [1]. Функциональное назначение

алмазных композиционных материалов (АКМ) в инструменте состоит в том, чтобы за счет основного наполнителя — алмазных режущих зерен — как самого твердого материала производить эффективное разрушение обрабатываемых ХНМ. Ряд исследователей и разработчиков алмазных инструментов [2] не только определяют их как изделия из АКМ, но и применяют для них теорию композитов. Для интенсивной обработки на таких операциях, как резка, грубая шлифовка, сверление, из-за высоких механических и термических нагрузок применяют металлическую матрицу [3, 4]. Рис. 1 демонстрирует разнообразие металломатричных сегментов, изготавливаемых производителями алмазного инструмента.



Рис. 1. Алмазосодержащие сегменты для сегментного инструмента (по материалам ООО «Дельта»)

Манашев Ильяд Рауэфович, зам. директора по РПКМ.

E-mail: mir@ntpf-etalon.ru

Беляков Алексей Васильевич, профессор.

E-mail: av\_bel@bk.ru

Церман Сергей Израильевич, главный технолог.

E-mail: cs@deltaplant.ru

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2021 г.

© Манашев И. Р., Беляков А. В., Церман С. И., 2022

На примере циркулярной распиловки дисковым инструментом процесс резания схематически изображен на рис. 2.



Рис. 2. Изображение зоны резания циркулярным инструментом [5]

Вращающийся отрезной круг врезается в деталь, выступающие из матрицы твердые алмазные зерна режущего слоя (АКМ) обеспечивают зазор между матрицей сегментов и поверхностью материала, в котором и происходит процесс резания (зона резания находится в зазоре). Алмазы внедряются в ХНМ и разрушают его, производя непосредственно резание (съем материала). Сами зерна (наполнитель АКМ) также разрушаются (износ инструмента), а продукты резания (шлам) оказывают абразивное воздействие на удерживающую алмазы матрицу, создавая на ее поверхности специфический рельеф: "кратеры" — углубления перед зернами и "хвосты кометы" с тыльной стороны. Своевременное абразивное изнашивание матрицы должно обеспечивать оптимальное выступание зерен над ее поверхностью (самозатачивание инструмента). При таком упрощенном описании процесса резания условно можно выделить два его главных аспекта. В каждом из них присутствует по две взаимодействующие пары:

- между алмазами и материалом с разрушением его и образованием частиц продуктов резания (шлама);
- шлама (а иногда и самого ХНМ) с матрицей сегментов, приводящее к ее абразивному изнашиванию.

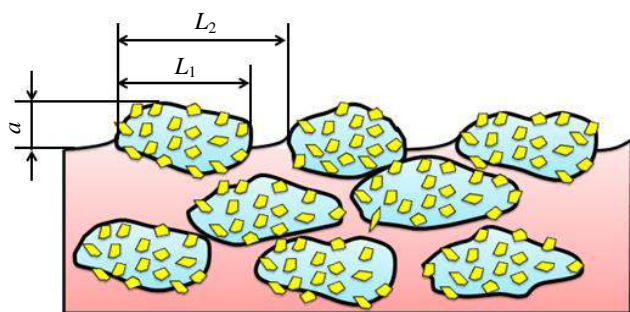
Учет сочетания этих взаимодействий позволяет создавать оптимальные конструкции АКМ.

В первой взаимодействующей паре сопоставляются, с одной стороны, физические свойства материала, определяющие трудоемкость его обработки — "обрабатываемость" [6], а с другой, — конструкция композиционных сегментов, или их структура, привязанная к станочным параметрам [7]. Понятие "структура" даёт полную характеристику режущего наполнителя: количество, качество и размер алмазных зерен, порядок их

расположения в сегментах. К станочным параметрам следует отнести мощность двигателя и параметры технологического процесса. Для унификации конструкций композиционных сегментов обрабатываемые ХНМ предложено условно разделить на две противоположные группы: "легкообрабатываемые" — непрочные ("мягкие") и "труднообрабатываемые" — прочные ("твердые") [8, 9]. Компромиссный "среднеобрабатываемый" вариант допускается [6], однако он не привязан к конкретной структуре АКМ в инструменте.

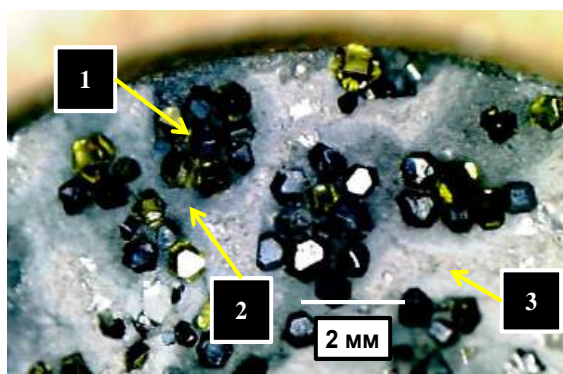
Структуру сегментов можно привязать к обрабатываемости материала. Низкая прочность ХНМ подразумевает низкие силы резания при разрушении. Структурно это обеспечивается большими расстояниями между алмазными зернами при их низкой концентрации в сегментах. Из-за низкой прочности материала каждый алмаз при резании производит большое количество распространяющихся микротрещин, сколов. Это приводит к большим разрушениям от каждого зерна и дает значительный объем, как правило, абразивного шлама. Такие условия соответствуют простейшей однородной структуре, в которой алмазы случайным образом и на значительных расстояниях друг от друга размещены в однородной матрице (условно — "одноматричные" сегменты). Более сложные структуры из-за небольшого количества режущих зерен реализовать трудно. Равномерно и однородно изнашиваемая матрица с чрезвычайно высокой стойкостью должна обеспечивать между выступающими из нее алмазами зазор, достаточный для размещения и удаления крупных абразивных частиц продуктов резания (шлама).

Для обработки прочных труднообрабатываемых материалов возможно применение сегментов предыдущей структуры с повышенным содержанием алмазов и нестойкой к износу "мягкой" матрицей, но такой инструмент работает нестабильно, склонен к потере режущих свойств из-за затупления алмазных зерен и их вырывания из матрицы. Для таких ХНМ авторами разработана специальная конструкция так называемых "умных сегментов" с повышенной режущей способностью, в структуре которых алмазные зерна сосредоточены в агрегатах с матрицей высокой твердости. Сами алмазные агрегаты произвольно распределены в безалмазной матрице с пониженной твердостью (условно — "двухматричная" структура) [10]. Это сложная, но очень эффективная структура, сочетающая высокую режущую способность и стойкость сегментов. Схематически структура такого АКМ представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Схематическое изображение боковой поверхности сегмента с агрегатной "двухматричной" структурой:**  
 $L_1$  — размер алмазного агрегата;  $a$  — выступание алмазного агрегата из сегмента;  $L_2$  —  $L_1$  — межагрегатное пространство

Излом шлифовального композитного сегмента с "двухматричной" агрегатной алмазной структурой показан на рис. 4. Режущие зерна сконцентрированы в агрегатах с твердой матрицей темно-серого цвета. Алмазные агрегаты распределены в светло-серой менее твердой матрице.



**Рис. 4. Поверхность излома сегмента с агрегатной алмазной структурой:**

1 — режущий агрегат из алмазов; 2 — твердая матрица агрегата; 3 — мягкая матрица для удержания агрегатов

Высокая концентрация зерен, включенных в агрегаты, означает небольшие расстояния между зернами внутри агрегатов. Это продуцирует повышенную концентрацию микротрещин в обрабатываемом материале в зоне резания, что облегчает разрушение и удаление сошлифовываемого припуска. При таком характере разрушения обрабатываемого ХНМ удаляемые стружки и сколы состоят из мелких неабразивных частиц. Неабразивные продукты резания прочного бетона сегментами такой конструкции не накапливаются между алмазами в агрегате, а заполняют образующиеся из-за быстрого износа "мягкой" матрицы пустоты между агрегатами. Достаточный для размещения продуктов резания объем этих пустот обеспечивается выбором нестойкого к абразивному износу материала межагрегатной второй матрицы при условии хорошего удержания самих алмазных агрегатов в этой матрице.

При описании роли структуры в первой взаимодействующей паре (алмаз—ХНМ) уже частично рассмотрено взаимодействие во второй паре (шлам—матрица композиционных сегментов), сводящееся к абразивному воздействию на инструмент. Способность истирать поверхности контактирующих с материалом тел, или абразивность, — понятие неабстрактное. Образивность можно измерить [6]. Абразивность частиц шлама, воздействующих на поверхность сегментов, зависит от свойств самих частиц: их прочности, размеров, формы, которые определяются обрабатываемостью материала, его структурой, пористостью, а также условиями резания (режимами процесса) [11]. Как уже было указано, она определяет износ матрицы сегментов, таким образом участвуя в поддержании их работоспособности. Для классификации ХНМ абразивность удобно относить к обрабатываемому материалу и к интенсивности воздействия на матрицы инструмента, (например, труднообрабатываемый неабразивный бетон").

Металломатричные АКМ в условиях современного производства инструмента изготавливают преимущественно различными методами порошковой металлургии. При изготовлении сегментов методом порошковой металлургии матрица формируется при спекании металлических порошков связки. Металлическая матрица, фиксирующая режущие зерна в АКМ, не производит резания, но участвует в его обеспечении. Помимо механического удержания алмазов в структуре сегментов и передачи силового воздействия от оборудования к алмазам матрица по мере абразивного (или гидроабразивного) износа должна обеспечивать оптимальное выступание зерен-резцов из сегментов и достаточный для размещения шлама зазор в зоне резания. Для полного использования ресурса режущих зерен изнашивание матрицы должно проходить в унисон с разрушением алмазов. Отведение из зоны резания через матрицу тепла, выделяющегося в точках контакта зерен с материалом, также относится к обеспечению процесса.

Традиционно порошки связок для металлических композиций в сегментах принято делить на три основные группы по их условной "твердости" и компонентному составу: мягкие медно-оловянистые, средней твердости на кобальтовой или железной основе и твердые на основе карбида вольфрама и кобальта [3]. Однако в рамках приведенной классификации ХНМ на две группы и с учетом особенностей их обработки можно выделить два типа матрицы АКМ и, соответственно, две группы связок для их изготовления. В условиях современного производства алмазосодержащих сегментов металлические связки чаще всего представляют собой порошковые смеси с базовым



компонентом и модифицирующими добавками, формирующими свойства матриц согласно их назначению. В качестве базового компонента связок производители инструмента применяют порошки чистых металлов, чаще всего кобальта, железа, никеля или их смеси, порошки распыленных расплавов различного состава, а также восстановленные из продуктов разложения смесей растворов солей металлов так называемые кобальтоподобные предсплавы (NEXT, KEEN, Cobolite). Для "твердой" модификации матрицы в подавляющем большинстве случаев применяют мелкий порошок и крупные частицы карбида вольфрама (WC), а также порошок твердого сплава на его базе, для "мягкой" — порошки меди, медных сплавов (бронзы, латуни).

В условиях современного алмазного производства применение волфрамсодержащих материалов сопряжено с рядом ограничений. Помимо их дефицитности и высокой стоимости, ввиду высокой плотности WC (около 15 г/см<sup>3</sup>) аддитивный вклад его в плотность матрицы велик, что приводит к ее нерентабельности. Кроме того, при значительном содержании в связке WC для качественного спекания матрицы требуются очень высокие температуры выдержки. Попытки авторов заменить добавки на основе вольфрама на другие промышленно производимые твердые материалы, такие, как соединения титана, железа с некоторыми неметаллами, не увенчались успехом: спечь связку до получения прочного матричного композита не удалось. Поэтому для оптимизации состава металлических связок алмазного инструмента потребовалась разработка новых материалов.

В НТПФ "Эталон" разработана технология синтеза композиционного нитрида ферросилиция. Материал такой марки представляет собой композит на основе нитрида кремния со связкой из железокремнистых соединений, полученный по технологии "металлургического" самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Композиционный нитрид ферросилиция стал известен отечественной промышленности в 2005 г. благодаря освоению его выпуска на производственной площадке ООО НТПФ "Эталон" (г. Магнитогорск). Здесь впервые было реализовано его крупнотоннажное производство, основанное на принципах так называемого металлургического СВС [12, 13]. В таком варианте СВС-процесса основным сырьём для синтеза композиционных материалов являются "металлургические" сплавы — раскислители, легирующие металлы, ферросплавы и т. д. При синтезе нитридов металлов и ферросплавов горение реализуется в системе "твёрдое—газ", где одним из реагентов является

азот. СВ-синтез протекает в режиме фильтрационного горения, при котором избыточное давление азота играет большую роль для его успешной реализации. Это связано с тем, что фильтрация азота осуществляется за счёт самопроизвольно поддерживающегося перепада давлений, который возникает при поглощении азота в волне горения. При этом структура и состав получаемых продуктов сильно зависят от размера частиц шихтовых порошков, пористости и начальной температуры шихты, массы азотируемой смеси, добавки в исходную смесь технологических разбавителей, их состава [14, 15]. В случае получения нитрида ферросилиция основными шихтовыми компонентами в зависимости от марки продукта являются сплавы ферросилиция высокопроцентных марок и технического кремния. При этом в предложенном процессе имеется возможность использования в качестве сырья не товарных продуктов ферросплавной промышленности, а некондиционных дисперсных материалов, образующихся в процессе измельчения кремнистых сплавов (продукты улавливания при дроблении (ПУД), мелочь, аспирационные пыли и т. д.) [16]. Утилизация ПУД ферросилиция остаётся большой проблемой для отечественных производителей, поскольку субмикронный состав такого продукта делает неэффективным его повторное использование в плавке, так как при загрузке в печь окускованного материала большая его часть сгорает и попадает в газоочистку.

Микроструктуру композиционного нитрида ферросилиция СВ-синтеза демонстрирует рис. 5. На нем показано, что основной фазой композита является  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, объёмная доля которого по подсчетам составляет более 85—90 %. При этом железо и силициды распределены по объёму в виде отдельных островков размером до 50—100 мкм.

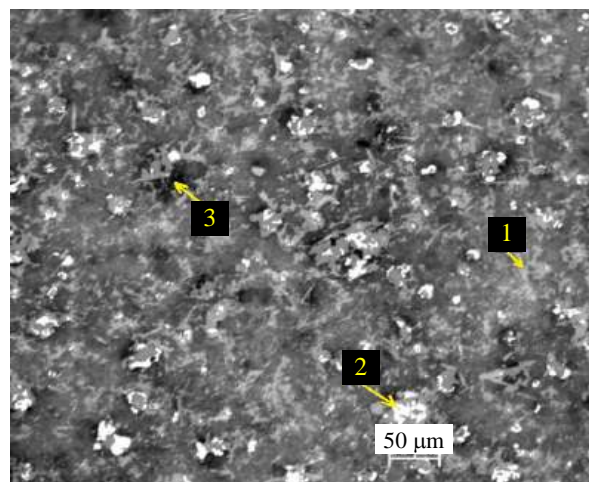


Рис. 5. Микроструктура СВС нитрида ферросилиция: 1 —  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 2 — Fe<sub>3</sub>Si, FeSi, FeSi<sub>2</sub>, Fe; 3 — поры

Разработка и создание производства композиционного нитрида ферросилиция обусловлены началом выпуска трансформаторной стали нитридного ингибирования на Магнитогорском металлургическом комбинате. Одной из наиболее трудных задач при освоении этой технологии в конвертерном цехе ПАО "ММК" было обеспечение в составе металла повышенной концентрации азота в довольно узких пределах [17]. Удачным решением данной задачи стало применение композиционного нитрида ферросилиция марки NITRO-FESIL® A N25 производства НТПФ "Эталон" (табл. 1). По разработанной технологии легирующий материал использовали в кусковом виде для предварительного насыщения стального полупродукта азотом при выпуске плавки из конвертера. В процессе внепечной обработки содержание азота корректировали порошковой проволокой с наполнителем из этого же материала. Такая технология легирования обеспечила стабильное содержание азота в готовом металле в пределах 0,009–0,011 % и была принята к промышленному использованию.

В результате изучения литературных источников установлено, что нитрид ферросилиция  $\text{FeSi}_3\text{N}_4$ , или, как его еще называют, "железистый нитрид кремния", широко применяют и за рубежом при производстве неформованных огнеупоров для доменного производства [18, 19]. Он выполняет важную роль упрочняющего компонента в составе лётчных масс для доменных печей. Упрочняющий эффект происходит в результате термического разложения нитрида ферросилиция в начальный момент выпуска плавки с последующим образованием кристаллов вторичного карбида кремния, а также других тугоплавких соединений. Кристаллы  $\text{SiC}$  имеют игольчатую форму и образуют в лётчном канале прочный каркас, стойкий к эрозионному и химическому воздействию чугуна и шлака. Для обеспечения ритмичной работы чугунной лётки концентрация  $\text{FeSi}_3\text{N}_4$  в составе лётной массы может варьироваться в довольно широких пределах в зависимости от объема домны. Для печей большого объема необ-

ходима огнеупорная масса с большим его содержанием (10–20 %  $\text{FeSi}_3\text{N}_4$ ). Композиционный нитрид ферросилиция марки NITRO-FESIL® начали широко использовать специализированные производители огнеупорных лётчных масс. Освоение производства улучшенных лётчных масс с нитридом ферросилиция позволяет отечественным компаниям довольно успешно конкурировать с импортными поставщиками, занимающими большую долю рынка таких огнеупоров.

Из рис. 5 видно, что композиционный CBC-нитрид ферросилиция (продукт NITRO-FESIL® N30; табл. 1) состоит главным образом из твердого соединения —  $\beta$ -нитрида кремния — с небольшими включениями менее твердых железокремнистых соединений и имеет небольшую пористость. При измельчении такого композита можно получить порошок, состоящий главным образом из твердых частиц нитрида кремния, при спекании которого получают твердую и прочную керамику [19]. Этот измельченный порошок и был предложен в качестве альтернативы вольфрамсодержащим добавкам в связки для алмазного инструмента. Это новое, нетрадиционное применение композиционного материала для огнеупоров.

На производственной базе инструментального завода "Дельта" проведено совместное с НТПФ "Эталон" и кафедрой керамики и огнеупоров РХТУ им. Д. И. Менделеева исследование по разработке состава металлической связки алмазного инструмента с применением композиционного материала NITRO-FESIL® N30 вместо традиционных составов, содержащих карбид вольфрама. Поскольку наибольшее потребление карбида вольфрама связано со шлифовальным алмазным инструментом для стройиндустрии, исследования проводили именно в этом направлении. Разработана технология изготовления алмазосодержащих сегментов, и определены свойства спеченной матрицы. Изготовлен испытательный инструмент для грубого шлифования бетонных изделий и покрытий, проведены его сравнительные испытания с серийным заводским инструментом, содержащим карбид вольфрама.

Таблица 1

Химический состав композиционного нитрида ферросилиция

Марка	Массовая доля, %					
	N	Si	Al	Ti	C	O
NITRO-FESIL® A N25 (ТУ 0821-056-21600649-2016 с изм. 2)	27,5	49,8	0,6	0,13	0,2	0,7
NITRO-FESIL® N30 (ТУ 1517-059-21600649-2016 с изм. 2)	30,8	52,5	1,0	—	0,4	1,0

Для замены применяемых заводом железных связок с различным в зависимости от назначения инструмента содержанием карбида вольфрама в виде твердосплавной смеси ВКЗ разработана универсальная железная связка, содержащая композиционный нитрид ферросилиция. Информация о назначении и составах связок приведена в табл. 2. Классификацию бетонов по обрабатываемости и абразивности проводили согласно [6, 8].

Для определения физико-механических свойств металлических матриц из тестируемых связок (см. табл. 1) образцы в виде брусков изготавливали из порошков методом горячего прессования на оборудовании производства фирмы "Dr. Fritsch" (Германия). Режимы технологических процессов и некоторые измеренные свойства матриц из связок сведены в табл. 3.

Как следует из результатов исследований, экспериментальный безвольфрамовый состав (Св. 3) по механическим свойствам занимает промежуточное положение между составами с содержанием карбида вольфрама 25 % (Св. 1) и 70 % (Св. 2). Кроме того, спекание проводят при меньших значениях максимальной температуры и времени выдержки, экономя на электроэнергии и стойкости графитовых прессформ. Меньшая плотность без-

вольфрамовой связки Св. 3 (см. табл. 3) дает экономии на расходе массы связки при изготовлении инструмента и облегчает инструмент (плотность 7,5 г/см<sup>3</sup> для безвольфрамовой связки; 9,0 и 12,6 г/см<sup>3</sup> для карбидвольфрамовых).

В двухматричную структуру сегментов для обработки прочных неабразивных бетонов ([7, 9]; табл. 2) помимо износостойкой (твердой) матрицы, удерживающей режущие зерна в агрегатах, входит нестойкая к абразивному износу (мягкая) связка, удерживающая сами агрегаты. Традиционные "мягкие" связки [3] в такой структуре технологически невозможно совместить с "твердой" связкой алмазных агрегатов, спекаемых при высоких температурах. В таких условиях (см. табл. 3) они сильно размягчаются или даже начинают расплавляться и вытекать из графитовых форм. В этом случае уместно, например, применение сплавов меди с небольшим количеством таких тугоплавких металлов, как железо, кобальт, никель. На производстве "Дельта" опробованы порошки медно-железных связок, полученные распылением расплавов Cu—Fe, а также механохимическим взаимодействием компонентов в вибромельнице. Некоторые механические свойства спеченных при 950 °С и давлении 40 МПа композиций медь—железо приведены в табл. 4.

Таблица 2

Исследуемые связки для алмазного инструмента

Обозначение связки	Св.1	Св.2	Св.3
Категория связки	Серийная	Серийная	Экспериментальная
Назначение по обработке	Легкообрабатываемый непрочный абразивный бетон*	Труднообрабатываемый прочный неабразивный бетон**	Все марки бетона
Содержание твердого компонента, масс. %	25 % ВКЗ	70 % ВКЗ	10 % NITRO-FESIL® N30
Структура сегментов	Одноматричная (см. рис. 3)	Двухматричная (см. рис. 4)	Любая

\* и \*\* — абразивный и неабразивный относится к свойствам образующегося после резания шлама.

Таблица 3

Технология горячего прессования образцов и физико-механические свойства спеченных связок

Параметры технологии и свойства матрицы	Обозначение связки		
	Св. 1	Св. 2	Св. 3
Давление холодного прессования, МПа	200	200	200
Температура спекания, °С	950	960	900
Давление горячего прессования, МПа	40	40	40
Время выдержки при максимальной температуре, с	360	360	240
Плотность спеченной матрицы $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	9,0	12,6	7,5
Твердость, HRC	43	56	53
Прочность $\sigma_{из}$ , МПа	975	920	965

Таблица 4

Некоторые свойства спеченных медно-железных композиций, полученных различными способами

Способ приготовления связки Cu—Fe	Механические свойства спеченной матрицы Cu—Fe		
	Твердость, HRC	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность, МПа
Механическое смешивание (смеситель типа "Турбула")	62	8,75	610
Механохимия в вибромельнице (6 ч)	79	8,62	720
Распыление расплава Cu—Fe	75	8,55	720

Результаты измерения физико-механических свойств "мягких" составов матриц, спеченных из порошка распыленного расплава и из порошка механохимического композита, сопоставимы и показывают их взаимозаменяемость при изготовлении сегментов с двухматричной структурой, в то время как простое перемешивание компонентов не обеспечивает качественного спекания при изготовлении инструмента.

Для проведения испытаний разработанного безвольфрамового состава с композиционной нитридкремниевой связкой в условиях ООО "Дельта" был изготовлен алмазный инструмент в виде сменных шлифовальных элементов (рис. 6), напаянных алмазосодержащими сегментами различного состава и формы, изготовленными согласно технологиям, приведенным в табл. 3.

Форму и размещение на корпусе сегментов выбирали в зависимости от типа обрабатываемого бетона, учитывая, что условное деление бетонов на два типа ("абразивные—непрочные" и "неабра-

зивные—прочные") охватывает основной объем работ с применением шлифовального алмазного инструмента на объектах стройиндустрии. Для шлифовки абразивного непрочного бетона применяли сегменты в форме прямоугольных брусков в количестве 6 штук на каждый сменный элемент. Бруски такой формы работают как прямые лезвия, интенсивно срезающие припуск на поверхности шлифуемого непрочного материала. Для обеспечения равномерного износа бруски сконцентрированы на корпусе элемента с его периферийной (зауженной) стороны. Структуру сегментов также выбирали в соответствии с типом бетона. Для обработки абразивного (менее прочного) бетона применяли сегменты с однородной структурой ("одноматричные" сегменты). Особенности конструкции брусковых сегментов для испытаний перечислены в табл. 5.

Макроструктура излома "одноматричных" сегментов с вольфрамом и без него для обработки абразивных бетонов показана на рис. 7.

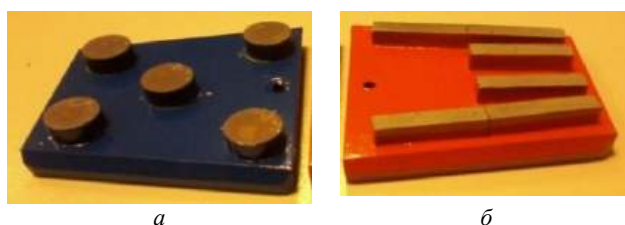


Рис. 6. Сменные шлифовальные элементы типа "франкфурт" с "таблеточными" (а) и "брусковыми" (б) сегментами для сравнительных испытаний серийных вольфрамовых и безвольфрамового составов при шлифовании бетона

Таблица 5

Конструкция инструмента и состав сегментов для испытаний.  
Результаты сравнительных испытаний экспериментального инструмента

Инструмент для испытаний	Марка бетона			
	Непрочный бетон В15 (М200)		Прочный бетон В45 (М450)	
Связка	Св. 1, серийная	Св. 3, эксперимент	Св. 2, серийная	Св. 3, эксперимент
Форма и размер сегмента	Брусек 40×8×8 + 2	Брусек 40×8×8 + 2	Таблетка Ø20×6 + 2	Таблетка Ø20×6 + 2
Количество сегментов в элементе, шт.	6	6	5	5
Структура сегментов	Однородная (рис. 6, а)	Однородная (рис. 6, б)	Двухматричная (рис. 7, а)	Двухматричная (рис. 7, б)
Алмазы: марка, размерность, концентрация	АС300, Ti-покрытие 400/315, κ = 16	АС300, Ti-покрытие 400/315, κ = 16	АС300, Ti-покрытие 630/400, κ = 25 (κ1 = 75)	АС300, Ti-покрытие 630/400, κ = 25 (κ1 = 75)
Скорость шлифования, дм³/ч	21,0	22,5	7,5	9,0
Стойкость комплекта из 6 элементов, м³	1,00	0,95	0,55	0,50

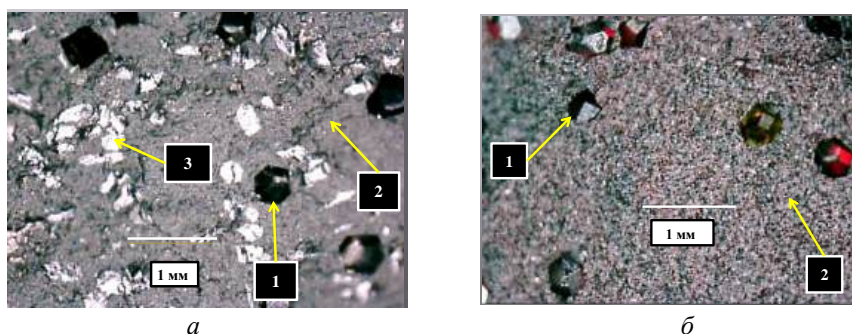


Рис. 7. Макроструктура излома сегментов для обработки абразивного непрочного бетона:  
а — с вольфрамосодержащей матрицей на связке Св. 1; б — с безвольфрамовой матрицей на связке Св. 3;  
1 — алмазное зерно; 2 — металлическая матрица; 3 — крупные твердые частицы в матрице



Размер частиц карбидвольфрамовой добавки в связке Св. 1 составляет порядка трех микрон, в то время как зернистость экспериментального нитридкремниевого композита в связке Св. 3 — до 63 мкм.

Последнее обуславливает больший размер зерна в спеченной экспериментальной матрице (см. рис. 6, б). Этот фактор снижает стойкость матрицы к абразивному износу, но повышает режущую способность инструмента. В рассматриваемом случае для защиты от абразивного износа вольфрамсодержащая матрица содержит крупные частицы плавленого карбида вольфрама ("рэлита"). На рис. 6, а они видны как блестящие светлые включения. В экспериментальную матрицу для этой цели добавляли легированную дробь, частицы которой плохо различимы на фоне матрицы при данном увеличении (см. рис. 6, б).

Для обработки прочного неабразивного бетона применяли сегменты в форме цилиндрических таблеток, которая снижает возможность образования крупных выколов при скалывающем воздействии фронта сегмента в процессе шлифования прочного бетона. Для интенсификации процесса шлифования и снижения вероятности "затупления" алмазов количество сегментов, напаянных на каждый сменный элемент, уменьшили с 6 до 5 штук, повысив тем самым рабочее давление на инструменте. "Двухматричная" структура цилиндрических сегментов способствует оптимизации нагрузки на алмазы, интенсификации разрушения бетона и облегчает удаление продуктов резания из зоны. Особенности конструкции таблеточных сегментов для испытаний также помещены в табл. 5.

Макроструктура "двухматричных" сегментов (содержащих в своем составе карбид вольфрама и экспериментальных безвольфрамовых) показана на рис. 8. Принципиальных отличий изломов сегментов не прослеживается. В обоих сегментах алмазные зерна агрегированы в отдельные гранулы с

твердой первой матрицей серого цвета, которые распределены в поле мягкой второй матрицы.

Рис. 8 также показывает, как размеры зерен исходных порошков в связках Св. 2 и Св. 3 определяют размер зерна в спеченных алмазосодержащих матрицах. Излом вольфрамсодержащей матрицы ровный, а у безвольфрамовой он несколько "раковистый", что характерно для увеличенной зернистости компонентов связки.

Сравнительные испытания вольфрамсодержащих и нитроферросилицидной связок в инструменте проводили на операции сухого шлифования бетонных покрытий различных марок с применением мобильных шлифовальных установок GM-245, оснащенных шестью сменными шлифовальными элементами. Исследования проводили на заводском испытательном стенде и на строительных объектах. Усредненные результаты сравнительных испытаний по шлифованию различных марок бетонов с подробным описанием конструкций инструментов приведены в табл. 5.

Инструмент с обеими конструкциями сегментов на разработанной связке продемонстрировал положительные результаты на различных бетонах. Применение в "одноматричных" сегментах связки Св. 3 для обработки низкомарочных абразивных бетонов позволяет повысить скорость шлифования по сравнению с серийным инструментом (Св. 1). Некоторое снижение ресурса инструмента (порядка 5 %) компенсируется значительным уменьшением его себестоимости за счет низкой цены на композиционный нитроферросилиций. Аналогичные результаты получены и при применении экспериментального "двухматричного" инструмента (Св. 3) при обработке прочных неабразивных бетонов. Снижение ресурса здесь несколько больше, однако экономический эффект от замещения значительного количества карбида вольфрама его компенсирует.

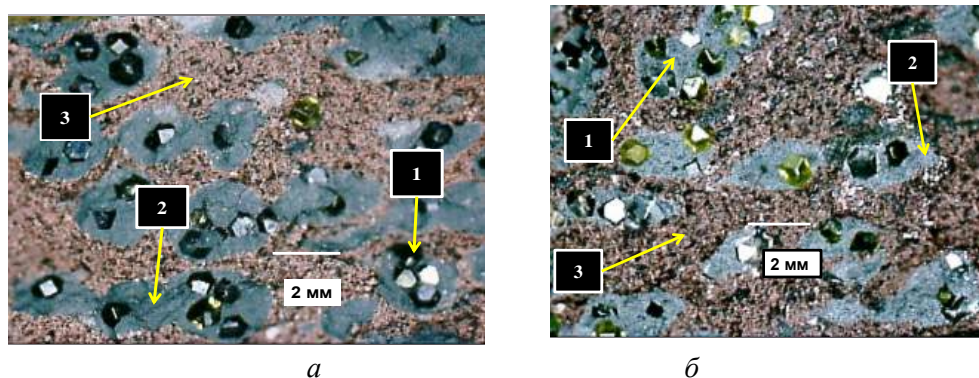


Рис. 8. Макроструктура излома сегментов для обработки неабразивного прочного бетона:

а — с вольфрамсодержащей "твердой" матрицей на связке Св. 2 (агрегаты серого цвета);

б — с безвольфрамовой "твердой" матрицей на связке Св. 3 (агрегаты серого цвета);

1 — алмазное зерно; 2 — алмазосодержащая матрица; 3 — безалмазная матрица

Испытания инструмента показали, что при унификации ХНМ по обрабатываемости появляется возможность предложить минимальное количество конструкций универсальных композиционных сегментов, охватывающее основные случаи обработки. Эти конструкции должны быть обеспечены металлическими композициями с конкретными физико-механическими характеристиками в качестве матрицы сегментов. Структура наполнителя (алмазных зерен) и металлическая матрица — две главные характеристики композиционных сегментов. Для их реализации эффективно применение материалов из смежных с алмазными технологиями отраслей.

Применение в качестве твердого компонента связок для алмазного инструмента композиционного материала марки NITRO-FESIL® N30 на основе нитрида кремния позволяет создавать шлифовальный инструмент, практически не уступающий по качеству инструменту на более дорогой "элитной" связке из карбида вольфрама. Испытания подтвердили "универсальность" разработанной матрицы в алмазных сегментах различных конструкций: как в одноматричных с повышенной стойкостью к абразивному износу, так и в двухматричных, где предусмотрено сочетание стойкой к абразивному износу матрицы с матрицей, имеющей пониженную стойкость. Разработанную связку можно применять для реализации любой из этих конструкций. Высокая режущая способность и неплохой ресурс экспериментальных образцов позволили заводу "Дельта" полностью перевести ряд штатных номенклатурных позиций шлифовальных инструментов на безвольфрамовые "нитроферросилицидные" связки. В дальнейших работах предполагается выделить "нитроферросилицидные" связки в отдельный класс материалов для изготовления алмазосодержащих сегментов. С использованием возможностей "металлургического" СВС-процесса намечены дальнейшие исследования по разработке и получению новых перспективных композиционных материалов на основе твердых тугоплавких соединений для применения в алмазном инструменте.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по композиционным материалам. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. Любина Дж. — М.: Машиностроение, 1988. — 448 с.

2. Верещагин В. А., Журавлев В. В. Композиционные алмазосодержащие материалы и покрытия. — Мн.: Навука і тэхніка, 1991. — 208 с.
3. Александров В. А. Обработка природного камня алмазным дисковым инструментом. — Киев: Наук. думка, 1979. — 240 с.
4. Курганова Ю. А., Колмаков А. Г. Конструкционные металломатричные композиционные материалы. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 141 с.
5. Janusz Konstanty. Powder Metallurgy Diamond Tools. — Krakow: ELSEVIER, 2005. — 152 p.
6. Сычев Ю. И., Махмутов А. Ш. Природнокаменное материаловедение. — Петропавловск-Камчатский: Камчат-пресс, 2013. — 342 с.
7. Церман С. И., Беляков А. В. Сегменты алмазного инструмента с комбинированной структурой — путь к созданию "умных сегментов" // Новые огнеупоры. 2016. № 11. С. 52—58.
8. Беляков А. В., Церман С. И. Эффективность "умных сегментов" при периферийном и торцевом алмазном шлифовании абразивных и неабразивных хрупких материалов // Новые огнеупоры. 2020. № 3. С. 41—49.
9. Церман С. И., Беляков А. В., Романов В. В. Структурированный алмазный инструмент и способ его изготовления. Патент РФ № 2650459 C1, МПК D24D 3/06, B24D 18/00 (2006/01). Опубл. 13.04.18. Бюл. № 11.
10. Engels A. The Role of Particles Per Carat in Diamond Tool Behaviour // Industrial Diamond Review. 2003. № 2. P. 39—45.
11. Ziatdinov M. Kh., Shatokhin I. M. Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Ferrosilicon Nitride // Steel in Translation. 2008. V. 38. № 1. P. 39—44.
12. Ziatdinov M. Kh. Metallurgical SHS processes as a route to industrial-scale implementation: An autoreview // Int. J. Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2018. V. 27. № 1. P. 1—13.
13. Мержанов А. Г. Научные основы, достижения и перспективы развития процессов твердопламенного горения // Изв. РАН. Сер. химическая. 1997. Т. 46. № 1. С. 7—31.
14. Munir Z. A., Holt J. B. The combustion synthesis of refractory nitrides. Part 1. Theoretical analysis // J. Materials Science. 1987. V. 22. Iss. 2. P. 710—714.
15. Ziatdinov M. Kh., Shatokhin I. M., Manashev I. R. SHS processing of cyclone ferrosilicium dust // CIS Iron and Steel Review. 2020. V. 20. P. 12—16.
16. Сеничев Г. С., Тахаутдинов Р. С., Бодяев Ю. А. и др. Совершенствование технологии выплавки трансформаторной стали в конверторном цехе ОАО ММК // Сталь. 2006. № 3. С. 17—22.
17. Kometani K., Lizuka K., Kaga T. Behavior of Ferro-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in Blast Furnace Tap Hole Mud // Taikabutsu. 1998. V. 50. № 6. P. 326—330.
18. Lopes A. B. The Influence of ferro silicon nitride on the performance of the modern taphole mud for blast furnace // Refractories Applications and News. 2002. V. 7. № 5. P. 26—30.
19. Лукьянова О. А., Федоров В. А., Новиков В. Ю., Красильников В. В., Сирота В. В. Механические свойства керамики на основе нитрида кремния // Вестник Тамбовского университета. Сер. "Естественные и технические науки". 2016. Т. 21. Вып. 6. С. 2166—2171. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2166-2171.



## **Application in segments for diamond tools of a composite bond based on a silicon nitride matrix instead of tungsten carbide**

I. R. MANASHEV

LLC "Scientific and technical production company "Etalon", Magnitogorsk, Russia

A. V. BELYAKOV

Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russia

S. I. TSERMAN

LLC "Delta", Moscow, Russia

*Composite segments consist of a filler (diamond grains) and a metal matrix. A minimum number of designs of universal composite segments is proposed, covering the main cases of diamond processing. By the method of self-propagating high-temperature synthesis based on silicon compounds, a composite material was obtained: nitroferrosilicon, which was successfully used to modify the matrix of composite segments instead of the more expensive and heavy tungsten carbide. The tool has been manufactured, tested, introduced into production and successfully used at construction objects.*

**Keywords:** machinability and abrasiveness, brittle non-metallic materials, composite segments for metal-bonded diamond tools, diamond grinding, self-propagating high-temperature synthesis, composite nitroferrosilicon.

## Исследование структуры и механических свойств слоистого композиционного материала, состоящего из чередующихся слоев матричного композиционного материала на основе молибдена и армирующего слоя на основе тугоплавкого металла

А. Н. БОЛЬШАКОВА, канд. хим. наук; И. Ю. ЕФИМОЧКИН; А. П. БОБРОВСКИЙ

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»

национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ГНЦ РФ, Москва, Россия

*Проведены исследования микроструктуры и механических свойств многослойных композиционных материалов, состоящих из чередующихся слоев металллокерамического композиционного порошка на основе молибдена и слоев металлических фольг молибдена, вольфрама и тантала. Исследование направлено на определение прочностных характеристик слоистого композиционного материала с упрочняющим слоем на основе тугоплавкого металла и изучение микроструктуры разлома материала после проведенных прочностных испытаний. В результате исследования прочностных характеристик установлено, что слоистый композиционный материал, армированный слоями тантала, обладает прочностью при изгибе 1000 МПа и плотностью 9,7 г/см<sup>3</sup>; армированный слоями молибдена, — прочностью при изгибе 760 МПа и плотностью 8,9 г/см<sup>3</sup>; армированный слоями вольфрама, — прочностью при изгибе 839 МПа и плотностью 11,4 г/см<sup>3</sup>. Исследование микроструктуры слоистого материала после проведения испытания на изгиб и после проведения термообработки при 1600 °С показало, что расслоения материала не происходит ни после испытаний на изгиб, ни после проведенной термообработки, что свидетельствует об образовании прочных металлических связей при компактировании слоистой структуры.*

**Ключевые слова:** механическое легирование, порошковая металлургия, слоистые металлические композиционные материалы.

Слоистые металлические композиционные материалы состоят из двух или более слоев (или пластин) различных металлов, соединенных друг с другом таким образом, чтобы свойства получаемой композиции значительно превосходили свойства составляющих ее компонентов. Путем тщательного подбора этих слоев можно контролировать прочностные характеристики металлических композиционных материалов, а также улучшать коррозионную стойкость, теплофизические и электрические характеристики.

Создание новой перспективной высокотемпературной техники невозможно без разработки новых высокотемпературных материалов [1, 2]. Зачастую технические и эксплуатационные характе-

ристики таких изделий напрямую связаны с рабочей температурой используемых конструкционных материалов [3]. Известно, что никелевые жаропрочные сплавы хотя и хорошо себя зарекомендовали во многих изделиях, однако достигли предела рабочих температур [4—7]. В результате перспективным представляется использование в конструкциях высокотемпературной техники тугоплавких материалов, таких, как вольфрам, молибден, ниобий и т. д., которые способны сохранять работоспособность при температурах до 2000 °С [8]. Однако использование тугоплавких металлов в конструкциях связано с рядом проблем, это прежде всего повышенная хрупкость при комнатной температуре [9], недостаточная трещиностойкость [10]. Поэтому исследования, направленные на решение указанных проблем, являются актуальными. Создание в конструкционных материалах слоистой структуры — один из эффективных способов повышения комплекса их физико-механических и эксплуатационных характеристик [11]. Применение слоистых металлических композиционных материалов (МКМ) позволяет не только повысить надёжность и работоспособность оборудования, но и экономить дорогостоящие ма-

Большакова Александра Николаевна, начальник лаборатории.

E-mail: alexa20486@mail.ru

Ефимочкин Иван Юрьевич, заместитель начальника лаборатории.

E-mail: iefimochkin@mail.ru

Бобровский Андрей Павлович, начальник сектора.

E-mail: ai.am.mcm@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2021 г.

© Большакова А. Н., Ефимочкин И. Ю., Бобровский А. П., 2022

териалы. В слоистых МКМ чередующиеся слои могут быть выполнены из одного или различных материалов. В результате между слоями может образовываться различный тип связи, от которого зависят свойства композита в целом. Возможность формирования МКМ обусловлена совместимостью входящих в его состав компонентов. Для получения оптимальных показателей свойств слоистых МКМ межфазное взаимодействие должно быть ограничено. Известно, что стабильные свойства МКМ при повышенных температурах зависят от химической (термодинамической и кинетической) совместимости компонентов [12]. При создании слоистых металлических композиционных материалов важную роль имеет технология их получения, т. к. при воздействии высокой температуры целостность слоистой структуры материала может быть нарушена частичным или полным растворением одного слоя в другом, либо в процессе получения достаточная температура при соединении слоев может отрицательно сказаться на дальнейшей эксплуатации материала под нагрузкой, может происходить расслоение, что повлечет за собой ограничения при повторной эксплуатации материала [13].

Используемые в качестве матричного материала тугоплавкие металлы отличаются высокими температурами плавления и модулем упругости, а также высокой термической стабильностью, но, как правило, имеют низкий коэффициент теплового расширения и относительно высокую плотность [14].

Структура большинства жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлов представляет собой гетерогенные сплавы, основой которых является твердый раствор. Упрочнение при легировании объясняется тем, что в результате взаимодействия растворенных атомов с дислокациями происходит закрепление или блокирование дислокаций [15]. Во многих сплавах на основе тугоплавких металлов, содержащих повышенное количество примесей внедрения, образуются избыточные фазы типа карбидов, силицидов, нитридов и других соединений, которые также способствуют упрочнению сплавов.

Данная работа направлена на установление взаимосвязи между природой армирующего слоя и

физико-механическими характеристиками слоистого МКМ на основе молибденовой матрицы, содержащей в составе армирующий слой. Композиционный материал системы  $\text{Mo—Si—B}$  за счет использования в составе керамических наполнителей отличается повышенной хрупкостью при комнатной температуре. При выборе материала для армирующего слоя учитывали несколько факторов, таких, как температура плавления, склонность к образованию соединений с матричным материалом. При этом использование выбранного материала армирующего слоя должно обеспечивать увеличение прочностных характеристик слоистого композиционного материала при комнатной температуре по сравнению с исходным матричным материалом. Исходя из перечисленных факторов в качестве материала армирующего слоя для дальнейших исследований были выбраны виды фольги из молибдена, вольфрама и тантала.

### Материалы и методика эксперимента

Исследованы образцы композиционных материалов слоистой структуры (слоистые МКМ), состоящие из чередующихся слоев матричного композиционного материала системы  $\text{Mo—Si—B}$  и армирующего слоя на основе тугоплавкого металла ( $\text{Mo}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{W}$ ).

Композиционные гранулы МКМ на основе молибдена получали методом высокоэнергетического механохимического синтеза из элементарных порошков. Для создания слоистого МКМ использовали металлическая фольга ( $\text{Mo}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{W}$ ) толщиной 0,3 мм. Порошковую композицию материала системы  $\text{Mo—Si—B}$  и металлическую фольгу тугоплавких металлов компактировали на установке искрового плазменного спекания FCT H-HP D 25 (Германия). В графитовую пресс-форму порошковую композицию укладывали между металлической фольгой равными долями. Далее проводили процесс искрового плазменного спекания в вакууме.

Для оценки микроструктуры и прочностных характеристик было выбрано два слоя металлической фольги. Микроструктура образцов МКМ, армированных фольгами выбранных тугоплавких металлов, представлена на рис. 1.

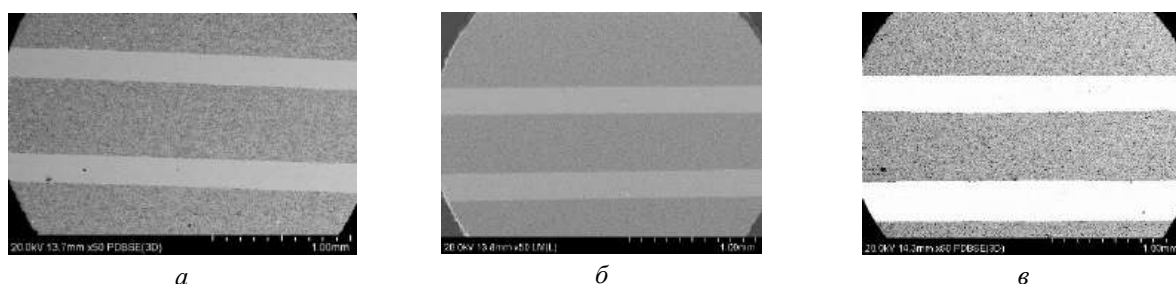


Рис. 1. Микрофотографии слоистого композиционного материала на основе  $\text{Mo}$ , армированного молибденовой фольгой (а), танталовой фольгой (б), вольфрамовой фольгой (в)

Была изучена микроструктура и проведены физико-механические испытания изготовленных образцов слоистых металлических композиционных материалов. Анализ микроструктуры проделан с помощью растрового электронного микроскопа в режиме отраженных электронов, исследование проводилось на микрошлифах в продольном сечении. Проведено исследование физико-механических характеристик высокотемпературных слоистых металлических композиционных материалов на молибденовой матрице (плотность — по ГОСТ 18898-89, прочность при изгибе — по ГОСТ 25.604-82, ударную вязкость образцов определяли по ГОСТ 26528-98 на маятниковом копре на образцах без надрезов). Все испытания проводили при комнатной температуре.

### Результаты исследований и их обсуждение

В результате исследования плотности полученного слоистого композиционного материала на основе молибденовой матрицы установлено, что среднее значение плотности МКМ с молибденовой фольгой составляет  $8,9 \text{ г/см}^3$ , с вольфрамовой —  $11,4 \text{ г/см}^3$ , с танталовой —  $9,7 \text{ г/см}^3$ . Плотность матричного материала МКМ системы  $\text{Mo—Si—B}$  составляет  $8,6 \text{ г/см}^3$ .

Исследование микроструктуры образцов слоистого МКМ проводили на нетравленных микрошлифах. Анализ микроструктуры проводили в режиме отраженных электронов. На полученных изображениях фазы на основе элементов с не-

большой атомной массой выглядят темнее фаз на основе элементов с большей атомной массой (см. рис. 1).

Из данных, представленных на рис. 1, видно, что после высокотемпературного компактирования гранул МКМ на основе  $\text{Mo}$  с металлическими фольгами тугоплавких металлов ( $\text{Mo}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{W}$ ) и последующего охлаждения происходит формирование слоистой структуры с четкой границей раздела без образования участков с расслоением матричного материала и армирующего компонента.

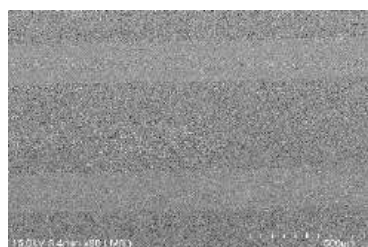
Результаты механических испытаний на трехточечный изгиб слоистых композиционных материалов на основе молибденовой матрицы, а также результаты определения значений плотности и ударной вязкости представлены в таблице. Прочностные испытания проводили при комнатной температуре ( $20^\circ\text{C}$ ). Также для сравнения в таблице приведены данные по прочности матричного материала.

Из полученных данных видно, что среди представленных матричных материалов наилучшими прочностными характеристиками обладает слоистый композиционный материал, армированный слоями тантала (прочность при изгибе  $1000 \text{ МПа}$  и ударная вязкость  $27 \text{ кДж}\cdot\text{м}^2$ ). Однако при этом данный композит обладает несколько более высокой плотностью, чем неармированный композит на основе  $\text{Mo}$ .

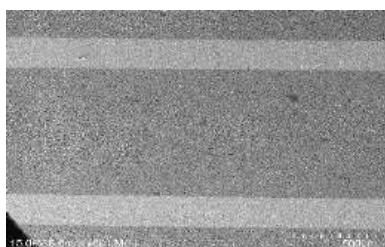
Для исследования возможной диффузии компонентов армирующего слоя в матричный материал слоистого композиционного материала на основе  $\text{Mo}$  провели термообработку его образцов при температуре  $1600^\circ\text{C}$  и проанализировали микроструктуру образцов. Результаты исследований микроструктуры представлены на рис. 2.

Прочностные характеристики матричных материалов

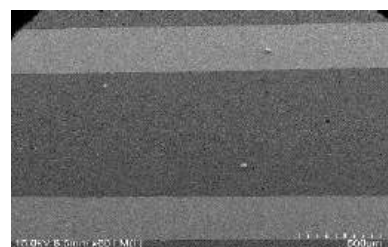
Физико-механические характеристики	МКМ на основе $\text{Mo}$	МКМ на основе $\text{Mo}$ — фольга $\text{Mo}$	МКМ на основе $\text{Mo}$ —фольга $\text{Ta}$	МКМ на основе $\text{Mo}$ —фольга $\text{W}$
Прочность при изгибе, МПа	720	760	1000	839
Ударная вязкость, $\text{кДж}\cdot\text{м}^2$	16,3	15,4	27,0	11,2
Плотность, $\text{г/см}^3$	8,6	8,9	9,7	11,4



а



б



в

Рис. 2. Микрофотографии слоистого композиционного материала на основе  $\text{Mo}$ , армированного молибденовой фольгой (а), танталовой фольгой (б), вольфрамовой фольгой (в), после термообработки при  $1600^\circ\text{C}$

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что после термообработки при 1600 °С отслоения армирующих слоев (металлическая фольга Mo, Ta, W) от матричного слоя не происходит. Также установлено, что видимые зоны диффузионного взаимодействия между слоями в композиционном материале отсутствуют. Это подтверждает правильность выбора материалов армирующих слоев и матрицы и свидетельствует о стабильности структуры.

### Заключение

Изготовлены образцы слоистых металлических композиционных материалов, армированные молибденовой, вольфрамовой и танталовой фольгой. Материалы получены методом высокоэнергетического механохимического синтеза с последующим компактированием методом искрового плазменного спекания. Изготовленные слоистые МКМ имеют низкую пористость и высокие прочностные характеристики.

Для изготовленных образцов материалов проведено определение физико-механических характеристик. Установлено, что у слоистого металлического композиционного материала, армированного танталовой фольгой, плотность составляет 9,7 г/см<sup>3</sup>, прочность на изгиб при температуре 20 °С имеет среднее значение 1000 МПа, ударная вязкость соответствует среднему значению 27 кДж·м<sup>-2</sup>, у армированного молибденовой фольгой МКМ плотность составляет 8,9 г/см<sup>3</sup>, прочность на изгиб при температуре 20 °С имеет среднее значение 720 МПа, ударная вязкость соответствует среднему значению 15,4 кДж·м<sup>-2</sup>, у армированного вольфрамовой фольгой МКМ плотность составляет 11,4 г/см<sup>3</sup>, прочность на изгиб при температуре 20 °С имеет среднее значение 839 МПа, ударная вязкость соответствует среднему значению 11,2 кДж·м<sup>-2</sup>.

Исследование микроструктуры образцов слоистых МКМ показало, что формирование слоистой структуры происходит с четкой границей раздела, без расслаивания, что свидетельствует о высокой термостабильности композиционного материала. Проведение физико-механических испытаний слоистых МКМ позволило сделать выводы о полноте консолидации композиционных металлических материалов методом искрового плазменного спекания.

По приведенным результатам, можно судить о том, что разработанные материалы могут составить конкуренцию используемым современным жаропрочным сплавам в узлах и деталях перспективных летательных аппаратов авиационно-

го и космического назначения, а также при использовании слоистых материалов в ядерной энергетике.

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12.3: Металлические композиционные материалы (МКМ) на основе Nb, Mo и их интерметаллидов ("Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года").*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кашин Д. С., Дергачева П. Е., Стехов П. А. Жаростойкие покрытия, наносимые шликерным методом (обзор) // Тр. ВИАМ. 2018. № 5(65). С. 08. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-64-75.
2. Трофименко Н. Н., Ефимочкин И. Ю., Большакова А. Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2(51). С. 3—8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
3. Гращенков Д. В., Ефимочкин И. Ю., Большакова А. Н. Высокотемпературные металломатричные композиционные материалы, армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 318—328. DOI: 10.18577/2071-9240-2017-0-5-318-328.
4. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ по реализации "Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года" // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1(34). С. 3—33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7—17.
6. Каблов Е. Н., Светлов И. Л., Ефимочкин И. Ю. Высокотемпературные Nb-Si-композиаты // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 164—173.
7. Каблов Е. Н., Толорай В. Н. ВИАМ — основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 105—117.
8. Бондаренко Ю. А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1. С. 88—94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.
9. Каблов Е. Н., Щетанов Б. В., Ивахненко Ю. А., Балинова Ю. А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // Тр. ВИАМ. 2013. № 2. С. 05. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2016).
10. Каблов Е. Н., Мубояджян С. А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 60—70.

11. Оспенникова О. Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 19—36.
12. Каблов Е. Н., Светлов И. Л., Петрушин Н. В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой. Ч. II. // Материаловедение. 1997. № 5. С. 14—16.
13. Каблов Е. Н., Ломберг Б. С., Оспенникова О. Г. Создание современных жаропрочных материалов и техноло-

гий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. № 3, 4. С. 34—38.

14. Гращенков Д. В., Щетанов Б. В., Ефимочкин И. Ю. Развитие порошковой металлургии жаропрочных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. № 5. С. 13—26.

15. Большакова А. Н., Ефимочкин И. Ю., Мурашева В. В. Механически легированные дисперсно-упрочненные композиционные материалы // Конструкции из композиционных материалов. 2015. № 1(137). С. 36—40.

## **Investigation of the structure and mechanical properties of a layered composite material consisting of alternating layers of a matrix composite material based on molybdenum and a reinforcing layer based on a refractory metal**

A. N. BOLSHAKOVA, I. Yu. EFIMOCKIN, A. P. BOBROVSKY

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials of National Research Center "Kurchatov Institute",  
SRC RF, Moscow, Russia

*In this work, the microstructure and mechanical properties of multilayer composite materials consisting of alternating layers of a cermet composite powder based on molybdenum and layers of metal foils of molybdenum, tungsten and tantalum were studied. The study was aimed at determining the strength characteristics of a layered composite material with a reinforcing layer based on a refractory metal and studying the material's fracture pattern after strength studies. As a result of studying the strength characteristics, it was found that a layered composite material: reinforced with tantalum layers has a bending strength of 1000 MPa and a density of 9.7 g/cm<sup>3</sup>, material reinforced with molybdenum layers has a bending strength of 760 MPa and a density of 8.9 g/cm<sup>3</sup>, material with tungsten layers has a bending strength of 839 MPa and density 11.4 g/cm<sup>3</sup>. Investigation of the microstructure of the laminated material after the bending test and after thermal treatment at 1600 °C showed that material delamination does not occur either after bending tests or after heat treatment, which indicates on the formation of strong metal bonds during compaction of the layered structure.*

**Keywords:** mechanical alloying, powder metallurgy, layered composite materials.



## Акустико-эмиссионный контроль авиационного лонжерона из углепластика

Л. Н. СТЕПАНОВА, д-р техн. наук; Е. С. ПЕТРОВА

Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина, г. Новосибирск, Россия

В. В. ЧЕРНОВА, канд. техн. наук

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Россия

*Приведены результаты статических испытаний авиационного лонжерона из углепластика методом акустической эмиссии (АЭ). Показаны возможности метода АЭ при решении задачи локализации дефектов в композиционном авиационном лонжероне в режиме реального времени. Рассмотрены методические вопросы обработки АЭ-информации, регистрируемой в процессе испытаний. Приведен анализ изменения основных информативных параметров сигналов АЭ и их связи с разрушением структуры углепластика. Начало процесса разрушения материала конструкции лонжерона при АЭ-контроле определялось раньше, т. е. при нагрузках, на 10–15 % меньших по сравнению с нагрузками, при которых разрушение регистрировалось тензометрией.*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, пьезодатчик, тензометрия, тензодатчик, статические испытания, лонжерон, авиационные конструкции, углепластик.

Углепластики, используемые при производстве изделий авиационно-космической техники, обладают повышенными прочностными свойствами, надежностью при эксплуатации, низкой плотностью, широкими возможностями при практическом использовании [1–7].

Высокая удельная прочность на единицу массы, возможности изменять структуру и форму при относительной простоте комбинирования монослоев при их изготовлении сделали композиты перспективными материалами. Многие из них по своим техническим характеристикам (усталостной прочности, термостойкости, виброустойчивости, шумопоглощению, ударной вязкости) превосходят традиционные металлы и сплавы.

Механические и прочностные свойства композиционных материалов (КМ), а также процесс их

разрушения существенно отличаются от металлов и сплавов. В композиционных авиационных конструкциях случайные удары в эксплуатации являются одними из основных источников повреждений и представляют собой наибольшую угрозу возникновения дефектов из-за снижения их прочности. Неповрежденная конструкция из КМ устойчива к воздействию переменных нагрузок, но чувствительна к разного рода ударным воздействиям. Спектр таких случайных ударных воздействий в эксплуатации разнообразен как по источникам, так и по интенсивности ударов. При этом большую опасность представляют относительно небольшие по мощности удары, не оставляющие видимых следов на поверхности конструкции, но приводящие к возникновению внутренних дефектов [1–5].

Одиночное или множественное расслоение — наиболее частый вид повреждения КМ, который может появиться из-за остаточных напряжений в процессе производства или из-за низкочастотных ударов при эксплуатации [8].

Дефекты полимерных КМ различаются по стадии образования (при изготовлении, хранении, транспортировке, эксплуатации), по глубине расположения (поверхностные или внутренние), по раскрытию и размерам (макро- и микродефекты). Они могут быть вызваны нарушением технологии изготовления (низкой степенью отверждения полимерной матрицы, расслоением, наличием трещин), или возникнуть в процессе эксплуатации

---

**Степанова Людмила Николаевна**, профессор, начальник сектора по разработке и производству акустико-эмиссионной и тензометрической аппаратуры отделения "Прочность авиационных конструкций".

E-mail: aergruop@ngs.ru; stepanova@stu.ru

**Петрова Елена Сергеевна**, ведущий инженер сектора экспериментальных исследований прочности натуральных авиаконструкций.

E-mail: aergruop@ngs.ru

**Чернова Валентина Викторовна**, доцент кафедры "Электротехника, диагностика и сертификация".

E-mail: aergruop@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2021 г.

© Степанова Л. Н., Петрова Е. С., Чернова В. В., 2022

(появление несплошностей или разрывов волокон в материале конструкции).

Как показано в ряде зарубежных [5—10] и отечественных [1—4, 11—16] публикаций, без использования акустико-эмиссионного (АЭ) метода контроля практически невозможно создавать и надежно эксплуатировать ответственные конструкции авиационно-космической техники, использующие композиты.

Применение метода АЭ для диагностики конструкций реализовало принципиально новый подход, позволяющий определять координаты дефектов в процессе нагружения объекта контроля (ОК), выполнять оценку степени их опасности, паспортизацию диагностического портрета каждого объекта и сравнение с его ранее определенным состоянием. Метод АЭ без сканирования определяет развивающиеся дефекты, что позволяет их классифицировать по степени опасности.

Одним из основных факторов, ограничивающих применение метода АЭ, является наличие разного рода помех, которые приводят к появлению ложных сигналов, не связанных с изменением структуры материала конструкции. Наибольшие трудности при решении задач локации дефектов представляют акустические шумы, возникающие в захватах, опорах и силовых элементах испытательных машин. Другим недостатком метода АЭ является необходимость нагружения конструкции для ее диагностики. При этом нагрузка ОК может быть как механической, так и тепловой. Методы нагружения играют важную роль при практическом использовании АЭ, так как создаются нагрузки, соответствующие реальным условиям эксплуатации исследуемого объекта, от чего зависит достоверность результатов контроля.

В ряде зарубежных стран внедряют технологии мониторинга состояния композиционных конструкций (Structure Health Monitoring SHM), которые классифицируют как локальные методы (контроль осуществляется в области датчика) или глобальные методы (повреждение обнаруживается сетью датчиков в любом месте конструкции). Модальный анализ позволяет полностью покрыть всю конструкцию, но для ее полного контроля требуется большое количество датчиков [5—7].

Повышение качества основных технических характеристик современных КМ позволило расширить области их использования, в результате чего увеличилась потребность в определении механизмов и особенностей их разрушения. Нагружение конструкции из углепластика с дефектами может привести к ее внезапному разрушению,

что вызывает необходимость развития и совершенствования методов неразрушающего контроля (НК).

Выполнять контроль дефектов в крупногабаритных конструкциях из углепластика сложно из-за затухания сигналов АЭ и низкой помехозащищенности метода, что приводит к большим погрешностям при локации дефектов. Во время АЭ-события могут генерироваться быстрые и медленные моды [4]. При распространении многомодовых сигналов происходит их искажение, что осложняет решение задачи локации дефектов при различных условиях разрушения композиционной конструкции.

Цель работы — разработка методики контроля авиационных лонжеронов из углепластика с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии.

### Методика исследований авиационного лонжерона

Исследование композиционных элементов авиационных конструкций (образцы, лонжероны, кессоны крыла, фюзеляжи и т. д.) производили в соответствии с методиками испытаний, в которые входят АЭ-контроль и определение напряженно-деформированного состояния элементов, выполняемое с использованием тензометрии [2, 6]. Для регистрации АЭ-информации в процессе разрушения конструкции и определения координат дефектов устанавливали пьезоантенну, состоящую из четырех преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) типа ПК-01-07 с полосой пропускания 100—700 кГц. Количество датчиков в пьезоантенне выбирали в зависимости от размеров и сложности конструкции. Кроме того, тензодатчики были наклеены в различных зонах лонжерона.

Для испытаний композиционных авиационных конструкций разрабатывали нагружающие стенды, которые учитывали особенности эксплуатации ОК. В соответствии с программой испытаний лонжерона из углепластика АСМ102–130UD (рис. 1) нагружение осуществляли в три этапа. На первом этапе выполняли статическое ступенчатое увеличение нагрузки до 50 % от расчетного значения  $P_{\text{рас}}$  ( $\Delta P = 5\%$ ). На втором этапе использовали циклическое нагружение с асимметричным циклом в диапазоне нагрузок от 20 до 45 % от  $P_{\text{рас}}$ . После наработки  $N = 100\,000$  циклов был проведен визуальный осмотр лонжерона. Роста производственных дефектов типа несплошностей, обнаруженных при входном контроле, и присутствия усталостных дефектов не было зарегистрировано.



Рис. 1. Внешний вид авиационного лонжерона из углепластика перед испытаниями

На третьем этапе выполняли статическое нагружение до разрушения лонжерона, которое произошло при нагрузке 76,9 % от расчетной (25,45 кН). Анализ результатов нагружения других лонжеронов, выполненных из углепластика Т800, показал, что испытания методом трехточечного изгиба заданными нагрузками сопряжены с риском разрушения стенки лонжерона под нагрузочной площадкой. Для исключения разрушения исследуемого лонжерона в процессе нагружения использовали консольный изгиб.

На рис. 1 показан внешний вид авиационного лонжерона из углепластика АСМ102-130UD, который был помещен в металлический короб размером 2000×200×300 мм на глубину 250 мм и залит эпоксидной смолой. В концевом сечении был установлен кронштейн для передачи нагрузки, состоящий из двух пластин размером 230×350×10 мм с отверстием диаметром  $d = 20$  мм в верхней части для крепления силовой цепи.

В процессе статического нагружения регистрацию и обработку АЭ-информации выполняли микропроцессорной многоканальной АЭ-системой СЦАД-16.10 с "плавающими" порогами селекции (свидетельство Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии RU.C.27. 007А № 40707, регистрационный номер в Государственном реестре средств измерений 45154–10).

Для измерения деформации лонжерона использовали проволоочные тензодатчики типа ПКС-5 с сопротивлением  $R = 120$  Ом, базой  $L = 5$  мм, коэффициентом тензочувствительности  $K = 2,12$  (сертификат типа RU.C.28.007.А № 030935, зарегистрированный в Государственном реестре средств измерения). Запись и обработка информации с тензодатчиков выполнялась микропроцессорной многоканальной тензометрической системой ММТС-64.01 класса точности 0,2 (сертификат типа RU.C.34.007.А № 44412, зарегистрированный в Государственном реестре средств измерения).

Разработанные методики локации сигналов АЭ позволили в режиме реального времени опреде-

лять координаты дефектов на ранней стадии их развития [13]. При исследованиях композиционных конструкций помимо местоположения дефекта необходимо также оценивать тип его разрушения (разрыв волокон, растрескивание матрицы, расслоение) и степень опасности. В зависимости от этого определяется возможность дальнейшей эксплуатации конструкции.

Внутренние повреждения материала углепластика влияют на энергетические и частотные характеристики сигналов АЭ. Поэтому был использован структурный коэффициент, отражающий изменения информативных параметров сигнала АЭ при развитии дефектов, который рассчитывали на основе вейвлет-преобразований как [3, 14]

$$P_{Dij}(f) = \frac{\max D_i}{\max D_j}, \quad (1)$$

где  $D_i$ ,  $D_j$  — наборы коэффициентов вейвлет-разложения  $i$ -го и  $j$ -го уровней детализации, полученные при частоте дискретизации исходного сигнала, равной  $f = 2$  МГц.

Структурный коэффициент определяется как отношение коэффициентов вейвлет-разложения  $i$ -го и  $j$ -го уровней детализации и характеризует смещение положения частотно-временного максимума энергии сигналов АЭ, являющееся признаком изменения типа разрушения углепластика [12, 14].

Расчет координат дефектов выполняли по разности времен прихода сигналов АЭ на датчики пьезоантенны [13, 16]. Локация сигналов АЭ зависит от выбранного метода определения времени прихода (порогового, двухинтервального и метода "скользящего окна").

При пороговом методе время прихода рассчитывается по моменту превышения сигналом АЭ некоторого порогового уровня (рис. 2, а), который определяется уровнем шума в его предыстории. При использовании такого алгоритма на точность определения времени прихода сигналов АЭ ока-

зывают влияние уровень порога селекции и паразитные сигналы.

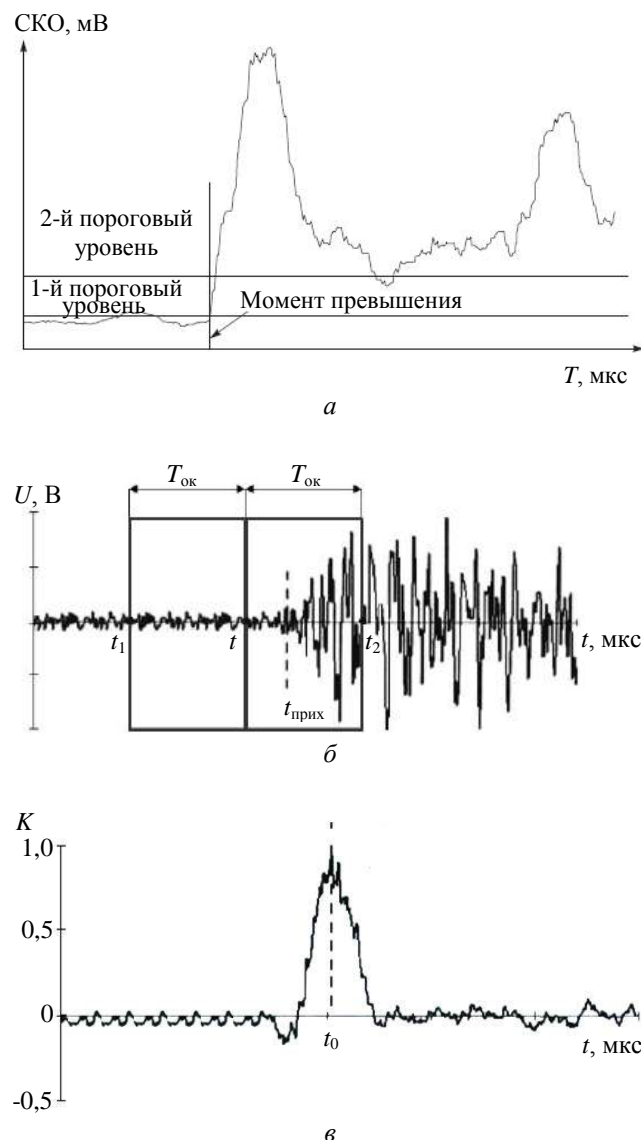


Рис. 2. Определение времени прихода сигнала АЭ по методу "скользящего окна" (а); положение "окна" на осциллограмме сигнала АЭ (б); зависимость двухинтервального коэффициента  $K$  от времени (в)

Первый пороговый уровень зависит от уровня шума предыстории, а второй — является порогом, определяющим минимальный уровень энергии сигнала АЭ, превышающего уровень шумов. После пересечения второго порогового уровня определяется время ближайшего пересечения первого порогового уровня, которое и является временем прихода сигнала АЭ.

При использовании метода "скользящего окна", передвигающегося по реализации сигнала АЭ, рассчитывали некоторый параметр структуры сигнала, являющийся среднеквадратическим отклонением (СКО)  $\sigma_j$  [16]:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=T_1}^{i=T_2} (x_i - x_{\text{сред}})^2}{T_2 - T_1 - 1}},$$

где  $T_1, T_2$  — номера отсчетов, выполняемых аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и соответствующих моментам начала и окончания "временного окна";

$x_{\text{сред}}$  — среднее значение реализации сигнала АЭ в "окне";

$i$  — номер точки в массиве СКО.

При обработке информации "временное окно" продвигается по всей реализации сигнала АЭ и формирует массив значений СКО.

Двухинтервальный метод позволяет определять время прихода сигнала АЭ, совпадающее с моментом изменения его мощности. Параметр структуры  $A(t)$  сигнала АЭ записывается в виде [3, 15, 16]

$$A(t) = \int_t^{t+T_{\text{ок}}} |U(t)| dt,$$

где  $U(t)$  — электрический сигнал АЭ;

$T_{\text{ок}}$  — длительность "окна" для расчета мощности сигнала.

Время прихода сигнала АЭ соответствует максимальному значению двухинтервального коэффициента  $K(t)$  (рис. 2, в), который определяется как [3, 13—16]

$$K(t) = \frac{A(t + T_{\text{ок}}) - A(t - T_{\text{ок}})}{A(t - T_{\text{ок}})}.$$

Преимущество использования двухинтервального метода состоит в том, что суммирование параметров структуры сигналов АЭ во временном "окне" исключает случайные выбросы. Это позволяет более точно определять время  $t_0$  прихода сигнала АЭ на соответствующий датчик ПАЭ, а следовательно, уменьшить разброс координат дефектов и определять их автоматически.

Для сравнения методов определения времени прихода сигналов АЭ на датчики пьезоантенны проанализирована информация, зарегистрированная на третьем этапе нагружения, при котором лонжерон был доведен до разрушения. При этом были рассмотрены три интервала нагрузок третьего этапа:

- до начала активной регистрации сигналов АЭ, когда нагрузка изменялась в пределах от 15 до 55 % от расчетной;

- активной регистрации и локации сигналов АЭ без разрушения лонжерона при нагрузке, изменяющейся от 55 до 70 %;
- разрушения лонжерона при нагрузке, изменяющейся от 70 до 76 % от расчетной.

Анализ проводили с параметрами сигналов, зарегистрированных датчиком ПАЭ0 (таблица). Он показал, что при использовании всех трех методов определения времени прихода сигнала АЭ наблюдалось похожее изменение основных информативных параметров сигналов АЭ. Амплитуда локализованных сигналов АЭ возрастала на втором интервале нагружения, что характеризовало активные процессы разрушения. При этом наиболее значительное увеличение амплитуды (более чем в два раза) отмечалось при использовании метода "скользящего окна".

Для оценки точности локации при использовании различных методов определения времен прихода сигнала АЭ проанализированы координаты одного из источников. При этом выполнена кластеризация зарегистрированных сигналов АЭ по их оцифрованной форме [15]. Для анализа необходимо было выбрать кластер, сигналы которого расположены в области разрушения лонжерона. Кроме того, необходимо было локализовать выбранный источник всеми тремя методами. Был выбран кластер 8, координаты сигналов которого были расположены в области установки датчика ПАЭ0.

В программе системы СЦАД-16.10 для сигналов АЭ в кластере 8 автоматически рассчитывалось значение СКО для координат  $x$  и  $y$ . Наиболее оптимальные значения были получены при использовании метода "скользящего окна". Из 74 сигналов кластера 8 были локализованы 26. Разброс

их координат по оси  $x$  составил 194 мм, а по  $y$  — 183 мм. При использовании двухинтервального метода СКО координат  $x$  было меньше и составило 154 мм. При этом СКО координат  $y$  оказалось на 85 мм больше (268 мм), а число локализованных сигналов уменьшилось более чем в два раза. При пороговом методе увеличилось СКО координат  $x$ ,  $y$  и уменьшалось в два раза число локализованных сигналов по сравнению с методом "скользящего окна". Таким образом, анализ данных показал, что для обработки АЭ-информации, зарегистрированной при испытаниях лонжерона, необходимо использовать метод "скользящего окна", так как он дает большее число локализованных сигналов и меньший разброс по координатам  $x$ ,  $y$  области локации.

Частота сигналов АЭ для всех трех рассмотренных интервалов нагружения лонжерона изменялась незначительно. Такие изменения отмечались при каждом методе определения времени прихода сигнала АЭ.

Расчет структурных коэффициентов показал, что наиболее информативным является коэффициент  $P_{D42}$ . В соответствии с формулой (1) определялось отношение максимума коэффициента вейвлет-разложения  $D_4$ , соответствующего полосе частот спектра сигнала 63—125 кГц, к коэффициенту  $D_2$ , соответствующему полосе частот 250—500 кГц. Отмечалось, что при нагрузке более 55 % от расчетной происходило уменьшение структурного коэффициента, что характеризовало смещение энергии сигнала АЭ в область высоких частот. В соответствии с работой [12] такое изменение структурного коэффициента свидетельствует о разрушении матрицы.

Параметры сигналов АЭ, локализованных при разных методах определения времени прихода сигнала АЭ

Параметр локализованных сигналов АЭ		Метод определения времени прихода сигнала АЭ		
		Пороговый	Двухинтервальный	"Скользящего окна"
Количество сигналов		283	99	674
Нагрузка, при которой началась локация, % от расчетной		15	50	15
Амплитуда, мВ	15—55 %	576,3	500,1	569,05
	55—70 %	860,1	789,8	1250,5
	70—76 %	710	661,35	1077
Частота, кГц	15—55 %	37	39	37
	55—70 %	38	41,5	36
	70—76 %	36	39	35
Структурный коэффициент, $P_{D42}$	15—55 %	7,72	5,89	5,38
	55—70 %	2,53	1,09	3,13
	70—76 %	2,10	1,48	3,12
Количество локализованных сигналов в кластере 8		13	11	26
СКО координаты $x$ , мм		207	154	194
СКО координаты $y$ , мм		252	268	183



В процессе увеличения нагрузки деформация материала изменялась линейно. Максимальная деформация сжатия зарегистрирована в прикорневой части лонжерона на верхней полке и в верхней части стенки (см. рис. 1). В данной зоне лонжерона были установлены тензодатчики, регистрирующие механические напряжения сжатия, равные 240,5 и 232,3 МПа. Наибольшие относительные деформации растяжения наблюдались в области наклейки тензодатчиков в среднем сечении лонжерона на нижней полке. В этой зоне механические напряжения растяжения были равны 148,5 и 145,3 МПа.

Во избежание разрушения лонжерона, вызванного потерей устойчивости, на его верхние сжатые полки в прикорневой зоне были установлены накладные пластины размером 500 мм, согнутые из мягкой стальной пластины толщиной 1 мм (рис. 3).

Нагружение лонжерона производили полками по 5 % от расчетной нагрузки. При нагрузке 55 % показания тензодатчиков были линейными. При нагрузке 76,9 % от расчетной (26,45 МПа) произошло его разрушение с отрывом верхней сжатой полки в прикорневой части и разрушение стенки (см. рис. 3).

Разрушение верхней полки лонжерона



Рис. 3. Разрушение верхней полки лонжерона под усиливающими накладками

При АЭ-контроле этапов статического нагружения активные источники локаций на первом этапе нагружения были расположены в области заделки лонжерона (рис. 4, а). На рис. 4, а—в приведены суммарные значения амплитуд сигналов АЭ, регистрируемых в зонах разрушения лонжерона датчиками ПАЭ 0, ПАЭ 3.

Перед началом основного нагружения лонжерона до разрушения прикладывали нагрузки (через интервал  $\Delta P = 5\%$ ) до максимального значения, составляющего 55 % от расчетного (рис. 4, в). Анализ показаний тензодатчиков определил начало его нелинейного поведения, начиная с нагрузки 50 %. Увеличение нагрузки до 60 % приводило к росту активности сигналов АЭ от 0,5 до 1,1 сигн./с. Их более высокая активность (1,5 сигн./с) наблюдалась только при разрушении лонжерона. Таким

образом, при нагрузках более 55 % от расчетных началось разрушение лонжерона. Применение метода АЭ на данном этапе позволило более точно отследить этот процесс, так как нелинейное изменение относительных деформаций было отмечено при нагрузке более 65 %.

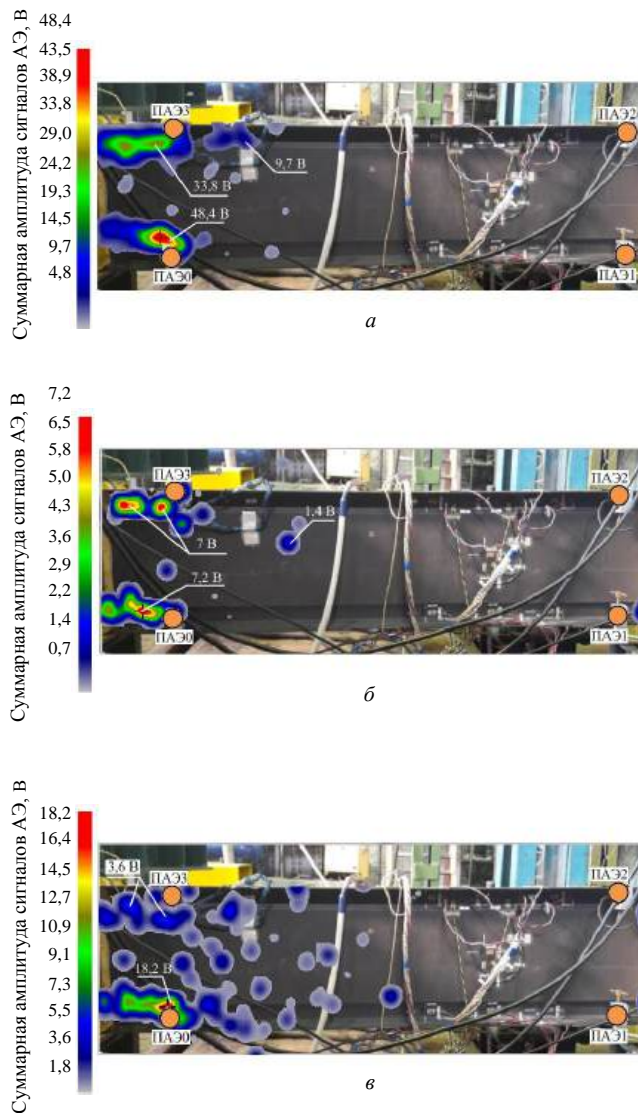


Рис. 4. Локация сигналов АЭ при статических нагружениях лонжерона:

- а — на первом этапе до нагрузки 50 %;  
б — на третьем этапе статического нагружения после циклических испытаний до нагрузки 55 % ; в — на третьем этапе в процессе разрушения

## Заключение

Использование микропроцессорной многоканальной АЭ-системы СЦАД-16.10 с "плавающими" порогами селекции позволило отследить процесс зарождения дефектов в лонжероне из углепластика АСМ102–130UD в режиме реального времени на всех трех этапах нагружения. При анализе информативных параметров локализуемых



сигналов АЭ дополнительно оценивался тип разрушения углепластика в режиме постобработки.

Сравнение разработанных методов обработки АЭ-информации (порогового, двухинтервального и метода "скользящего окна") позволило выбрать наиболее точный из них. При оптимизации процесса локации сигналов АЭ при нагружении лонжерона из углепластика было сокращено время обработки информации и повышена точность определения координат зарождающихся дефектов.

Сопоставление результатов АЭ-контроля и тензометрии на предварительном этапе нагружения показало существенный рост числа зарегистрированных сигналов АЭ задолго до начала нелинейного изменения показаний тензодатчиков при нагрузках, равных 40 и 55 % от расчетных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фейгенбаум Ю. М., Миколайчук Ю. А., Метелкин Е. С., Батов Г. П. Место и роль неразрушающего контроля в системе поддержания летной годности композитных конструкций // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 9. С. 71—82.
2. Степанова Л. Н., Петрова Е. С., Чернова В. В. Прочностные испытания лонжерона из углепластика с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 24—30.
3. Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Чернова В. В., Егорова Е. В. Использование вейвлет-преобразований для обработки акустико-эмиссионной информации при статических испытаниях образцов из углепластика // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 4. С. 36—42.
4. Степанова Л. Н., Чернова В. В., Кабанов С. И. Анализ модового состава сигналов акустической эмиссии при одновременном тепловом и статическом нагружении образцов из углепластика Т800 // Контроль. Диагностика. 2018. № 11. С. 4—13.
5. Alfredo Güeme, Antonio Fernandez-Lopez, Angel Renato Pozo et al. Structural Health Monitoring for Advanced

Composite Structures: A Review // J. Compos. Sci. 2020. V. 1. P. 13. DOI:10.3390/jcs4010013.

6. Staszewski W. J., Mahzan S., Traynor R. Health monitoring of aerospace composite structures — Active and passive approach // Composites Science and Technology. 2009. V. 69. P. 1678—1685.

7. Sikdar S., Mirgl P., Bantrjee S., Ostachowicz W. Damage-induced acoustic emission source monitoring in a honeycomb sandwich composite structure // Composites Part B. 2019. № 158. P. 179—188.

8. Madaras E. Underscore the NASA role in the development of the non-destructive testing of the composite // NASA Langley research center, scientific department of non-destructive testing of structures and materials. Gempston. VA23681.

9. Kalafat S., Sause M. G. R. Acoustic emission source localization by artificial neural networks // Structural Health Monitoring. 2015. P. 633—647.

10. Sause M. G. R. On use of signal features for acoustic emission source identification in fibereinforced composites // J. Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 125—136.

11. Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Чернова В. В. Полосовой фильтр с управляемой полосой пропускания. Патент 2 758 448 РФ. Заявка № 2021105353. Оpubл. 28.10.2021. Бюл. 2021. № 31.

12. Степанова Л. Н., Батаев В. А., Лапердина Н. А., Чернова В. В. Акустико-эмиссионный способ определения типа дефекта структуры образца из углепластика. Патент 2 676 209. РФ. Заявка № 2017145888. Оpubл. 26.12.2018. Бюл. 2018. № 10.

13. Степанова Л. Н., Чернова В. В., Рамазанов И. С. Метод локации сигналов акустической эмиссии при статическом испытании образцов из углепластика // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 53—40.

14. Степанова Л. Н., Чернова В. В. Анализ структурных коэффициентов сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении образцов из углепластика с ударными повреждениями // Контроль. Диагностика. 2017. № 6. С. 34—41.

15. Степанова Л. Н., Чернова В. В., Рамазанов И. С. Использование методов кластеризации для обработки акустико-эмиссионной информации // Контроль. Диагностика. 2019. № 8. С. 12—21.

16. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кабанов С. И. и др. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций. — М.: Машиностроение/ Машиностроение-Полет, 2008. — 440 с.

## Acoustic emission control of aircraft carbon plastic spar

L. N. STEPANOVA, E. S. PETROVA

Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin, Novosibirsk, Russia

V. V. CHERNOVA

Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

*The results of acoustic emission (AE) control of an aircraft spar made of carbon fiber are presented. The capabilities of the AE method were shown in solving the problem of locating defects in composite aircraft structures in real time. Methodological issues of processing AE-information recorded during testing are considered. The analysis of changes in the main informative parameters of the AE signals and their relationship with the destruction of the structure of carbon fiber is given. It is shown that with AE control, the onset of the fracture process of the spar structure material is determined earlier, at loads lower by 10—15 % compared to the loads at which the fracture is recorded using strain measurement.*

**Keywords:** acoustic emission, piezosensor, strain measurement, strain sensor, strength tests, spar, aircraft structures, carbon fiber reinforced plastic.

УДК 620.179.18:624.04

DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_1\_57

## **Внешнее армирование композитными материалами и оптический мониторинг надежности эксплуатации строительных сооружений** (Обзор)

М. Ю. ФЕДОТОВ, канд. техн. наук  
Российская инженерная академия, Москва, Россия

О. Н. БУДАДИН, д-р техн. наук; С. О. КОЗЕЛЬСКАЯ, канд. техн. наук  
АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения»,  
г. Хотьково, Московская обл., Россия

И. Г. ОВЧИННИКОВ, д-р техн. наук  
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

И. С. ШЕЛЕМБА, канд. техн. наук  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия  
ООО «Инверсия-Сенсор», г. Пермь, Россия

*Описан отечественный опыт и представлены результаты экспериментальных исследований и внедрения на реальных строительных конструкциях полимерных композитов на основе углеродных армирующих волокон и полимерных матриц, позволяющих осуществлять усиление в целях восстановления несущей способности и продления ресурса. Рассмотрены особенности технологических процессов внешнего армирования поврежденных железобетонных и металлических конструкций. Показано, что ключевым аспектом обеспечения безопасности эксплуатации сложных технических систем и своевременного обнаружения возникновения и накопления дефектов, а также оценки фактического технического состояния в режиме реального времени является применение методов и средств оптического неразрушающего контроля, что подтверждается полученными результатами. Установлено, что совместное применение полимерных композитов и волоконно-оптических средств неразрушающего контроля позволяет не только восстановить или повысить несущую способность усиливаемой конструкции, но и обеспечить контроль качества выполненных работ и дальнейшей эксплуатации в течение всего жизненного цикла.*

**Ключевые слова:** полимерный композит, строительная конструкция, железобетонная конструкция, металлическая конструкция, усиление, оптический неразрушающий контроль.

Возведению любых строительных сооружений предшествует целый ряд мероприятий, связанных с инженерными изысканиями, проектированием, всевозможными расчетами [1, 2], информационным моделированием, выпуском соответствующей проектной документации, проверкой соответствия с теми или иными нормативно-правовыми документами по результатам экспертизы. Результатом

проведения данных работ является выпуск рабочей документации, по которой и осуществляется строительство, после чего вновь возведенный объект вводится в эксплуатацию. Таким образом, любое строительное сооружение проектируют в соответствии с действующей нормативной базой. При этом ресурс таких конструкций в зависимости от их сложности, конструктивного исполнения, реальных условий эксплуатации в среднем может варьироваться от нескольких десятков до сотни лет и более при проведении всевозможных периодических, регламентных и иных работ, связанных с оценкой их фактического состояния. Однако, если обратить внимание, например, на эксплуатируемые мостовые сооружения как советского периода, так и более старых, то они не соответствуют современному уровню эксплуатационных нагрузок и с учетом их фактического износа, возрастающих нагрузок на дорожное полотно и иных факторов зачастую требуется проведение достоверной оценки их фактического технического состояния для проведения тех или иных ремонтных мероприятий, связанных с частичной или полной

---

**Федотов Михаил Юрьевич**, заместитель президента.

E-mail: fedotovmyu@gmail.com

**Будадин Олег Николаевич**, главный научный сотрудник.

E-mail: oleg.budadin@yandex.ru

**Козельская Софья Олеговна**, старший научный сотрудник.

E-mail: kozelskaya.sofik1977@yandex.ru

**Овчинников Игорь Георгиевич**, профессор.

E-mail: bridgesar@mail.ru

**Шелемба Иван Сергеевич**, заместитель директора по связям с промышленностью, первый заместитель генерального директора — главного конструктора.

E-mail: shelemba@iae.nsk.ru

---

Статья поступила в редакцию 8 июня 2021 г.

---

© Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О.,  
Овчинников И. Г., Шелемба И. С., 2022

заменой элементов конструкции, капитальным ремонтом или реконструкцией для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации.

Аналогичная проблема характерна для объектов промышленного и гражданского строительства, опор линий электропередачи, строительных сооружений специального назначения.

Применительно к железнодорожным мостовым конструкциям степень фактического износа составляет величину порядка 80 % [3] (рис. 1).



Рис. 1. Строительные сооружения с ограничениями по эксплуатации [4, 5]

Подобные повреждения существенно снижают грузоподъемность мостов, что может приводить к снижению пропускной способности вследствие корректировки скоростного режима. Это, в свою очередь, влечет за собой дополнительные экономические издержки.

Среди наиболее серьезных повреждений металлических [6] и железобетонных [7] мостов, возникающих в процессе длительной эксплуатации, стоит выделить коррозионные разрушения арматуры, нарушение сцепления бетона с металлической арматурой, появление и развитие трещин при длительных циклических и ударных воздействиях, деградационные процессы в бетоне, обусловленные обводнением и морозным разрушением (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид поврежденных конструкций мостов

Таким образом, стоит отметить, что протекающие в конструкциях мостов, строительных и транспортных сооружениях деградационные процессы приводят к необходимости оценки фактического состояния конструкций в условиях одновременного воздействия нагрузок и агрессивных эксплуатационных сред, а также широкого применения методов усиления в целях повышения груз-

зоподъемности и ресурса. Своевременность проведения данных мероприятий напрямую влияет на безопасность их дальнейшей эксплуатации.

### Объекты и методы исследований

Для усиления мостовых сооружений в целях восстановления несущей способности и/или повышения грузоподъемности широко используют классические методы, включающие увеличение поперечного сечения несущих конструкций за счет дополнительного бетонирования с установкой металлической арматуры, укрепление имеющихся силовых балок внешними металлическими накладками, фермами, всевозможными шпренгельными системами. Применение таких систем сопряжено с целым рядом недостатков, среди которых стоит отметить привязку к сезонности выполняемых работ, необходимость использования тяжеловесной техники, в том числе формирование временных подъездных путей, дополнительную весовую нагрузку на сооружение, частичное или полное ограничение транспортного потока. Это, в свою очередь, приводит к дополнительным издержкам, снижая целесообразность применения таких технологий усиления с экономической точки зрения.

Для оценки текущего технического состояния мостовых сооружений широко используют периодические визуальные осмотры, проводимые обходчиками, а в случае выявления каких-либо внешних повреждений применяют классические методы и средства неразрушающего контроля, позволяющие оценить качественные и количественные характеристики повреждений, возникших в процессе долговременной эксплуатации. Для оценки напряженно-деформированного состояния применяются тензометры, струнные датчики, электрические тензодатчики. К преимуществам указанных технологий стоит отнести сравнительно невысокую стоимость и простоту проведения контроля. Вместе с тем принципиально отсутствует возможность обнаружения критических дефектов на ранней стадии, отслеживания их роста и накопления в процессе эксплуатации конструкции в реальных условиях, предупреждения возникновения аварийных и иных нежелательных ситуаций, связанных с обеспечением безопасности функционирования подобных объектов.

С учетом фактического износа большого количества мостов, а также в целях учета требований надежности и безопасной эксплуатации наиболее перспективным и технологичным является широкое применение оптического метода неразрушающего контроля с использованием волоконно-

оптических датчиков (ВОД) на основе волоконных решеток Брэгга (ВБР) для обеспечения достоверности результатов мониторинга в режиме реального времени и полимерных композитных материалов (ПКМ) на основе углеродных армирующих волокон в качестве эффективной системы усиления (рис. 3).



Рис. 3. Функционал системы усиления и онлайн-контроля мостов

Стоит отметить, что применение ПКМ позволяет осуществлять ремонт строительных сооружений с учетом особенностей конструктивного исполнения. Варьируя схему внешнего армирования, можно обеспечить требуемые значения несущей способности с учетом фактического состояния и условий эксплуатации. Зачастую с учетом фактических повреждений, выявленных по результатам осмотра, требуется полная замена пролетного строения, что далеко не всегда возможно с экономической точки зрения ввиду полного или частичного отсутствия финансирования.

Так, по данным компании АО "Препрег-СКМ" экономия при усилении строительных сооружений композитными материалами по сравнению

с классическими методами может составить от 23 до 65 % (рис. 4) [8].

Проведение мероприятий по усилению требует существенно меньших затрат и одновременно позволяет обеспечить продление сроков эксплуатации конструкций на период до 40 лет, что является немаловажным аспектом при формировании планов реконструкции и капитального ремонта автомобильных и железнодорожных мостов.

Не менее важным аспектом надежной и безопасной эксплуатации является оценка текущего состояния, заключающаяся в возможности иметь достоверные сведения обо всех изменениях напряженно-деформированного состояния конструкции в режиме реального времени.

Композитные системы усиления и волоконно-оптические средства мониторинга мостов можно применять как по отдельности, так и в комплексе. Именно комплексный подход позволяет добиться максимальной эффективности предлагаемых технических решений.

Однако внедрение подобных систем зачастую затруднено из-за несовершенства или полного отсутствия нормативной базы, позволяющей применять их на практике.

Стоит отметить, что необходимость проведения неразрушающего контроля параметров несущих конструкций требуется как при эксплуатации, так и при возведении строительных сооружений различного назначения. ГОСТ Р 22.1.12-2005 требует установки структурированных систем мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений для широкого перечня объектов, частным случаем которых является система мониторинга инженерных (несущих) конструкций, опасных природных процессов и явлений [9].

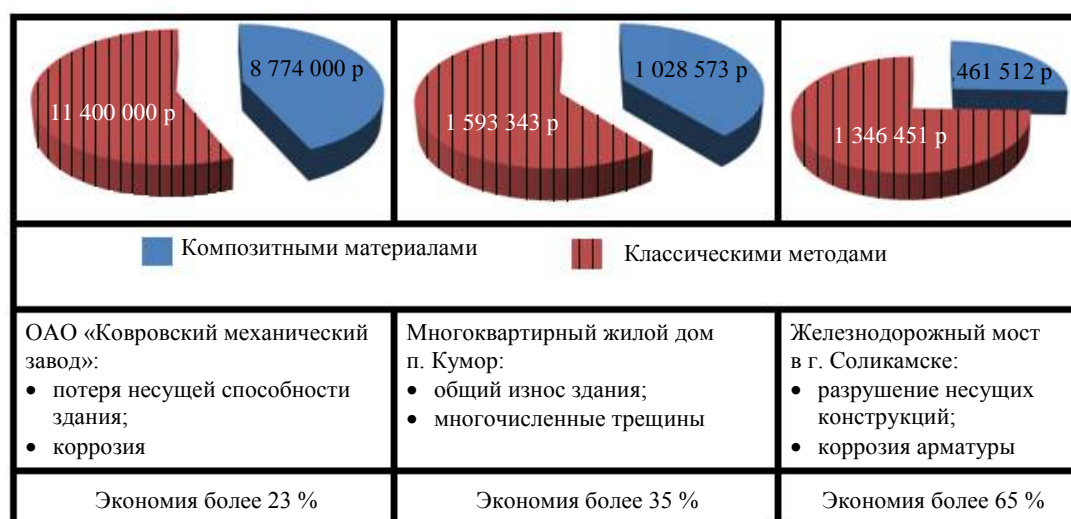


Рис. 4. Экономия при использовании композитов

Среди нормативных документов, регулирующих применение композитных материалов для усиления мостов, находящихся в ведении ОАО "РЖД", стоит выделить Руководство по усилению железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов системой внешнего армирования на основе углеродных волокон, разработанное и введенное в действие в 2013 г. Данный документ разработан под руководством д-ра техн. наук, профессора С. А. Бокарева (ФГБОУ ВО "СГУПС") совместно с компанией ЗАО "Препрег-СКМ". Примечательно, что согласно п. 5.4 Свода правил "Мосты и трубы" (СП 35.13330.2011) [10] применение композитов для усиления несущих конструкций мостов не допускается (в иной трактовке — не регламентируется). Также есть целый ряд нормативных документов на уровне стандартов организаций [11, 12].

Таким образом, дополнительным актуальным направлением развития в исследуемой области является разработка нормативной базы, однозначно регулирующей применение композитных материалов для восстановления и/или повышения грузоподъемности мостов за счет внешнего

армирования поврежденных эксплуатируемых конструкций.

В связи с развитием композитной отрасли, ужесточением требований к качеству материалов, их упруго-прочностным, физическим, реологическим и эксплуатационным свойствам [13] на рынке представлено большое количество композитных материалов, в том числе для создания систем внешнего армирования (СВА) строительных сооружений (таблица).

Проблематика усиления железобетонных конструкций композитными материалами в достаточной степени изучена и проработана такими известными учеными, как И. Г. Овчинников, С. А. Бокарев, А. А. Шилин, Ш. Н. Валиев, Д. Н. Смердов, А. Н. Яшнов и другими. Такие СВА включают в себя армирующие наполнители, чаще всего на основе углеродных волокон, и полимерные связующие холодного отверждения. Далее на заранее подготовленную поверхность осуществляется послойное нанесение пропитанных слоев композитного материала в соответствии со схемой армирования, выбранной по результатам проектирования системы усиления.

**Краткая номенклатура композитных материалов СВА**

Фирма-разработчик/производитель	Торговая марка	Страна
DowAksa Advanced Composites Holdings B.V. совместно с ООО "НЦК" [14]	Углепластиковая ламель CARBONWRAP® LAMEL T-50/110; Углеродная лента CARBONWRAP® TAPE 230/150; Углеродная лента CARBONWRAP® TAPE 230/300; Углеродная лента CARBONWRAP® TAPE 230/600; Эпоксидный клей CARBONWRAP® RESIN LAMINATE+; Эпоксидное связующее CARBONWRAP® RESIN WS+	США/РФ
ЗАО "Триада-Холдинг" [15]	Композиционный материал S&P-C-Sheet 240; Композиционный материал S&P-G-Sheet E 50-50; Композиционный материал S&P-G-Sheet S&P-Laminates CFK 150-2000; Композиционный материал S&P-Epoxy Resin 55-50; Композиционный материал S&P-Resicem; Композиционный материал S&P-Resin 220 Epoxy Adhesive	РФ
АО "Препрег-СКМ" [16]	Однонаправленная углеродная лента FibARM Tape-200/300; Двунаправленная углеродная ткань FibARM Tape-450/1200 twill; Углепластиковая ламель FibARM Lamel; Связующее FibARM Resin 230	РФ
BASF SE [17]	Углеволокно MasterBrace® CF 230/4900. 300g/5.100m; Клей MasterBrace® ADH 4000; Ламель MasterBrace® Lam CF 165/3000.100×1.2	ФРГ
Sika Group [18]	Однонаправленный тканый холст из углеродного волокна SikaWrap®-230 C; Ламели из армированного углеродным волокном полимера Sika® CarboDur® S; Двухкомпонентная тиксотропная эпоксидная пропиточная смола и клей Sikadur®-330	ФРГ
Mapei [19]	Углепластиковая ламель Carboplate E170/50/1,2; Углепластиковая ламель Carboplate E 170/150/1,4	Италия
Mitsubishi Chemical Holdings [20]	Replark	Япония
Toray Industries, Inc. [21]	Torayca UT70-20G; Torayca UT70-60G; Torayca UM46-30G; Torayca UM46-40G; Torayca BT70-30	Япония



Работы по усилению металлических конструкций ведутся как в России [22, 23], так и за рубежом [24, 25]. Для металлических конструкций СВА, наносимые методом контактного формования, практически неприменимы. Это обусловлено тем, что коэффициенты линейного температурного расширения металла и углекомпози́та существенно отличаются и при колебаниях температуры с учетом реальных условий эксплуатации такая система является неустойчивой и не может быть применена. В рассматриваемом случае целесообразно применять готовые композитные шпренгели, например в виде плоских ламелей, закрепляемых на металлические несущие элементы с помощью высокопрочных болтов. Дополнительно стоит учитывать, что при взаимодействии углекомпози́та с металлом возникает электрохимическая коррозия, поэтому внешние слои шпренгеля должны быть выполнены из непроводящего материала, например стеклокомпози́та.

Системы мониторинга строительных и иных сооружений в России начинают постепенно внедрять [26, 27], но пока это в основном единичные проекты, реализованные для уникальных сооружений, требующих оценку фактического состояния в процессе эксплуатации. В большинстве случаев продолжают широко применять визуальный контроль, электрические тензодатчики и иные классические средства диагностики. При этом существует огромное количество эксплуатируемых объектов, требующих установки подобных систем, позволяющих получать достоверную информацию о реальном состоянии и принимать решение о необходимости проведения ремонтных мероприятий при возникновении предаварийных и иных внештатных ситуаций. За рубежом такие системы известны как Structure Health Monitoring [28]. Опубликованы результаты многочисленных исследований [29—31].

# Опыт применения композитных материалов для восстановления грузоподъемности поврежденных железобетонных мостов

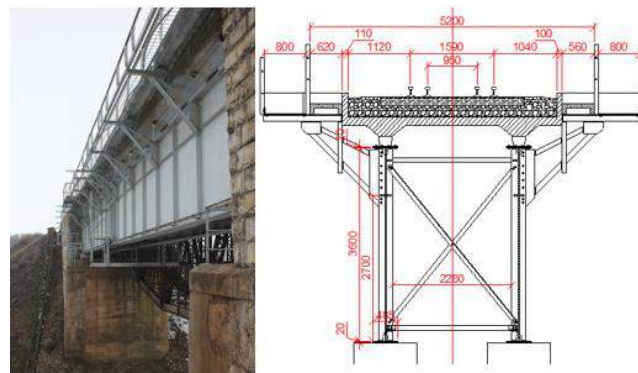
Коллективом авторов под руководством И. Г. Овчинникова (ФГБОУ ВО "Тюменский индустриальный университет", ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.) и С. А. Бокарева (ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет путей сообщения") был проведен комплекс научно-практических исследований, результаты которых позволили применить созданные технологические решения для восстановления грузоподъемности автомобильных и железнодорожных мостов [32]:

- через р. Любовша, на участке пути Орел—Елец Московской ж/д, 2017 г.;

- через р. Лебяжья, а/д М-53 — Тогучин—Карпысак, 2017 г.;
- через р. Колтырак, а/д Новосибирск—Ленинск—Кузнецкий, 2017 г.;
- через р. Издревая, а/д Новосибирск—Ленинск—Кузнецкий, 2017 г.;
- через р. Тарсьма, а/д Новосибирск—Ленинск—Кузнецкий, 2012, 2016 г.;
- через р. Крутьелка, а/д М-53 Мошково—Белоярка, 2016 г.;
- через р. Крутьелка, а/д М-53 Мошково—Белоярка, 2016 г.;
- через р. Курундус, а/д Н-2603 Пойменное—Пятилетка, 2015 г.;
- на участке Новосибирск Гл.—Барнаул Западно-Сибирской ж/д., пр-т Строителей в г. Новосибирск, 2013 г.;
- через р. Карпысак, а/д М-53 Тогучин—Карпысак, 2012 г.;
- через ручей в р.п. Татищево, а/д Тамбов—Ртищево—Саратов, 2011 г.;
- через р. Тишковка, а/д Кукуштан—Чайковский в Осиновском районе Пермского края, 2009 г.

Так, при участии Ассоциации строителей России и компании ООО "Инверсия-Сенсор" проведены работы по оценке фактического состояния (по величине прогиба) сталежелезобетонного моста через р. Любовша на участке главного пути Орел—Елец Московской железной дороги волоконно-оптическими датчиками и усиление композитными материалами в целях восстановления несущей способности, а также мониторинг несущих металлических конструкций после усиления.

На рис. 5 приведен внешний вид и эскиз центрального сечения балок моста. Длина пролета 45 м.



**Рис. 5. Внешний вид и эскиз центрального сечения балок моста**

В результате проведения мониторинга с помощью ВОД, установленных непосредственно на металлические конструкции несущих балок моста, определено, что фактический прогиб составил 71 мм, что является недопустимым с учетом необ-



ходимости обеспечения нагрузки С14. Система мониторинга включала 4-канальный интеррогатор ASTRO A321, ВОД деформации и температуры (для термокомпенсации полученных показаний), а также ноутбук с установленным специальным программным обеспечением для сбора, обработки и визуализации данных.

Также в ходе обследования был выявлен целый ряд повреждений, в т. ч. коррозия металлических элементов, отверстия в нижнем поясе, многочисленные трещины и сколы бетона в опорах.

Для проведения усиления были спроектированы и изготовлены из углекомпозита на основе углеродной ткани 1270(+45/-45)-300, артикул См-42010 и эпоксидного клеевого связующего MC DUR 1209 TX шпренгельные элементы [33] в виде ламелей длиной 8,3 м, которые с помощью болтового соединения были установлены на несущие балки пролетного строения моста (рис. 6).



Рис. 6. Установка композитных шпренгелей на нижний пояс моста

К очевидным достоинствам такой технологии можно отнести отсутствие необходимости ограничения эксплуатации объекта путем полной или частичной остановки движения, привязки к сезонности выполнения работ, а также привлечение тяжелой техники.

После проведения мероприятий по установке СВА с применением готовых композитных ламелей проведена оценка качества выполненных работ с применением волоконно-оптической системы мониторинга. ВОД устанавливали в тех же локальных зонах нижнего пояса пролетного строения, что и до усиления.

Данные мониторинга показаны на рис. 7.

Анализируя полученные данные и коррелируя их с результатами расчетов, стоит отметить, что фактический прогиб после проведения усиления составил 32 мм, что допустимо в рассматриваемом случае. Экономический эффект для этого объекта в части восстановления грузоподъемности с помощью композитных шпренгелей по сравнению с классическими методами усиления составил более 40 %.

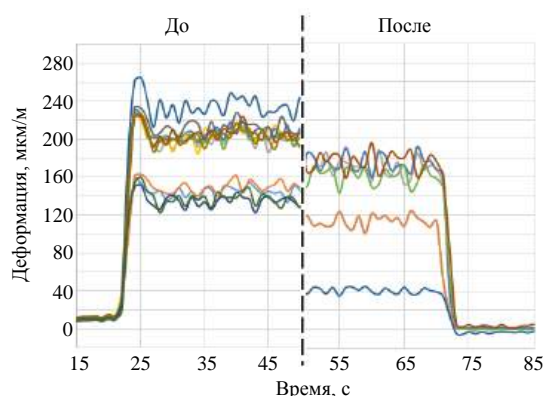


Рис. 7. Определение прогиба пролетного строения моста до и после усиления композитными шпренгелями [34]

Проведен комплекс мероприятий по восстановлению грузоподъемности моста в поселке Татищево Саратовской области. Для оценки фактического состояния моста выполнено обследование, по результатам которого выявлены трещины вдоль металлической арматуры, коррозия оголенной металлической арматуры, повреждения бетонных участков в переходных зонах. В итоге техническое состояние моста оценено в 2 балла. Оценку проводили исходя из требований, указанных в Инструкции по проведению осмотров мостов и труб на автомобильных дорогах (ВСН 4-81).

На основании анализа выявленных повреждений и с учетом их влияния на несущую способность моста предложено обеспечить требуемый уровень усиления, применяя технологию внешнего армирования углекомпозитными материалами, устанавливаемыми в соответствии с выбранной схемой армирования и числом слоев на поврежденные поверхности методом контактного формования. В данном случае в качестве материала для усиления был выбран углекомпозит УОЛ-30/АЭ-1 на основе связующего холодного отверждения. Схема проведения усиления приведена на рис. 8.

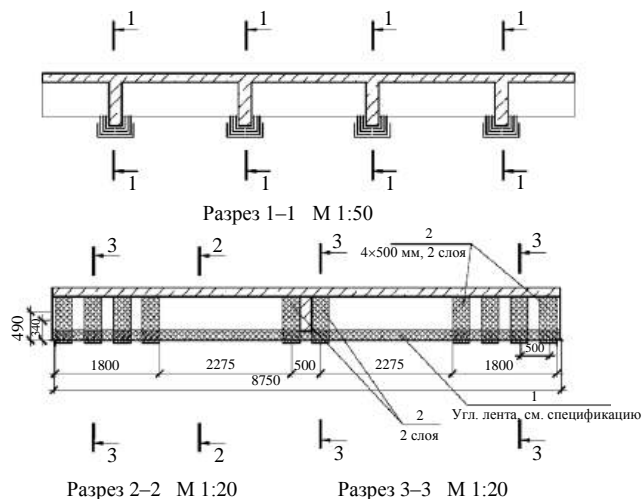


Рис. 8. Схема проведения усиления железобетонного моста углекомпозитом

Из рис. 8 видно, что монтаж углекомпозитного усиления осуществляли вдоль несущих балок. Дополнительно в целях повышения надежности системы внешнего армирования там же располагались поперечные композитные хомуты.

Внешний вид усиленной конструкции показан на рис. 9.



Рис. 9. Железобетонный мост, усиленный углекомпозитом

После окончательного отверждения установленной углекомпозитной системы внешнего армирования были проведены испытания в соответствии с программой и методикой испытаний, по результатам которых было подтверждено восстановление грузоподъемности данного моста [35].

Анализируя фактические результаты экспериментальных исследований и опыт внедрения композитных армирующих систем для восстановления и повышения грузоподъемности автодорожных и железнодорожных мостов, стоит отметить, что данные технологии позволяют продлевать ресурс строительных сооружений, относительно просты и технологичны, а также эффективны с экономической точки зрения.

### Опыт внедрения оптических систем мониторинга строительных сооружений

Одним из наиболее успешных отечественных разработчиков волоконно-оптических систем мониторинга для строительной, транспортной и других отраслей промышленности является компания ООО "Инверсия-Сенсор".

За более чем 10-летнюю историю существования компанией реализован целый ряд проектов, направленных на коммерциализацию и внедрение разработок [36]:

- Манеж "Заря", г. Новосибирск, Россия, 2012 г.;
- Компрессорная станция Добрянская, Пермский край, Россия, 2013 г.;

- Оползневый участок магистрального газопровода Майкоп—Самурская—Сочи, Россия, 2014 г.;

- Магистральный газопровод Чусовой—Березники—Соликамск, Пермский край, Россия, 2014 г.;

- Гидротехнические сооружения Зарамагской ГЭС-1, республика Северная Осетия, Россия, 2014 г.;

- Магистральный газопровод Южный поток, Пермский край, Россия, 2015 г.;

- Надземный переход, г. Пермь, Россия, 2015 г.;

- Жилой дом, д. 43, ул. Беляева, г. Пермь, Россия, 2015 г.;

- Железнодорожный мост через реку Любовша, км 118 ПК 7 + 46 м пути участок Орел—Елец Московской железной дороги, 2016—2017 гг.;

- "Затонский" мост, г. Уфа, Россия, 2017 г.;

- Футбольный манеж "Пермь Великая", г. Пермь, Россия, 2018 г.;

- Восстановительно-окислительная установка, г. Атырау, Казахстан, 2018 г.

Так, разработана и реализована система волоконно-оптического мониторинга металлоконструкций манежа "Заря" [37], позволяющая определять фактическое напряженно-деформированное состояние конструкции, накапливать и анализировать полученные данные, осуществлять сопоставление с пороговыми значениями, заявленными в проекте, способствуя своевременному обнаружению возникающих изменений и информированию ответственных должностных лиц для принятия тех или иных решений. Такой подход обеспечивает безопасную эксплуатацию объекта в реальном времени.

Комплексная система мониторинга включала ВОД перемещений FS6100 с чувствительностью 50 пм/мм в диапазоне измерений до 80 мм при разрешающей способности 45 мкм, реализованные с компенсацией температурных воздействий, ВОД деформации FS6200 с чувствительностью 1,2 пм/мк в диапазоне  $\pm 2\ 500\ \mu\text{м}$  при разрешении 1,0 мк, ВОД температуры FS6300 с чувствительностью 10 пм/°C в рабочем диапазоне от -20 до 80 °C при разрешении 0,1 °C, 8-канальный анализатор сигналов от ВОД FS2200RM с абсолютной погрешностью измерений  $\pm 2\ \text{пм}$  в диапазоне 1 500—1 600 нм, а также встроенное специальное программное обеспечение (СПО). Дополнительно применяли тахеометр LEICA TS15 A R400 с точностью измерений по углу 3 с.

Структурная схема взаимодействия средств мониторинга в составе системы показана на рис. 10.

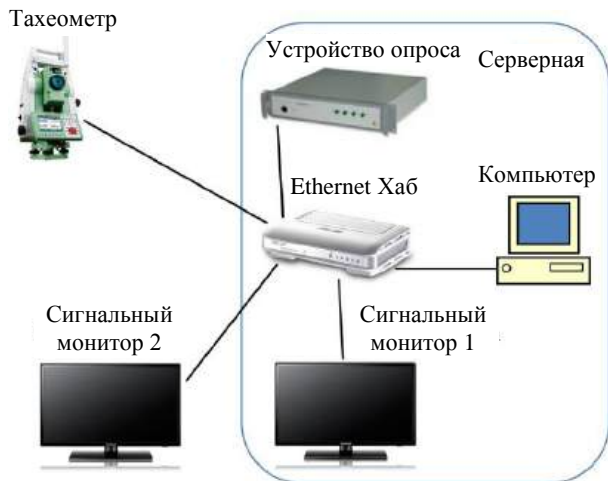


Рис. 10. Структура системы мониторинга манежа "Заря"

Монтаж ВОД на металлоконструкции осуществляли методом точечной сварки (рис. 11).

На рис. 12 приведен скриншот окна СПО, визуализирующий статистику данных от ВОД во времени, а также спектры ВБР.

Мониторинг осуществляется в режиме онлайн и фиксирует с высокой точностью все изменения в

техническом состоянии конструкции с учетом реальных условий эксплуатации.



Рис. 11. Монтаж ВОД на металлические несущие конструкции манежа "Заря"

Для примера приведем изменения деформации затяжек длиной около 100 м, которые представляют собой стальные пластины, соединяющие нижние точки арочных конструкций (рис. 13).

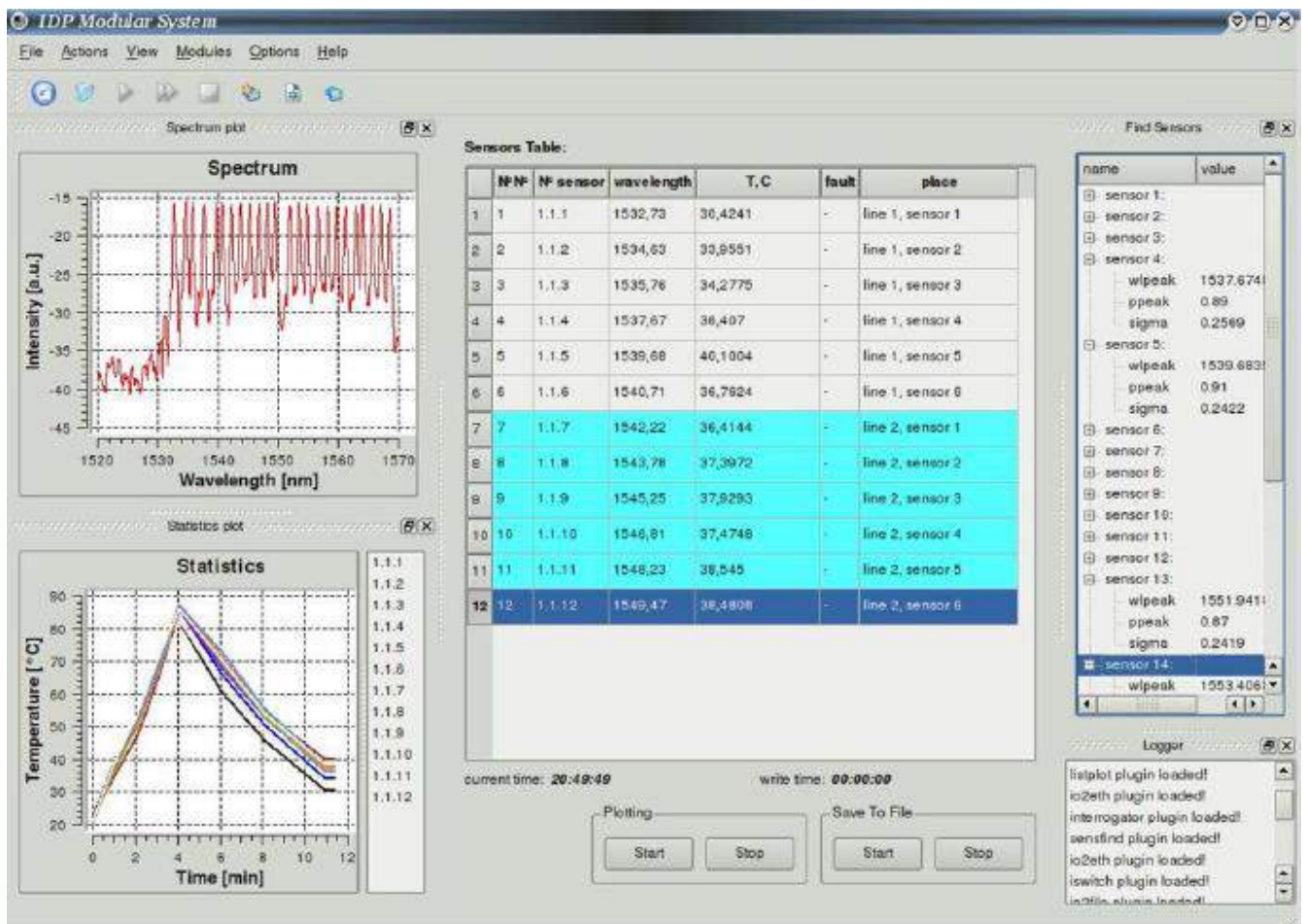


Рис. 12. Скриншот окна СПО, поясняющий работу системы мониторинга



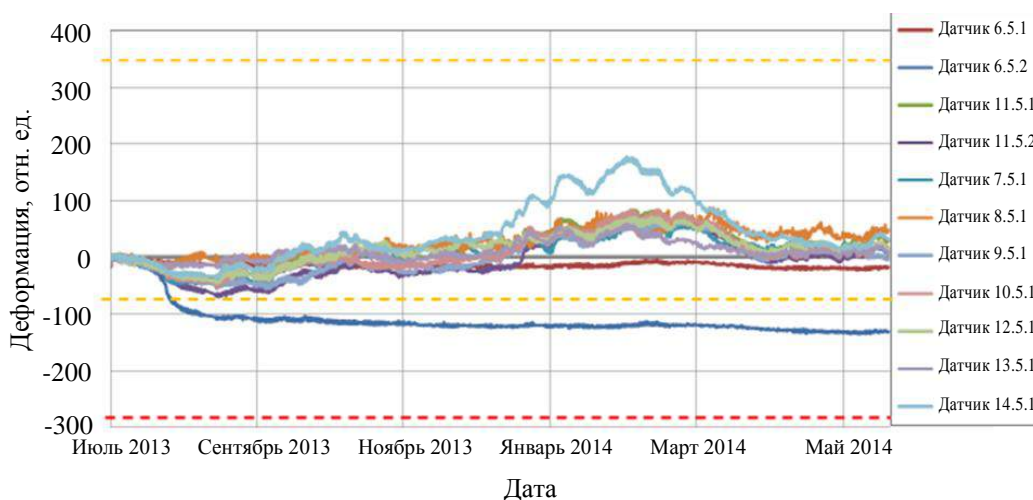


Рис. 13. Статистика мониторинга несущих металлических конструкций

Как видно из графиков, максимальное значение деформации, так и не превысившей заданный порог, составило  $\approx 170$  отн. ед., что в пересчете на абсолютные величины составляет растяжение  $\approx 17$  мм. Данные показания ВОД обусловлены влиянием снеговой нагрузки в указанный период эксплуатации.

Приведенные результаты внедрения волоконно-оптических систем мониторинга на конструкциях различного назначения свидетельствуют о долговременной стабильности работы ВОД, обеспечивающих необходимый уровень безопасности, что позволяет расширять сферу применения подобных систем, несомненно имеющих важную практическую значимость.

### Вывод

В результате анализа информации из литературных источников установлено, что эксплуатируется большое количество поврежденных мостовых сооружений, которые нуждаются в проведении ремонтных мероприятий разной степени сложности. Соответствие фактического состояния мостов техническим характеристикам проекта является важнейшим критерием обеспечения безопасности.

Показано, что одним из наиболее перспективных и технологичных способов восстановления грузоподъемности строительных сооружений является внешнее армирование композитными материалами. Кратко представлены основные технологии внешнего армирования железобетонных и металлических мостов с применением композитов, проанализированы их основные достоинства и недостатки.

Вместе с тем установлено, что ремонтные работы необходимо проводить с учетом достоверной оценки имеющихся повреждений, что невозможно без проведения соответствующей диагностики,

которую можно осуществлять за счет использования волоконно-оптических систем мониторинга, имеющих целый ряд преимуществ по сравнению с классическими методами неразрушающего контроля.

Описан фактический опыт внедрения технологий внешнего армирования композитами и мониторинга строительных и иных сооружений. Показана эффективность данных технических решений, которые можно применять как в комплексе, так и по отдельности, обеспечивая решение конкретных задач по обеспечению безопасной эксплуатации конструкций.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Л. А., Капустин И. А., Борисова О. Н., Писаренко Ж. В. Изобретения, основанные на использовании нанотехнологий, позволяют получить принципиально новые технические результаты. Ч. II // Нанотехнологии в строительстве. 2020. Т. 12. № 2. С. 71—76. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-2-71-76.
2. Иванов Л. А., Деменев А. В., Писаренко Ж. В., Ванг Ц. Изобретения, основанные на использовании нанотехнологий, позволяют получить принципиально новые технические результаты. Ч. III // Нанотехнологии в строительстве. 2020. Т. 12. № 3. С. 140—146. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-3-140-146.
3. РЖД жалуется, что мосты в ее хозяйстве находятся в царском состоянии [Электронный ресурс]. URL: [https://www.vedomosti.ru/business/articles/2011/07/25/stoletnie\\_mosty](https://www.vedomosti.ru/business/articles/2011/07/25/stoletnie_mosty) (дата обращения: 25.02.2020).
4. "Износ 39,5 процентов": что происходит с мостом на Суворова [Электронный ресурс]. URL: <https://www.newkaliningrad.ru/news/community/5832859-iznos-395-protentov-chto-proiskhodit-s-mostom-na-suvorova.html> (дата обращения: 25.02.2020).
5. Коррозия арматуры [Электронный ресурс]. URL: [https://bstudy.net/652634/tehnika/korroziya\\_armatury](https://bstudy.net/652634/tehnika/korroziya_armatury) (дата обращения: 25.02.2020).
6. Иванников В. В., Николаев А. Г., Шварц В. М., Рябов О. Б., Степанов В. Н. Характерные дефекты и повреждения металлических конструкций // Химическая техника. 2015. № 7. С. 7.

7. ОДМ 218.3.100-2017 Рекомендации по применению материалов для ремонта бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/557297116> (дата обращения: 25.02.2020).
8. Система внешнего армирования FibArm [Электронный ресурс]. URL: [https://www.csm-spb.ru/assets/pdf/Kompozit%20usilenie/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A1%D0%92%D0%90%202017\\_correct.pdf](https://www.csm-spb.ru/assets/pdf/Kompozit%20usilenie/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A1%D0%92%D0%90%202017_correct.pdf) (дата обращения: 25.02.2020).
9. ГОСТ Р 22.1.12-2005 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования (с Изменением № 1) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200039543> (дата обращения: 25.02.2020).
10. СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84\* (с Изменением № 1) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084849> (дата обращения: 25.02.2020).
11. СТО 38276489.001-2017 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Проектирование и технология производства работ [Электронный ресурс]. URL: <https://mpkm.org/attachments/get/772/sto-38276489.001-2017-carbonwrap.pdf> (дата обращения: 25.02.2020).
12. СТО 70386662-102-2016 Защита надземных и подземных конструкций зданий и сооружений, их ремонт и усиление, закрепление грунтов с применением материалов химического концерна "BASF". Материалы для проектирования. Чертежи узлов. Инструкция по производству работ [Электронный ресурс]. URL: <https://mpkm.org/attachments/get/1364/sto-70386662-102-2016.pdf> (дата обращения: 25.02.2020).
13. Овчинников И. Г., Валиев Ш. Н., Овчинников И. И., Зиновьев В. С., Умиров А. Д. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // Наукоедение. 2012. № 4. 22 с. <https://naukovedenie.ru/PDF/7tvn412.pdf>
14. Система внешнего армирования Carbonwrap [Электронный ресурс]. URL: <http://carbonwrap.ru/> (дата обращения: 25.02.2020).
15. Композиционные материалы для усиления конструкций [Электронный ресурс]. URL: [http://triadaholdingnn.ru/apparatus\\_and\\_materials/kompozicionnye\\_materialy\\_dlya\\_usileniya\\_konstrukcij/](http://triadaholdingnn.ru/apparatus_and_materials/kompozicionnye_materialy_dlya_usileniya_konstrukcij/) (дата обращения: 25.02.2020).
16. Система внешнего армирования из углеродных композитных материалов для ремонта и усиления строительных конструкций [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hccomposite.com/upload/files/stroyka%20tehnika/SVA%20v%20stroitelstve.pdf> (дата обращения: 25.02.2020).
17. Готовые решения для ремонта и строительства промышленных зданий и сооружений [Электронный ресурс]. URL: <https://assets.master-builders-solutions.basf.com/ru-ru/basf-resheniya-dlia-promishlennich-zdani-i-soorugenii.pdf> (дата обращения: 25.02.2020).
18. Усиление конструкций [Электронный ресурс]. URL: [https://rus.sika.com/ru/solutions\\_products/02/remont\\_betona/mosty/rewenija\\_dlia\\_mostov/usilenie\\_konstrukcij.html](https://rus.sika.com/ru/solutions_products/02/remont_betona/mosty/rewenija_dlia_mostov/usilenie_konstrukcij.html) (дата обращения: 25.02.2020).
19. Pultruded Carbon Fiber Plate Pre-Impregnated in Epoxy-Based Resin [Электронный ресурс]. URL: [https://www.mapei.com/public/CA/products/Carboplate\\_E\\_170\\_EN\\_lr.pdf](https://www.mapei.com/public/CA/products/Carboplate_E_170_EN_lr.pdf) (дата обращения: 25.02.2020).
20. Replark™ Карбоновая ткань для ремонта и укрепления поврежденных конструкций [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jst.go.jp/sdgs/en/practices/p057.html> (дата обращения: 25.02.2020).
21. TORAYCA® cloth method Specifications/performance [Электронный ресурс]. URL: [https://www.torayca.com/en/lineup/industrial/ind\\_012.html](https://www.torayca.com/en/lineup/industrial/ind_012.html) (дата обращения: 25.02.2020).
22. Овчинников И. И., Овчинников И. Г., Чесноков Г. В., Покулаев К. В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками. Ч. 1. Состояние проблемы // Наукоедение. 2014. № 3. 27 с. <https://naukovedenie.ru/PDF/19TVN314.pdf>
23. Овчинников И. И., Овчинников И. Г., Чесноков Г. В., Покулаев К. В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками. Ч. 2. Применение метода предельных состояний к расчету растягиваемых и изгибаемых конструкций // Наукоедение. 2014. № 3. 23 с. <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN314.pdf>
24. Miller T. C., Chajes M. J., Mertz D. R., Hastings J. N. Strengthening of a Steel Bridge Girder using CFRP Plates // J. Bridge Engineering. 2001. V. 6(6). P. 514—522.
25. Peiris A., Harik I. E. Field Testing of Steel Bridge Girders Strengthened Using Ultra High Modulus (UHM) Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Laminates: Conference Proceedings: The 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. 13–15 June 2012. Rome. 8 P.
26. Голушко С. К., Харенко Д. С., Чейдо Г. П., Чуринов А. Е., Шакиров С. Р., Шелемба И. С. Мониторинг производственной среды угольных шахт волоконно-оптическими датчиками: сб. тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. "Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности" / под ред. Клишина В. И., Исмаилова З. Р., Блюменштейна В. Ю., Протасова С. И., Дубинина Г. П. 2012. С. 83—85.
27. Шишкин В. В., Чуринов А. Е., Харенко Д. С., Шелемба И. С. Система мониторинга несущих конструкций футбольного манежа на основе волоконно-оптических датчиков // Фотон-Экспресс. 2013. № 6(110). С. 22—23.
28. Wenzel H. Health Monitoring of Bridges // John Wiley & Sons Ltd. 2009. 643 p.
29. Ye X.-W., Su Y.-H., Xi P.-S. Statistical Analysis of Stress Signals from Bridge Monitoring by FBG System // Sensors (Basel). 2018. V. 18(2). № 491. 14 p. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5855928/>
30. Wang C.-Y., Wang H.-L., Chen M.-H. Applications of FBG Sensors on Bridge Health Monitoring & Diagnosis: Taiwan-Japan Symposium on Advancement of Urban Earthquake Hazard Mitigation Technology (Jhongli, Taoyuan, Taiwan). 2005. — 9 p. [https://www.researchgate.net/publication/229035582\\_Application\\_of\\_FBG\\_Sensors\\_on\\_Bridge\\_Health\\_Monitoring\\_Diagnosis](https://www.researchgate.net/publication/229035582_Application_of_FBG_Sensors_on_Bridge_Health_Monitoring_Diagnosis)
31. Kiong S. C., Madhav A. V. G., Suresh B. Application of Structural Health Monitoring Technology in Asia. IWSHM 2015. Nanyang Technological University. — 42 p. [https://web.stanford.edu/group/sacl/workshop/documents/Keynote%20presentations/IWSHM%202015/IWSHM\\_Keynote\\_Soh\\_published.pdf](https://web.stanford.edu/group/sacl/workshop/documents/Keynote%20presentations/IWSHM%202015/IWSHM_Keynote_Soh_published.pdf)
32. Федотов М. Ю., Кошман Н. П., Гусев Б. В. и др. Опыт применения композитных систем внешнего армирования и оптического мониторинга строительных сооружений // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 4. 20 с.
33. Лоскутов М. Л. Устройство повышения несущей способности металлических конструкций инженерных сооружений. Патент РФ № 2018122657, E01D 22/00, E04G 23/00, E04G 23/02, № 2018122657. Заявл. 21.06.2018. Опубл. 23.12.2019. Бюл. № 36. — 10 с.
34. Федотов М. Ю., Лоскутов М. Л., Шелемба И. С., Колесников А. В., Овчинников И. Г. К вопросу мониторинга несущих металлических конструкций мостов с использованием волоконно-оптических датчиков // Транспортные сооружения. 2018. Т. 5. № 3. С. 10.
35. Овчинников И. Г., Валиев Ш. Н., Овчинников И. И., Зиновьев В. С., Умиров А. Д. Вопросы усиления



железобетонных конструкций композитами. 2. Натурные исследования усиления железобетонных конструкций композитами, возникающие проблемы и пути их решения // Наукоедение. 2012. № 4. 37 с. <https://naukovedenie.ru/PDF/8tvn412.pdf>

36. Шелемба И. С. Методы опроса распределенных волоконно-оптических измерительных систем и их практиче-

ское применение: дис. ... канд. тех. наук. — Новосибирск, 2018. — 135 с.

37. Шишкин В. В., Гранёв И. В., Шелемба И. С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 1. С. 61—75.

## Strengthening by composite materials and optical monitoring of the reliability of operation of building structures

(Review)

M. Yu. FEDOTOV

Russian Academy of Engineering, Moscow, Russia

O. N. BUDADIN, S. O. KOZEL'SKAYA

JSC "Central Research Institute of Special Machinery",  
Khotkovo, Moscow region, Russia

I. G. OVCHINNIKOV,

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

I. S. SHELEMBА

Institute of Automation and Electrometry of SB of RAS, Novosibirsk, Russia  
Ltd "Inversion Sensor", Perm, Russia

*This article describes the domestic experience, the results of experimental researches and application of polymer composites based on carbon reinforcing fibers and polymer matrices on real building structures, which allow strengthening in order to restore the bearing capacity and extend the life. The features of the technological processes of external reinforcement of damaged reinforced concrete and metal structures are considered. It is shown that the key aspect of ensuring the safe operation of complex technical systems and the timely detection of the occurrence and accumulation of defects, as well as assessing the actual technical condition in real time, is the use of methods and means of optical non-destructive testing, which is confirmed by the results obtained. It has been established that the combined use of polymer composites and fiber-optic non-destructive testing means allows not only to restore or increase the bearing capacity of the strengthening structure, but also to ensure quality control of the work performed and further operation throughout the life cycle.*

**Keywords:** polymer composite, building structure, reinforced concrete structure, metal structure, strengthening, optical non-destructive testing.

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». 2022. Вып. 1 (165). С. 1—68.

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

Подписано в печать 25.01.2022. Формат 60x84 1/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,9. Уч.-изд. л. 8,2.  
Тираж 250 экз. Заказ 1986. Свободная цена.  
Адрес редакции: 125424, Москва,  
Волоколамское ш., д. 77,  
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».  
[www.ntckompas.ru](http://www.ntckompas.ru); E-mail: [izdanie@ntckompas.ru](mailto:izdanie@ntckompas.ru)  
Отпечатано: 101000, Москва,  
Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, офис 105.  
ИП Кириченко Алексей Викторович.  
Индекс 80089.