

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. М.: Машиностроение. 1975. 200 с.
2. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия. 1979. 199 с.
3. Малинина Н.А. Мезомеханика многоуровневой системы структурных напряжений // Вестник НГУ. 2004. № 26. С. 7–12.
4. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д. Природа локализации пластической деформации твердых тел // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 8. С. 62–69.
5. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука. 1983. 280 с.

В.В. МУРАШОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СОСТАВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Повышение надежности изделий авиационной техники наиболее актуальная задача современного авиастроения. Поскольку надежность деталей и агрегатов изделия зависит не только от свойств материалов, но и от наличия в них скрытых структурных неоднородностей, приводящих к отклонениям физико-механических характеристик материала от номинальных значений, то вопрос их контроля приобрел значительную актуальность.

Для оценки физико-механических свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) применяются методы диагностики, которые используют принципы акустических, тепловых, электрических и других методов дефектоскопии, но в ином качестве. Основными из них (по числу решаемых задач) являются ультразвуковые (УЗ) методы, которые не требуют громоздкой аппаратуры для их реализации и могут применяться не только в лабораторных условиях, но и в цехах и даже в полевых условиях [1, 2].

Методы технической диагностики являются косвенными и основаны на установлении корреляционных связей между параметрами диагностики (акустическими характеристиками материала) и физико-механическими характеристиками ПКМ путем сопоставления результатов неразрушающих и разрушающих испытаний [3].

Вопросами оценки физико-механических характеристик неметаллических конструкционных материалов (в основном стеклопластиков) занимаются уже несколько десятков лет [4], однако широкого внедрения этих методов не наблюдается. Такое же положение в этой области и за рубежом. Связано это с невысокой точностью оценки физико-механических характеристик акустическими методами и нестабильностью получаемых результатов [5].

В ВИАМ создано новое научное направление по диагностике физико-механических свойств и состава ПКМ [6, 7], позволяющее определять упругие и прочностные свойства, пористость, плотность, содержание матрицы и наполнителя, степень отверждения матрицы углепластиков в конструк-

циях планера самолета и других изделиях ответственного назначения лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля путем использования корреляционных уравнений, параметрами которых являются амплитудные, временные и спектральные характеристики принятых акустических сигналов, определяемые непосредственно в конструкции без ее разрушения. Исследована информативность принимаемых акустических сигналов, прошедших через материал, предложены способы их комплексирования, обеспечивающие повышение точности определения физико-механических свойств материала. Показано, что для повышения информативности параметров диагностики целесообразно использовать методику широкополосной акустической спектроскопии с целью получения частотных зависимостей коэффициента затухания и скорости ультразвуковых волн, а также трансформации этих зависимостей при изменениях состава материала.

Использование лазерного возбуждения импульсов упругих колебаний длительностью не более 0,05 мкс дает возможность проводить спектральный анализ принятых акустических сигналов в широкой полосе частот – от 0,1 до 10 МГц, что позволяет повысить точность и достоверность диагностики свойств и состава ПКМ неразрушающим методом. Установлено, что основными критериями выбора одиночного или комплексного параметра диагностики при оценке физико-механических характеристик и состава ПКМ являются коэффициент корреляции (или корреляционного отношения) и критерий надежности этого коэффициента.

Собственно, и акустические, и физико-механические характеристики материала определяются структурой и составом материала, поэтому между ними существует корреляционная связь, которая при использовании традиционных параметров диагностики (скорости прохождения и затухания УЗК) не всегда достаточна для практического применения. Поэтому в ВИАМ проводились исследования и разработки в направлении изыскания принципиально новых информативных параметров диагностики свойств ПКМ (притом таких, которые могут быть определены с высокой точностью и достоверностью непосредственно в детали или конструкции из ПКМ без их разрушения), а также в направлении решения задачи комплексирования параметров диагностики с целью установления более тесных корреляционных связей комплексных параметров диагностики с определяемыми характеристиками ПКМ [8, 9].

Для определения плотности, пористости и состава углепластика выбран лазерно-акустический способ ультразвукового метода отражения [10, 11]. Этот метод неразрушающего контроля основан на возбуждении импульсов упругих колебаний в объекте контроля с помощью луча лазера, приеме импульсов, прошедших контролируемый объект и отраженных от поверхности раздела двух сред, отличающихся характеристическими импедансами (от границ объекта контроля или неоднородностей), приеме отраженных импульсов и анализе параметров принятых сигналов.

Для получения мощных широкополосных ультразвуковых импульсов применено лазерное термооптическое возбуждение звука – оптико-акустический эффект [12]. Амплитуда и временная форма (и, соответственно, частотный спектр) термооптически возбуждаемого ультразвукового импульса определяется временной зависимостью интенсивности поглощенного лазерного импульса и теплофизическими параметрами поглощающей среды (коэффициентом поглощения света, коэффициентом теплового расширения, теплопроводностью, температуропроводностью), при этом

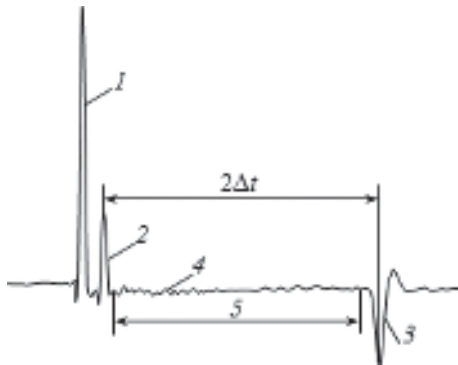


Рис. 1. Временной трек сигналов (импульсов) при их прохождении по материалу детали или конструкции:

1 – сигнал оптико-акустического генератора (имеет амплитуду A); 2 – сигнал, отраженный от поверхности объекта контроля (ОК) (имеет амплитуду A_0); 3 – донный импульс – сигнал, отраженный от противоположной стороны ОК (имеет амплитуду A_1); $2\Delta t$ (мкс) – время прохождения сигнала по толщине материала в прямом и обратном направлениях; 4 – структурный шум, возникающий при отражении от неоднородностей структуры материала и преимущественно от пор; 5 – рабочий участок временного трека, на котором определяют нормированную энергию W_n структурного шума

Сигнал оптико-акустического генератора частично отражается от верхней поверхности объекта контроля (ОК), а частично входит в ОК и распространяется в нем в виде продольной волны. Ультразвуковой сигнал, распространяющийся вглубь ОК, доходит до противоположной стороны ОК, отражается и регистрируется приемным преобразователем. Кроме того, при распространении в материале ОК сигнал претерпевает рассеяние на неоднородностях структуры. Часть этого сигнала, рассеянная в обратном направлении, попадает на приемник и тоже регистрируется с некоторой временной задержкой относительно поступления эталонного сигнала. Время поступления рассеянной волны соответствует определенной глубине залегания структурных неоднородностей в ОК (преимущественно пор). Частотный спектр акустических импульсов (спектральный диапазон 1–10 МГц), рассеянных назад всей толщиной контролируемой конструкции, несет информацию о неоднородностях структуры в целом, что позволяет проводить контроль готовых деталей и конструкций из углепластиков с целью диагностирования их свойств при одностороннем доступе.

Спектр акустического сигнала, рассеянного на неоднородностях структуры, состоит из регулярной (гладкой) и нерегулярной (шумовой) компонент. Гладкая часть определяется спектральной чувствительностью пьезоприемника в акустическом преобразователе и может быть определена сглаживанием реального спектра сигнала. Нерегулярная часть (так же, как и во временной форме акустического сигнала) определяется рассеянием на неоднородностях структуры композита (в первую очередь, порах), и ее полная энергия может служить характеристикой пористости среды.

В ВИАМ разработана методика определения пористости ПКМ лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля [13–15]. В качестве

параметра диагностики пористости материала использована полная нормированная энергия шумовой компоненты:

$$W_{\text{H}} = \frac{\int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} [S(f) - S_0(f)]^2 df}{\int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} S_0^2(f) df}, \quad (1)$$

где $S(f)$ – спектр импульсов, рассеянных структурой в обратном направлении; $S_0(f)$ – спектр зондирующего импульса; f – частота ультразвуковых колебаний; f_{min} и f_{max} – граничные частоты спектрального диапазона.

На рис. 2 приведен спектр акустического сигнала в образце с большим содержанием пор. Видно, что реальный спектр сигнала отличается характерными осцилляциями, определяемыми структурными шумами, связанными с наличием пор. Гладкая кривая получена путем аппроксимации экспериментального спектра.

Нормированная энергия шумовой компоненты рассеянного назад акустического сигнала наилучшим образом коррелирует с пористостью материала, и именно поэтому данная характеристика была выбрана в качестве параметра диагностики. Пористость углепластика определяется по ранее установленной корреляционной связи объемного содержания пор $V_{\text{п}}$ с нормированной величиной энергии W_{H} структурного шума:

$$V_{\text{п}} = \varphi(W). \quad (2)$$

На рис. 3 показана зависимость энергии шумовой компоненты акустического сигнала, рассеянного в обратном направлении, от объемной

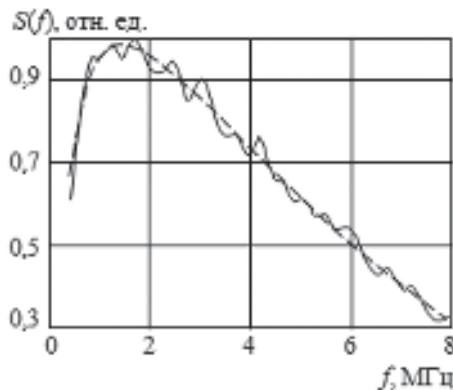


Рис. 2. Амплитудный спектр акустического сигнала ($S(f)$ – спектр импульсов, рассеянных структурой в обратном направлении; f – частота УЗ колебаний) на участке 4 (см. рис. 1) в пористом образце из углепластика: — реальный спектр; --- сглаженная кривая

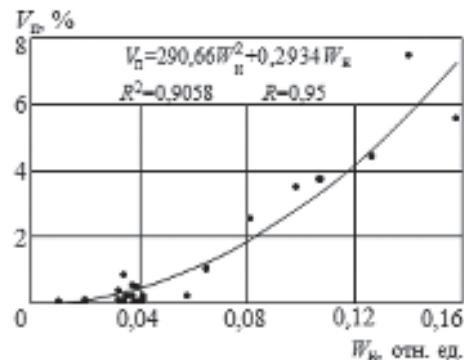


Рис. 3. Связь объемного содержания пор $V_{\text{п}}$ в углепластике ВКУ-17КЭ0,1 с энергией структурного шума W_{H}

пористости материала. Между пористостью материала и энергией шумовой компоненты существует довольно тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции $R = 0,95$), что и позволяет использовать энергию шумовой компоненты в качестве параметра диагностики, определяемого при неразрушающих испытаниях деталей и конструкций из углепластиков. Связь объемной пористости материала с энергией структурного шума определяется выражением $V_{\Pi} = 290,66 W_{\Pi}^2 + 0,2934 W_{\Pi}$.

Энергия структурного шума в дефектной области углепластика может на порядок превосходить энергию в бездефектной области. Поэтому производить корректную диагностику пористости в дефектных участках углепластика не представляется возможным. Следовательно, диагностику углепластика можно проводить только на тех деталях и конструкциях, которые успешно прошли дефектоскопический контроль, т.е. не имеют дефектов.

Таким образом, получена взаимосвязь пористости с энергией структурного шума в углепластике с различным содержанием матрицы, что позволяет по измеренным значениям энергии структурного шума определять пористость и, что особенно важно, низкие ее значения (до десятых долей процента).

Энергия структурного шума W_{Π} определяется для предварительной оценки пористости материала. Если пористость находится в интервале 0–1%, то можно переходить к определению содержания армирующего волокна в углепластике и плотности углепластика в соответствии с установленными корреляционными связями. При пористости материала >1% возрастает погрешность определения объемного содержания армирующего волокна в углепластике и плотности углепластика, так как возрастающее количество пор в материале все больше и больше влияет на результаты определения параметра диагностики. При пористости материала >2% определение содержания волокна и плотности углепластика по предложенной методике становится некорректным.

Содержание волокна в углепластике определяется по установленной корреляционной связи массового содержания волокна с основным параметром диагностики:

$$M_{\text{в}} = \varphi_1(c), \quad (3)$$

а плотность углепластика (ρ) определяется при пористости материала не более 1% по установленной корреляционной связи плотности материала с тем же параметром диагностики:

$$\rho = \varphi_2(c). \quad (4)$$

Основной параметр диагностики – скорость прохождения УЗ колебаний (c) – в углепластике определяется программным способом по времени Δt прохождения сигнала и толщине h стенки ОК:

$$c = 2h/\Delta t. \quad (5)$$

Толщина h стенки конструкции из углепластика в зоне контроля определяется измерительными инструментами, ультразвуковыми толщиномерами или по чертежу данной конструкции.

Рассмотрим пример изменения основного параметра диагностики – скорости импульсов УЗ колебаний (c) – при изменении содержания наполнителя в углепластике при постоянной пористости материала. При увеличении содержания наполнителя скорость импульсов будет возрастать, так как ультразвуковой сигнал большую часть пути будет проходить через материал, в котором скорость распространения ультразвука выше. При малой пористости материала (до 1% по объему) увеличение содержания наполнителя приведет к увеличению плотности материала и, соответственно, к увеличению скорости импульсов УЗ колебаний (c).

На рис. 4, а представлена корреляционная связь скорости УЗ колебаний (c) с массовым содержанием углеродного волокна в углепластике, построенная для образцов с низкой пористостью материала, а на рис. 4, б – корреляционная связь скорости УЗ колебаний (c) с плотностью углепластика.

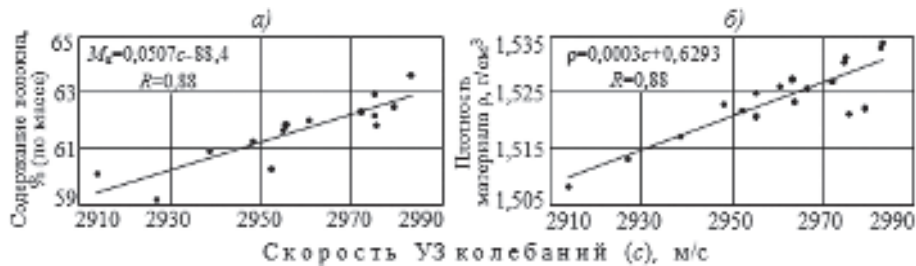


Рис. 4. Корреляционная связь скорости УЗ колебаний (c) с массовым содержанием углеродного волокна M_B (а) и плотностью ρ (б) углепластика ВКУ-17КЭ0,1

Получены следующие уравнения регрессии и коэффициенты корреляции для образцов с низкой пористостью $V_{II} = 0-1\%$:

– для корреляционной связи скорости УЗ колебаний (c) с массовым содержанием волокна M_B :

$$M_B = 0,0507c - 88,4, \quad (6)$$

коэффициент корреляции $R = 0,88$;

– для корреляционной связи скорости УЗ колебаний (c) с плотностью материала

$$\rho = 0,0003c + 0,6293, \quad (7)$$

коэффициент корреляции $R = 0,88$.

Относительная погрешность определения неразрушающим методом:

– пористости углепластика – не более $\pm 10\%$ (например, погрешность в абсолютных величинах для пористости 1% не превышает $\pm 0,1\%$, т.е. результат определения пористости находится в интервале 0,9–1,1%);

– плотности углепластика – не более $\pm 1\%$ (например, погрешность в абсолютных величинах для плотности 1500 кг/м^3 не превышает $\pm 15 \text{ кг/м}^3$, т.е. результат определения плотности находится в интервале $1485-1515 \text{ кг/м}^3$);

– содержания волокна в углепластике по массе – не более $\pm 4\%$ (например, погрешность в абсолютных величинах при массовом содер-

жании волокон 60% составляет не более $\pm 2,4\%$, т.е. результат определения объемного содержания волокна находится в интервале 57,6–62,4%).

При внедрении углепластиков в крупногабаритные интегральные конструкции возникла необходимость предварительной подпрессовки деталей с использованием нагрева материала, при этом происходит некоторая полимеризация связующего. Превышение степени отверждения подпрессованных заготовок допустимой величины приводит к снижению прочности соединения элементов интегральной конструкции.

Для оценки степени полимеризации матрицы углепластика [16, 17] определяется основной параметр диагностики – объединенный параметр b_1 , равный произведению ослабления сигнала A_0/A_1 и времени Δt его прохождения через контролируемый материал в направлении его толщины:

$$b_1 = (A_0/A_1)\Delta t, \quad (8)$$

где A_0 – амплитуда импульса, отраженного от верхней поверхности ОК, мВ; A_1 – амплитуда первого донного импульса, т.е. амплитуда сигнала, отраженного от противоположной поверхности стенки ОК, мВ; Δt – время прохождения сигнала по толщине ОК, мкс:

$$t = (t_1 - t_0)/2, \quad (9)$$

где t_1 – время индикации первого донного импульса, мкс; t_0 – время индикации импульса, отраженного от верхней поверхности ОК, мкс.

Параметр диагностики b_1 вычисляется программным способом по результатам определения первичных параметров диагностики (A_0/A_1 , Δt) в процессе неразрушающих испытаний.

Эксперименты подтверждают правильность выбора такого параметра. Так, при увеличении степени отверждения материала оба сомножителя уменьшаются, а при уменьшении – увеличиваются, т.е. изменяются в одну сторону, а их произведение усиливает эти изменения.

Степень полимеризации β матрицы в ОК из углепластика ВКУ-17КЭ0,1 определяется по графику, построенному по установленной корреляционной связи основного параметра b_1 со степенью полимеризации β матрицы при пористости материала $V_n \leq 1\%$, или по уравнению этой связи:

$$\beta = \varphi(b_1). \quad (10)$$

Фактором, ограничивающим возможности способа контроля при определении степени полимеризации β матрицы по вышеупомянутому параметру, является пористость, которая влияет на зависимость $b_1 = \varphi(\beta)$. Для учета пористости материала необходимо определять величину нормированной энергии W_n структурного шума.

Корреляционную связь степени конверсии реакционноспособных групп в матрице ПКМ можно записать в виде:

$$\beta = \varphi(b_1, W_n). \quad (11)$$

На рис. 5 представлена корреляционная связь параметра диагностики b_1 со степенью полимеризации матрицы углепластика ВКУ-17КЭ0,1,

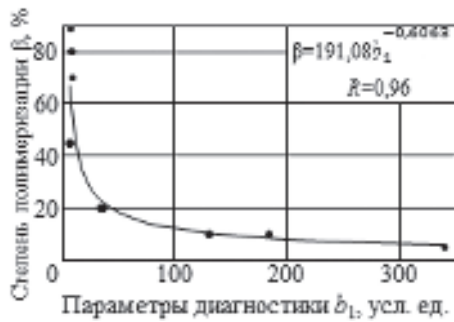


Рис. 5. Корреляционная связь параметра диагностики (b_1) со степенью полимеризации (β) матрицы углепластика

материала – скорость и затухание УЗ колебаний, называемые параметрами диагностики, так как эти параметры могут быть определены в процессе неразрушающих испытаний конструкции. Механические характеристики углепластика определяются по установленной корреляционной (статистической) связи их с параметрами диагностики.

Прочностные свойства углепластика в конструкции определяются по установленной корреляционной связи объединенного параметра b_2 диагностики с прочностью материала при межслоевом сдвиге

$$\tau_{\text{сдв}} = \varphi_1(b_2) \quad (13)$$

и при сжатии

$$\sigma_{\text{сж}} = \varphi_2(b_2), \quad (14)$$

где b_2 – объединенный параметр диагностики, равный отношению коэффициента k ко времени Δt его прохождения в направлении толщины стенки конструкции.

Коэффициент k определяется программным способом по амплитудным характеристикам сигналов и является величиной, обратной затуханию сигнала в материале при его прохождении по толщине ОК. Программа определяет коэффициент k как

$$k = A_1/A, \quad (15)$$

где A_1 – амплитуда донного сигнала, т.е. амплитуда сигнала, отраженного от противоположной поверхности стенки ОК; A – амплитуда сигнала, вошедшего в объект контроля ОК.

Объединенный параметр b_2 диагностики рассчитывается программным способом по первичным параметрам диагностики:

$$b_2 = k/\Delta t = A_1/(A\Delta t), \quad (16)$$

где Δt – время прохождения сигнала по толщине стенки конструкции.

построенная для образцов с низкой пористостью материала. Получено следующее уравнение регрессии и коэффициент корреляции:

$$\beta = 191,08 b_1^{-0,6063}, \quad (12)$$

$$R = 0,96.$$

Механические, так же как и физические, характеристики углепластика определяются в основном соответствующими характеристиками компонентов, их соотношением, пористостью материала. Этими факторами определяются и основные акустические характеристики

В данной работе используется лазерное возбуждение упругих колебаний в объекте контроля, что позволяет получить очень короткий импульс (длительность импульса не более 0,05 мкс), что дает существенные преимущества при спектральном анализе, так как в объекте контроля формируется акустический сигнал с очень широким спектром (в диапазоне 0,1–10,0 МГц).

Рассмотрим пример изменения объединенного параметра b диагностики при изменении прочностных характеристик углепластика при постоянной и минимальной пористости материала. При увеличении прочности материала величина A_1/A будет возрастать, а время Δt прохождения сигнала по толщине стенки конструкции будет уменьшаться. В результате объединенный параметр диагностики будет увеличиваться. При уменьшении прочности материала величина A_1/A будет уменьшаться, а время Δt прохождения сигнала по толщине стенки конструкции будет возрастать. В результате объединенный параметр диагностики будет уменьшаться.

В процессе выполнения работы установлены корреляционные связи основного параметра диагностики с прочностью при сдвиге и сжатии углепластика. Проведена компьютерная обработка экспериментальных данных с целью установления степени взаимозависимости корреляционных связей параметра диагностики с прочностью при сдвиге и сжатии углепластика, и построены графики связи объединенного параметра b_2 , определенного с помощью прибора УДЛ-2М, с прочностью при сдвиге и сжатии углепластика, определенных разрушающим методом (пористость материала <1%).

На рис. 6, а представлена корреляционная связь параметра диагностики b_2 с прочностью при сдвиге углепластика, построенная для образцов с низкой пористостью материала (<1%), а на рис. 6, б представлена корреляционная связь параметра диагностики b_2 с прочностью при сдвиге углепластика, также построенная для образцов с низкой пористостью материала.

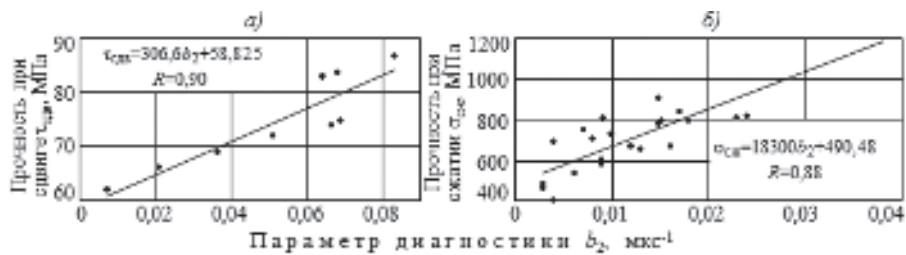


Рис. 6. Корреляционная связь объединенного параметра диагностики (b_2) с прочностью при сдвиге $\tau_{сдв}$ (а) и сжатии $\sigma_{сж}$ (б) углепластика ВКУ-17КЭ0,1

Получены следующие уравнения регрессии и коэффициенты корреляции для образцов с низкой пористостью ($V_{п}$ – от 0 до 1%):

– для корреляционной связи параметра диагностики b_2 с прочностью при сдвиге углепластика:

$$\tau_{сдв} = 306,6b_2 + 58,825, \quad (17)$$

коэффициент корреляции $R = 0,90$;

– для корреляционной связи параметра диагностики b_2 с прочностью при сжатии углепластика:

$$\sigma_{сж} = 18300b_2 + 490,48, \quad (18)$$

коэффициент корреляции $R = 0,88$.

Погрешность метода при определении прочности углепластика при сдвиге и сжатии не превышает $\pm 8\%$.

Таким образом, в диагностике ПКМ реализован новый подход к решению задач, основанный на лазерном возбуждении ультразвука в контролируемой конструкции и спектральном анализе импульсов ультразвуковых колебаний, прошедших в объекте испытаний и несущих информацию о структуре и физико-механических свойствах ПКМ. Использование лазерного возбуждения упругих колебаний дает возможность получать очень короткие импульсы с широким спектром и проводить анализ затухания ультразвука в достаточно широкой полосе частот, что позволяет повысить точность и достоверность диагностики структуры и свойств ПКМ неразрушающим методом.

В результате проведенных в ВИАМ исследований разработаны технологии контроля и выпущены методические материалы, технологические рекомендации и производственные инструкции по определению пористости, плотности, содержания волокна и матрицы в углепластике, прочности при межслоевом сдвиге и сжатии однонаправленных углепластиков, степени полимеризации матрицы на различных этапах изготовления интегральных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение. 2006. 864 с.
2. Nondestructive Testing Handbook. 2-nd ed. V. 7. Ultrasonic Testing. American Society for Nondestructive Testing. 1991. 893 p.
3. *Latishenko V.A., Matiss J.G., Sandalov A.V.* Diagnostics of load carrying capacity of composite structures / 10th World Conference on Non-Destructive Testing. – Moscow. 1982. Rep. 5–3.
4. *Гершберг М.В., Илюшин С.В., Смирнов В.И.* Неразрушающие методы контроля судостроительных стеклопластиков. Л.: Судостроение. 1971. С. 124, 179.
5. *Мурашов В.В., Румянцев А.Ф.* Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 5. С. 31–36, 41–42.
6. *Мурашов В.В., Румянцев А.Ф.* Диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами / В сб.: Авиационные материалы. Избранные труды. М.: ВИАМ. 2007. С. 342–347.
7. *Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A.* Diagnostics of polymer composites by acoustic methods // Ultrasound. 2006. № 2 (59). P. 7–10.
8. Способ определения физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов в конструкциях ультразвуковым методом: Пат. 2196982 Рос. Федерация. Опубл. 20.01.2003. Бюл. № 2.

9. Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления: Пат. 2214590 Рос. Федерация. Опубл. 20.10.2003. Бюл. № 29.

10. *Карabutov A.A., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б., Резников А.В.* Применение ND:YAG-лазера с диодной накачкой в неразрушающем ультразвуковом контроле графито-эпоксидных композитов // Контроль. Диагностика. 2002. № 11. С. 24–29.

11. *Карabutov A.A., Мурашов В.В., Подымова Н.Б.* Диагностика слоистых композитов с помощью лазерного оптико-акустического преобразователя // Механика композитных материалов. 1999. Т. 35. № 1. С. 125–134.

12. *Karabutov A.A., Murashov V.V., Oraevsky A.A., Podymova N.B.* Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor / Conf.: Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II. San Antonio 1998 // The International Society for Optical Engineering. 1998. V. 3396. P. 103–111.

13. *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.

14. *Мурашов В.В., Румянцев А.Ф.* Определение пористости углепластиков лазерно-акустическим способом в авиационных конструкциях / В сб. докл. НТК: Гидроавиасалон-2008. М.: ЦАГИ. 2008. Ч. I. С. 287–291.

15. *Мурашов В.В., Румянцев А.Ф.* Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях // Контроль. Диагностика. 2008. № 8. С. 13–17.

16. *Мурашов В.В., Румянцев А.Ф., Алексакин В.М.* Определение степени полимеризации матрицы композиционного материала в заготовках и конструкциях ультразвуковым методом / В сб.: Неразрушающий контроль и техническая диагностика при производстве и эксплуатации авиационной и космической техники: Труды первой Всерос. науч.-техн. конф. С-Пб. 2005. Доклад 1.7. (на CD-диске).

17. Способ определения степени полимеризации композиционных материалов: Пат. 2231054 Рос. Федерация. Опубл. 20.06.2004. Бюл. № 17.