

А.С. Генералов, В.В. Мурашов, Е.И. Косарина, А.С. Бойчук

**ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ  
РЕВЕРБЕРАЦИОННО-СКВОЗНЫМ МЕТОДОМ**

Дано описание способов оценки физико-механических свойств реверберационно-сквозным методом контроля. Проведен корреляционно-регрессионный анализ данных, полученных в результате неразрушающих и разрушающих механических испытаний образцов из углепластика. Сделан вывод о практической применимости построенных корреляционных связей прочности при изгибе углепластика с критерием SWF.

**Ключевые слова:** реверберационно-сквозной метод, углепластики, физико-механические свойства, прочность, критерий «stress wave factor» (SWF), корреляционно-регрессионный анализ.

Estimation of physical and mechanical properties by acoustic-ultrasonic technique is described. Correlation-regression analysis of the data obtained by nondestructive and mechanical destructive testing of CFRP specimens was carried out. A practical application of the plotted correlation of CFRP bending strength and SWF criterion was verified.

**Key words:** acoustic-ultrasonic technique, carbon fiber reinforced plastics (CFRP), physical and mechanical properties, strength, stress wave factor (SWF), correlation-regression analysis.

Ультразвуковой реверберационно-сквозной (РСкв) метод применяется для контроля физико-механических свойств материалов [1, 2]. Использование этого метода в неразрушающем контроле позволяет перейти от выборочной проверки отдельных физико-механических свойств на специально изготовленных образцах к их определению на готовых изделиях без разрушения или повреждения. Это позволяет повысить безопасность эксплуатации воздушных судов благодаря повышению достоверности оценки качества элементов конструкций [3].

Контроль физико-механических свойств акустическими методами основан на корреляционных связях измеренных акустических параметров с оцениваемыми свойствами материала [4]. Большинство свойств (включая прочность) связаны с акустическими параметрами корреляционными зависимостями, теснота которых определяется выбором измеряемого параметра (иногда нескольких), обеспечивающего наилучшую корреляцию с оцениваемой характеристикой материала [5, 6]. При контроле пользуются тарировочными графиками, построенными на основе статистической обработки большого количества экспериментальных данных [7]. Для РСкв-метода таким акустическим параметром является критерий SWF (stress wave factor) [8]. На практике для вычисления критерия SWF применяются различные способы, в основном разработанные для метода акустической эмиссии (АЭ). Связано это, прежде всего, с тем, что получаемые при контроле РСкв-методом сигналы (рис. 1) имеют большое сходство с сигналами АЭ (рис. 2), которые сильно растянуты во времени и имеют очень нерегулярную структуру. Кроме того, для реализации РСкв-метода за рубежом часто используют совместно с широкополос-

ными ультразвуковыми излучающими преобразователями резонансные приемные преобразователи АЭ или целиком аппаратуру АЭ.

Как показывает практика, все существующие способы вычисления критерия SWF имеют существенный недостаток – при обработке не полностью используется полезная информация, содержащаяся в сигнале [9]. Получаемые РСкв-сигналы зачастую содержат спектральные составляющие, информативность которых различна для определяемых свойств материала объекта контроля (ОК). Некоторые составляющие, не несущие полезной информации, сильно подвержены влиянию мешающих факторов – собственных шумов аппаратуры, температуры, степени влагонасыщения, качества акустического контакта и т. д. В результате с использованием вычисленных значений критерия SWF соответствующие физико-механические характеристики ОК определяются некорректно и не могут быть использованы для оценки его состояния.

В ВИАМ предложен и опробован принципиально новый способ вычисления критерия SWF – «интеграл оптимального спектра» (ИОС) [10]. Способ наиболее полно использует информацию, содержащуюся в спектре полезного сигнала, и позволяет отстроиться от информации, не связанной с состоянием структуры материала (например, от информации, определяемой конструктивными особенностями ОК) путем вычисления акустической характеристики повреждения материала, которая была названа «спектральной весовой функцией». Спектральная весовая функция содержит информацию об изменениях спектра сигнала, вызванных изменениями структуры и, соответственно, физико-механических свойств материала.

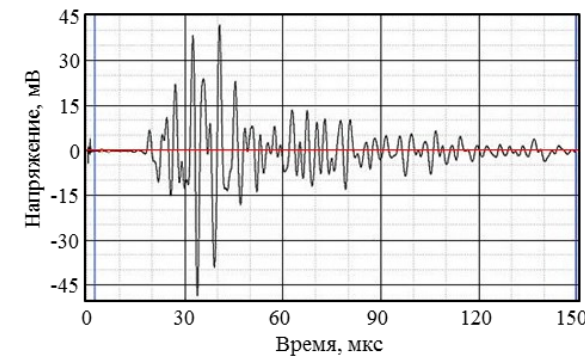


Рис. 1. Типичный РСкв-сигнал  $U_j(t)$ , записанный с образца из углепластика со схемой выкладки  $[0^\circ/90^\circ]$ , толщиной 10 мм при помощи УЗ-преобразователей с частотой 0,5 МГц, расположенных на расстоянии 118 мм друг от друга

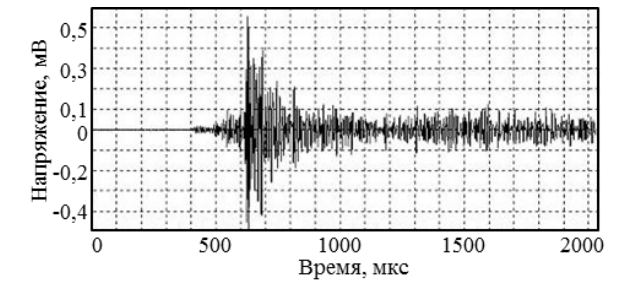


Рис. 2. Типичный импульсный сигнал для метода акустической эмиссии (АЭ)

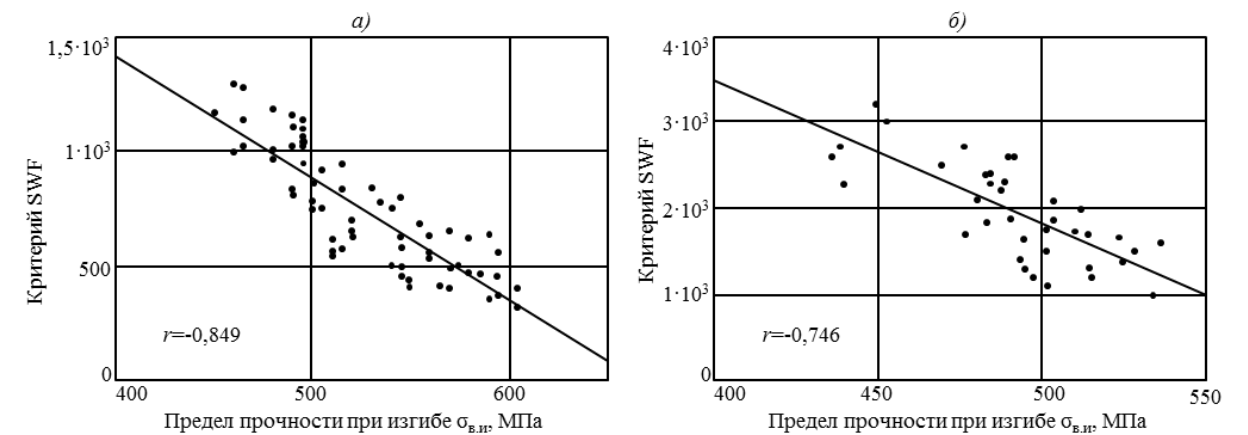


Рис. 3. Корреляционная связь предела прочности при изгибе образцов из углепластика толщиной 10 мм, содержащих производственные (а) и эксплуатационные (б) дефекты, с критерием SWF, вычисленным способом ИОС

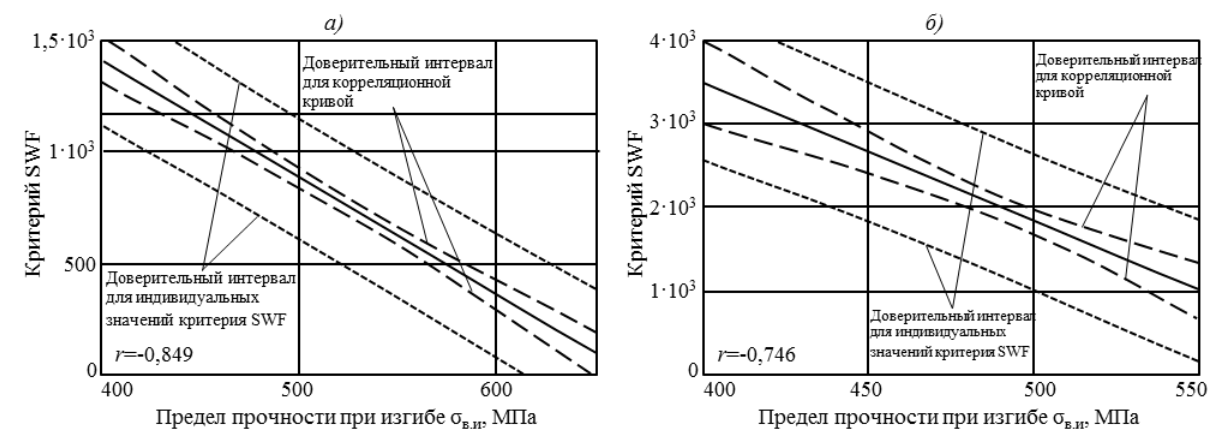


Рис. 4. Корреляционная связь предела прочности при изгибе образцов из углепластика толщиной 10 мм, содержащих производственные (а) и эксплуатационные (б) дефекты, с критерием SWF, вычисленным способом ИОС, и 95%-ные доверительные интервалы

Использование РСкв-метода на практике сводится к пороговой разбраковке ОК или к определению требуемых физико-механических свойств ОК по заранее построенным корреляционным связям этих свойств с критерием SWF.

Пороговая разбраковка при контроле РСкв-методом заключается в том, что вычисленное значение критерия SWF сравнивается с заранее выбранным пороговым значением  $SWF_{th}$ . Таким образом, ОК задерживается, если хотя бы в одной области замера значение критерия SWF оказывается меньше заданного порога (в классическом варианте) и больше заданного порога (в случае использования для обработки сигнала способа ИОС). Порог выбирается из соображений достоверного выявления недопустимого падения физико-механических характеристик.

Построение корреляционных связей осуществляется с использованием специально изготовленных образцов, имитирующих ОК по толщине, кривизне поверхности, схеме выкладки и т. д., в которых предполагается оценивать физико-механические свойства РСкв-методом или с использованием непосредственно элементов конструкций. Для этого проводятся неразрушающие испытания РСкв-методом с целью вычисления критерия SWF и последующие разрушающие испытания с целью определения требуемой физико-механической характеристики. После этого проводится корреляционно-регрессионный анализ полученных данных, в ходе которого определяются: форма корреляционной связи, вид аналитической функции, наилучшим образом характеризующей эту корреляционную связь, параметры уравнения регрессии; вычисляются коэффициенты корреляции и детерминации; проводится оценка значимости параметров регрессии и корреляции, а также проверка остатков регрессии на гомо- и гетероскедастичность и т. д. По результатам анализа делается вывод о практической применимости построенных корреляционных связей.

Исследования, проводимые в ВИАМ, направлены, главным образом, на построение корреляционных связей прочности углепластиков с критерием SWF. В качестве прочностной характеристики использовался предел прочности при изгибе  $\sigma_{в.и}$ . В результате проведенных неразрушающих и разрушающих испытаний двух групп образцов [11, 12], на одной из которых имитировались производственные повреждения, а на другой – эксплуатационные, получены пары данных – критерий SWF, вычисленный способом ИОС, и соответствующее ему значение предела прочности при изгибе [13, 14].

Проведен корреляционно-регрессионный анализ полученных данных [15]. В ходе анализа определена форма корреляционной связи и вид аналитической функции (1), которая наилучшим образом характеризует эту корреляционную связь:

$$y(x)=a+bx+\varepsilon. \quad (1)$$

Параметры  $a$  и  $b$  этого уравнения определяются методом наименьших квадратов (МНК), исходя из того, что теоретическая линия регрессии должна быть проведена так, чтобы сумма квадратов отклонений эмпирических данных от теоретических значений была величиной минимальной.

Таким образом, получено два уравнения регрессии, характеризующих связь предела прочности при изгибе углепластика толщиной 10 мм со схемой выкладки  $[0^\circ/90^\circ]$  с критерием SWF, вычисленным способом ИОС, для двух групп образцов, содержащих производственные и эксплуатационные дефекты соответственно:

$$SWF_{ИОС_1} = 3509 - 5,25 \sigma_{в.и}; \quad (2)$$

$$SWF_{ИОС_2} = 10094 - 16,56 \sigma_{в.и}. \quad (3)$$

Анализируя полученные уравнения (2) и (3), можно сделать вывод, что зависимости в обоих случаях обратные (с ростом одной из переменных другая убывает, с убыванием одной из переменных другая растет). Обратные зависимости в данном случае объясняются спецификой предложенного способа ИОС [10].

С помощью уравнений (2) и (3) построены корреляционные связи предела прочности при изгибе углепластика толщиной 10 мм со схемой выкладки  $[0^\circ/90^\circ]$  с критерием SWF, вычисленным способом ИОС (рис. 3).

Уравнения регрессии дополнены показателем тесноты связи – для каждого уравнения регрессии вычислен линейный коэффициент корреляции  $r_{xy}$ :

$$r_{xy} = \frac{\overline{xy} - \overline{y} \overline{x}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (4)$$

где  $\overline{x}$ ,  $\overline{y}$ ,  $\overline{xy}$  – средние значения критерия SWF и значений предела прочности при изгибе;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – средние квадратические отклонения значений критерия SWF и значений предела прочности при изгибе.

Коэффициенты корреляции составили -0,849 и -0,746 соответственно. С помощью шкалы английского статистика Чеддока можно сделать вывод, что корреляционная связь предела прочности при изгибе углепластика с критерием SWF, вычисленным способом ИОС, сильная.

Для оценки качества подбора линейной функции вычислены квадраты линейного коэффициента корреляции  $r_{xy}^2$ , которые составили: 0,721 и 0,557. Величина  $r_{xy}^2$  является коэффициентом детерминации, характеризующим долю дисперсии результативного признака  $y$ , объясняемую регрессией, в общей дисперсии результативного признака. В результате анализа полученных коэффициентов детерминации сделан вывод о том, что в обоих случаях точность подбора уравнения регрессии достаточно высокая (в первом случае на 72,1% изменение результата  $y$  обусловлено уравнением регрессии, т. е. собственно зависимостью от фактора  $x$  и на 27,9% – другими неучтенными в

модели факторами, а во втором на 55,7 и на 44,3% соответственно).

С помощью  $t$ -статистики Стьюдента проведена оценка статистической значимости коэффициентов корреляции и параметров регрессии, которая показала, что в обоих случаях коэффициенты корреляции  $r_{xy}$  и параметры регрессии  $a$  и  $b$  не случайно отличаются от нуля, а статистически значимы.

Качество моделей определяют средние ошибки аппроксимации, которые составили 16,61 и 18,14%. Качество модели оценивается как достаточно хорошее (ошибка аппроксимации не превышает 20%).

Оценка значимости уравнений регрессии в целом производилась на основе  $F$ -статистики (определения критерия Фишера), в ходе которой установлена статистическая значимость полученных уравнений регрессии (2) и (3).

Для каждой корреляционной связи построены границы 95%-ного доверительного интервала (рис. 4) для средних и для индивидуальных значений критерия SWF (внутренние и внешние границы соответственно). Построение доверительного интервала для среднего значения критерия SWF при данном значении предела прочности при изгибе (см. формулы 2 и 3) основывалось на предположении о том, что для конкретного значения предела прочности при изгибе возможные значения критерия SWF распределены нормально. Построение доверительного интервала для индивидуальных значений критерия SWF при данном значении предела прочности при изгибе основывалось на предположении, что значения критерия SWF распределены вдоль линии регрессии с вариацией (дисперсией)  $\sigma^2$ , которая одинакова для всех значений предела прочности при изгибе. Внутренние границы доверительных интервалов (см. рис. 4) показывают границы, в которых с вероятностью 95% находится истинная корреляционная кривая. Внешние границы показывают границы, в которых с вероятностью 95% будут находиться все возможные значения критерия SWF в исследованном диапазоне значений предела прочности при изгибе.

При проведении регрессионного анализа, основанного на МНК, на практике особое внимание уделяют проблемам, связанным с выполнимостью свойств случайных отклонений моделей. Свойства оценок коэффициентов регрессии напрямую зависят от свойств случайного члена  $\varepsilon$  в уравнении регрессии. Для получения качественных оценок необходимо следить за выполнимостью предпосылок МНК (условий Гаусса–Маркова), так как при их нарушении МНК может давать оценки с неудовлетворительными статистическими свойствами. Одной из ключевых предпосылок МНК является условие постоянства дисперсий случайных отклонений. Выполнимость данной предпосылки называется гомоскедастичностью (постоянством дисперсии отклонений). Невыпол-

нимость данной предпосылки называется гетероскедастичностью (непостоянством дисперсии отклонений).

Для проверки остатков регрессии (отклонений отдельных точек от линии регрессии) на гомо- и гетероскедастичность использовались графический анализ отклонений и тест Голдфелда–Квандта.

Использование графического представления отклонений позволяет визуально в первом приближении продемонстрировать наличие гомо- или гетероскедастичности. В этом случае по оси абсцисс откладывается объясняющая переменная  $x$  (либо линейная комбинация объясняющих переменных  $y$ ), а по оси ординат либо отклонения  $e_i$ , либо их квадраты  $e_i^2$ . Графический анализ отклонений является удобным и достаточно надежным в случае парной регрессии. При множественной регрессии графический анализ возможен для каждой из объясняющих переменных отдельно.

На рис. 5 все отклонения  $e_i^2$  находятся внутри полуполосы практически постоянной ширины, параллельной оси абсцисс. Это говорит о независимости дисперсий  $e_i^2$  от значений переменной  $x$  и их постоянстве, т. е. в данном случае находится в условиях гомоскедастичности.

Алгоритм проведения теста Голдфелда–Квандта.

1. Все  $n$  наблюдений упорядочиваются по величине  $x$ .

2. Вся упорядоченная выборка после этого разбивается на три подвыборки размерностей  $k$ ,  $(n-2k)$ ,  $k$  соответственно.

3. Оцениваются отдельные регрессии для первой подвыборки ( $k$  первых наблюдений) и для третьей подвыборки ( $k$  последних наблюдений). Вычисляются дисперсии регрессии (суммы квадратов отклонений):

$$S_1 = \sum_{i=1}^k e_i^2 \quad \text{и} \quad S_3 = \sum_{i=n-k}^n e_i^2. \quad (5)$$

4. Для сравнения соответствующих дисперсий строится следующая  $F$ -статистика:

$$F = \frac{S_3 / (k - m - 1)}{S_1 / (k - m - 1)} = \frac{S_3}{S_1}, \quad (6)$$

где  $(k-m-1)$  – число степеней свободы соответствующих выборочных дисперсий ( $m$  – количество объясняющих переменных в уравнении регрессии).

5. Если наблюдаемое значение  $F$ -статистики  $F_{набл} = S_3/S_1 > F_{кр}$ , то гипотеза об отсутствии гетероскедастичности отклоняется.

Для первой группы образцов, содержащих производственные дефекты,  $n=69$ ,  $k=25$ ,  $F_{кр}=4,0012$  (табличное значение). Расчетное значение  $F$ -статистики:  $F=0,78$ . Как видно,  $F_{набл}$  меньше  $F_{кр}$ , а значит принимается гипотеза об отсутствии гетероскедастичности. Другими словами имеет место гомоскедастичность.

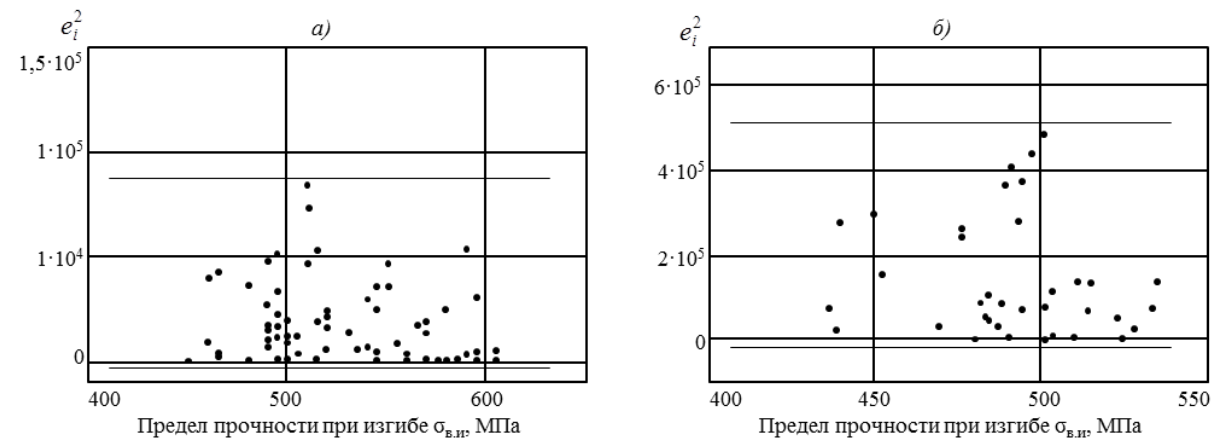


Рис. 5. Графический анализ остатков линейной регрессии статистической модели, полученной с использованием данных для образцов из углепластика, содержащих производственные (а) и эксплуатационные (б) дефекты

Для второй группы образцов, содержащих эксплуатационные дефекты,  $n=36$ ,  $k=13$ ,  $F_{кр}=4,1709$  (табличное значение). Расчетное значение  $F$ -статистики:  $F=0,931$ . В данном случае  $F_{набл}$  также меньше  $F_{кр}$ , а значит также принимается гипотеза об отсутствии гетероскедастичности. Имеет место гомоскедастичность.

На основании проведенного корреляционно-регрессионного анализа можно сделать вывод, что существует достаточно тесная корреляционная связь предела прочности при изгибе углепластиков с критерием SWF, вычисленным способом ИОС, а построенные модели статистически значимы и их можно обоснованно применять для определения прочностных свойств углепластиков РСкв-методом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф., Иванова Г.А., Файзрахманов Н.Г. Диагностика структуры, состава и свойств полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2008. № 1. С. 17–24.
2. Далин М.А., Генералов А.С., Бойчук А.С., Ложкова Д.С. Основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля //Авиационные материалы и технологии. 2013. № 1. С. 64–69.
3. 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.
4. Мурашов В.В., Косарина Е.И., Генералов А.С. Контроль качества авиационных деталей из полимерных композиционных материалов и многослойных клееных конструкций //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 65–70.
5. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 465–475.
6. Мурашов В.В., Мишуков К.С., Сорокин К.В. Оценка прочности углепластиков в монолитных конструкциях при сдвиге и сжатии методами неразрушающего контроля //Контроль. Диагностика. 2011. №10. С. 29–34.
7. Мурашов В.В., Генералов А.С., Мишуков К.С. Определение прочностных характеристик полимерных композиционных материалов в монолитных конструкциях ультразвуковым методом //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №10. С. 32–37.
8. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. /Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение. 2004. С. 732.
9. Summerscales J. Non-destructive testing of fiber-reinforced plastics composites //Elsevier Science Publishers LTD. 1990. V. 2. P. 1–47.
10. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С., Юхацкова О.В. Оценка эффективности применения способов вычисления критерия SWF для определения прочности элементов конструкций из углепластика реверберационно-сквозным методом //Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. №1. С. 39–43.
11. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С. Диагностика полимерных композитов ультразвуковым реверберационно-сквозным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 42–47.
12. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сеник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
13. Постнов В.И., Никитин К.Е., Бурхан О.Л., Петухов В.И., Орзаев В.Г. Исследование ультразвуковым методом структурных изменений в ПКМ в процессе формирования полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2009. №3. С. 25–28.
14. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С. Определение прочности углепластиков ультразвуковым реверберационно-сквозным методом //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №11. С. 47–53.
15. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С. Определение прочности элементов конструкций из углепластиков при ремонте и эксплуатации изделий авиационной техники ультразвуковым реверберационно-сквозным методом //Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2013. №8. С. 4–8.
16. Елисеева И.И., Курьшева С.В., Костеева Т.В. и др. Эконометрика: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика. 2007. С. 43–106.