



УДК 678.01:620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-11-11

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ
МЕТОДИК И СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩИХ
ЛАБОРАТОРНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЭКСПРЕСС-
КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ ПОЛУФАБРИКАТОВ И
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ НА ОСНОВНЫХ ЭТАПАХ ИХ
ПРОИЗВОДСТВА**

В.И. Постнов

доктор технических наук

О.Л. Бурхан

Октябрь 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

В.И. Постнов¹, О.Л. Бурхан¹

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДИК И СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩИХ ЛАБОРАТОРНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ ПОЛУФАБРИКАТОВ И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ НА ОСНОВНЫХ ЭТАПАХ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Статья посвящена актуальной проблеме разработки и внедрения на авиационных предприятиях комплекса альтернативных существующим и дополняющим их методик и средств неразрушающего экспресс-контроля свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) при изготовлении препрегов, конструкций и агрегатов из ПКМ на основных этапах их производства для повышения их надежности и увеличения срока службы. Уделено значительное внимание современной проблеме автоматизации технологического и лабораторного экспресс-контроля свойств ПКМ. Автоматизация процесса контроля на всех этапах позволит своевременно управлять параметрами технологических процессов как на этапе изготовления полуфабрикатов, так и на стадии формования конструкций из ПКМ. Кратко изложены методики контроля динамических свойств ПКМ на основных этапах всей производственной цепи изготовления конструкций из ПКМ. Приводятся основные принципы разработки средств контроля. Даны теоретические основы методик контроля. Приведен общий вид разработанных действующих внедренных в производственный цикл образцов средств контроля.

Применение всего комплекса методик и средств позволит получать конструкции из ПКМ с заданными, прогнозируемыми и повторяемыми физико-механическими свойствами, увеличить выход годных полуфабрикатов, агрегатов и конструкций из ПКМ и в конечном счете – повысить качество и надежность авиационной техники отечественного производства.

Ключевые слова: *методики и средства неразрушающего контроля ПКМ, рентгенометрический контроль содержания связующего, препрег, вязкость связующего, формование деталей из ПКМ, ультразвук, акустический контроль.*

DEVELOPMENT OF A SET OF ALTERNATIVE METHODS OF EXPRESS LABORATORY AND PROCESS NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF PROPERTIES OF SEMI-FINISHED AND STRUCTURES OF THE PCM ON MAIN STAGES OF THEIR PRODUCTION

The article is devoted to the actual problem of development and implementation in the aviation enterprises the complex of alternative to existing and complementing them methods and means of nondestructive express-control of properties of polymeric composite materials (PCM) in the manufacture of prepregs, structures and components of the FRP at key stages of their production to improve their reliability and increase life-time. It is paid much attention to the problem of modern automation technology and laboratory express-control of properties of the PCM. Automation of control process at all stages will allow to manage timely the process parameters as during the semi-finished products manufacture, so at the stage of forming structures of the PCM. Control procedures of the dynamic properties of PCM at key stages throughout the production chain of manufacturing structures of the PCM are summarized. The basic principles for the development of controls are given. The theoretical foundations of methods of control are provided. An overall view of existing developed embedded in the production cycle samples of control means is represented.

The use of the whole complex of methods and tools will allow receiving the design of the PCM with predetermined, predictable and repeatable physical and mechanical properties, increase yield semi-finished products, components and structures of the FRP and ultimately - improving the quality and reliability of aviation equipment of domestic production.

Keywords: *techniques and means of not destroying control PCM, radiometric control of the content of the binder, prepreg, viscosity связующего, formation of details from PKM, ultrasound, the acoustic control.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Повышение качества агрегатов и конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), увеличение их производства [1–3], срока службы должны быть тесно связаны с повышением точности контроля параметров технологических процессов

изготовления как полуфабрикатов, так и конструктивных элементов из ПКМ. Кроме этого, необходим комплексный подход к решению задач контроля.

Целью работы является анализ разработки и внедрения комплекса альтернативных существующим и дополняющих их методик и средств неразрушающих лабораторного и технологического экспресс-контроля свойств ПКМ при изготовлении полуфабрикатов и конструкций из ПКМ на основных этапах производства авиационных конструкций для повышения их надежности, увеличения выхода годных полуфабрикатов, конструкций и агрегатов и увеличения срока их службы.

Материалы и методы

Основные направления лабораторных и технологических средств контроля процесса изготовления препрега и деталей из ПКМ

К основным направлениям неразрушающего контроля ПКМ относятся:

- непрерывный неразрушающий контроль содержания связующего в препрегах в процессе пропитки – рентгенометрическим методом;
- непрерывный неразрушающий контроль кинетики отверждения пластиков в процессе формования – ультразвуковым методом;
- неразрушающий экспресс-контроль содержания связующего в пластиках – рентгенометрическим методом;
- неразрушающий контроль температуры стеклования деталей из ПКМ;
- неразрушающий контроль упругих и прочностных свойств пластиков – акустическим методом.



Рисунок 1. Основные направления контроля ПКМ, лабораторные и технологические средства контроля

Основные направления контроля ПКМ с применением нетрадиционных методик и средств контроля представлены на рис. 1.

Методические основы и средства рентгенометрического контроля содержания связующего в препрегах

Многолетний опыт применения различных методик и средств неразрушающего оперативного технологического контроля содержания связующего в препреге при его производстве показал, что наиболее универсальным, точным и приемлемым для практической реализации при оперативном контроле является рентгенометрический метод. Его экологическая безопасность обеспечивается применением низкоэнергетического рентгеновского излучения [4, 5].

Структурная схема технологической рентгенометрической установки по изменению массового процентного содержания связующего в препреге в процессе его изготовления приведена на рис. 2.

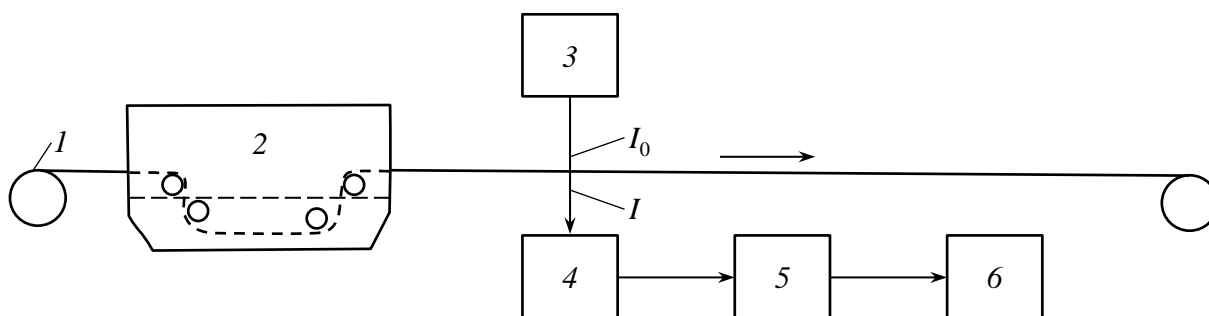


Рисунок 2. Структурная схема технологической установки для измерения содержания связующего в препрегах рентгенометрическим методом: 1 – волокнистый наполнитель; 2 – пропитывающая ванная; 3 – источник рентгеновского излучения; 4 – блок детектирования; 5 – блок обработки первичной измерительной информации; 6 – компьютер со средствами регистрации

В основу методики положен принцип измерения поглощения энергии узконаправленного «мягкого» рентгеновского луча, проходящего через препрег:

$$I = I_0 \exp[-(\mu_n m_n + \mu_c m_c)],$$

где I , I_0 – интенсивности ослабленного препрегом и исходного излучений; m_n , m_c – удельные поверхностные массы наполнителя и связующего; μ_n , μ_c – массовые коэффициенты ослабления излучения для наполнителя и связующего, определяемые при заданном излучении химическим составом вещества.

Массовое процентное содержание связующего C , измеренное непосредственно в процессе пропитки углеренты на пропиточной машине при различных режимах пропитки описывается следующим выражением:

$$C = -78,1 \cdot \ln(I/I_0) + 0,3.$$

Общий вид рентгенометрической установки «Измеритель содержания связующего» ИСС1004М, разработанный в ВИАМ, представлен на рис. 3.



Рисунок 3. Общий вид рентгенометрической установки ИСС1004М

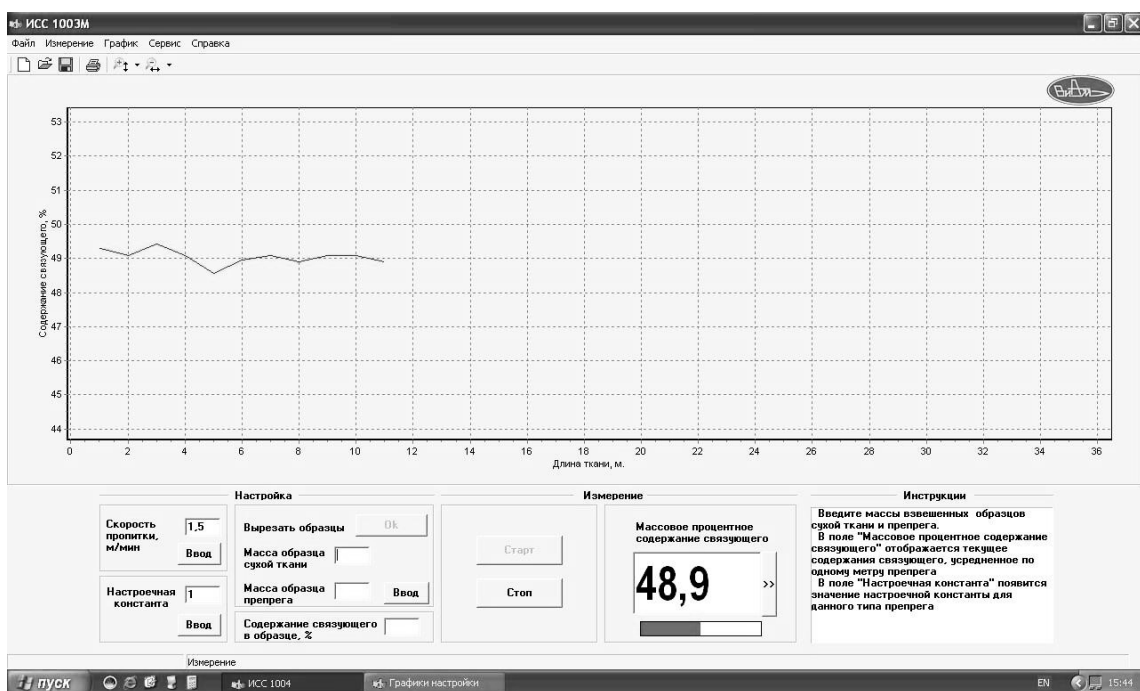


Рисунок 4. График и цифровое текущее значение процентного содержания связующего в препреге в процессе пропитки по длине препрега

На рис. 4 показан вывод на экран монитора компьютера графика измерения текущего значения массового процентного содержания связующего в препреге по длине пропитываемого наполнителя.

Физические основы взаимосвязи изменения вязкостных характеристик связующего со скоростью и коэффициентом поглощения акустических волн в ПКМ во время его формирования

Следующим важнейшим этапом изготовления конструкций из ПКМ является процесс формирования конструкций.

При термическом формировании конструкций из ПКМ происходит изменение вязкости связующего до его затвердевания. Изменение вязкостных характеристик связующего в ПКМ можно определить с помощью относительного поглощения акустических волн, проходящих через материал. Выражения для определения скорости и коэффициента поглощения для полимеров имеют вид:

$$\frac{1}{\rho \cdot c^2} = \frac{1}{E_d} + \int_0^{\infty} \frac{L_{\tau} \cdot d\tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2};$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \rho \cdot \omega \cdot c \int_0^{\infty} \frac{L_{\tau} \cdot \omega \cdot \tau \cdot d\tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2},$$

где L_τ – плотность спектра релаксаций; c – скорость ультразвука; α – коэффициент поглощения; E_d – динамический модуль упругости полимерной цепи; ρ – плотность полимера.

Связь упругих свойств среды и скорости ультразвука с учетом наличия объемной вязкости определяется выражением

$$E_{об} + \frac{4}{3}G = \rho \cdot c^2 \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\omega} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{\alpha}{\omega} \right)^2 \right],$$

где $E_{об}$ – модуль объемной упругости, равный отношению нормального напряжения к объемному сжатию; $G = G' + iG'' = i\omega(\eta' - i\eta'')$ – комплексная величина модуля сдвига; G' , η' – первая производная динамического модуля сдвига и вязкости; G'' , η'' – вторая производная динамического модуля сдвига и вязкости.

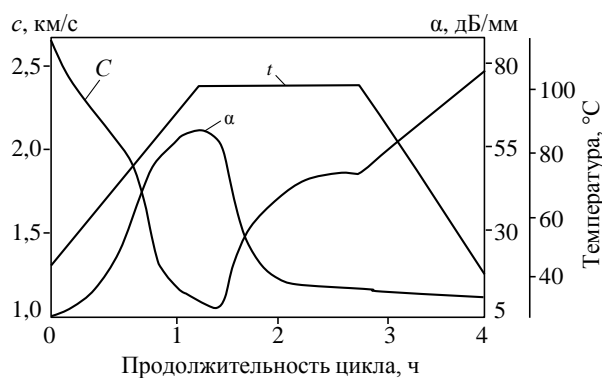


Рисунок 5. Изменение скорости c и затухания α акустической волны во времени за полный цикл формования ПКМ (t – график нагрева ПКМ)



Рисунок 6. Лабораторная установка ИПФ-2003 для измерения параметров формования ПКМ

На рис. 5 показаны изменение скорости c и затухания α акустической волны в ПКМ за время формования. Верхняя точка графика α указывает на полное размягчение связующего и начало гелеобразования. И при выходе графика на прямую линию процесс отверждения ПКМ завершается. Ультразвуковая лабораторная установка «Измеритель параметров формования» ИПФ-2003 [6–8] по формованию монолитных образцов из ПКМ диаметром 15 мм, разработанная в ВИАМ, показана на рис. 6. Установка позволяет проводить весь цикл процесса формования различных ПКМ с полным ультразвуковым или диэлектрическим контролем динамики параметров формируемого ПКМ с незначительным расходом препрега. Применение лабораторной установки ИПФ-2003 целесообразно для предварительной отработки технологического процесса формования крупногабаритных конструкций из ПКМ.

Измерение массового содержания связующего в армированных пластиках

Для определения качества отформованной конструкции из ПКМ часто возникает необходимость измерения содержания связующего в готовом пластике.

Массовое содержание связующего C в армированных пластиках определяется по измеренным интенсивностям излучения, прошедшего сквозь пластик $J_{пл}$ и прошедшего сквозь пакет из непропитанного наполнителя J_n исследуемого пластика, имеющего такое же количество слоев, что и исходный образец пластика. Значение C определяется из выражения

$$C = \frac{100}{1 + \frac{\mu_c}{\mu_n} \frac{\ln \frac{J_0}{J_n}}{\ln \left(\frac{J_0}{J_{пл}} \right) - \ln \left(\frac{J_0}{J_n} \right)}},$$

где J_n , $J_{пл}$, J_0 – интенсивности ослабленного излучения от наполнителя и пластика и интенсивность исходного излучения; m_n , m_c – удельные поверхностные массы наполнителя и связующего; μ_n , μ_c – массовые коэффициенты ослабления излучения для наполнителя и связующего, определяемые при заданном излучении химическим составом вещества.

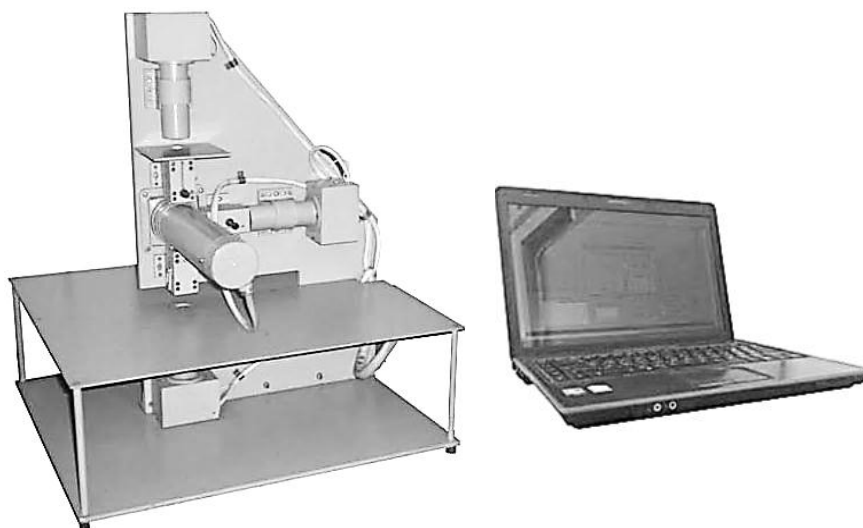


Рисунок 7. Установка ИСС4001 для измерения массового содержания связующего в армированных пластиках

Установка ИСС4001 для измерения массового содержания связующего в армированных пластиках, разработанная в ВИАМ, представлена на рис. 7.

Методы определения температуры стеклования пластиков

Температуру стеклования можно определять по изменению различных физических свойств полимера в зависимости от температуры. При этом, принимая во внимание релаксационный характер процесса стеклования, необходимо учитывать временной фактор (скорость нагревания или охлаждения, продолжительность действия силы и т. д.). При достаточно медленном охлаждении или достаточно большой продолжительности воздействия силы значения температур стеклования для одного и того же полимера, полученные разными методами, обычно совпадают.

Наибольшее распространение получили методы исследования следующих свойств:

- удельного объема (дилатометрический метод);
- теплоемкости;
- модуля упругости (дифференциальный механический анализ).

Дилатометрический метод и метод дифференциального механического анализа являются высокоточными лабораторными методами. Для экспресс-измерения температуры стеклования тонкостенных пластиков была разработана [9] и изготовлена переносная компьютеризированная установка (рис. 8).

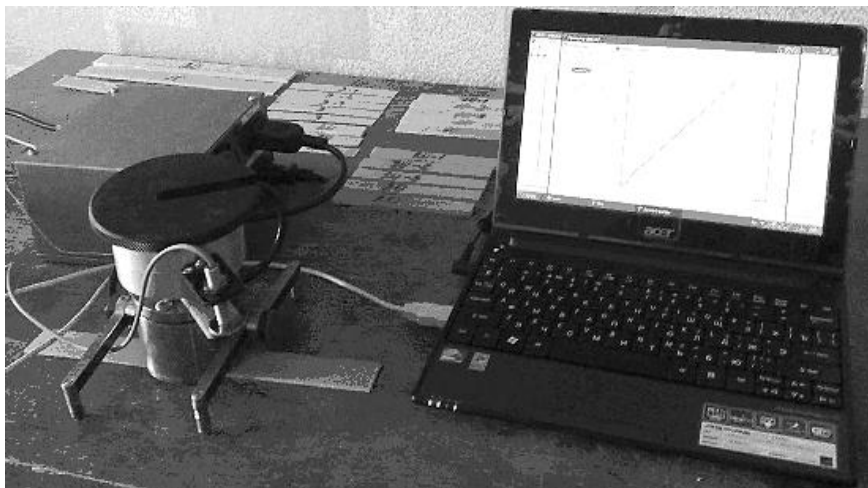


Рисунок 8. Переносная компьютеризованная установка для измерения температуры стеклования пластиков

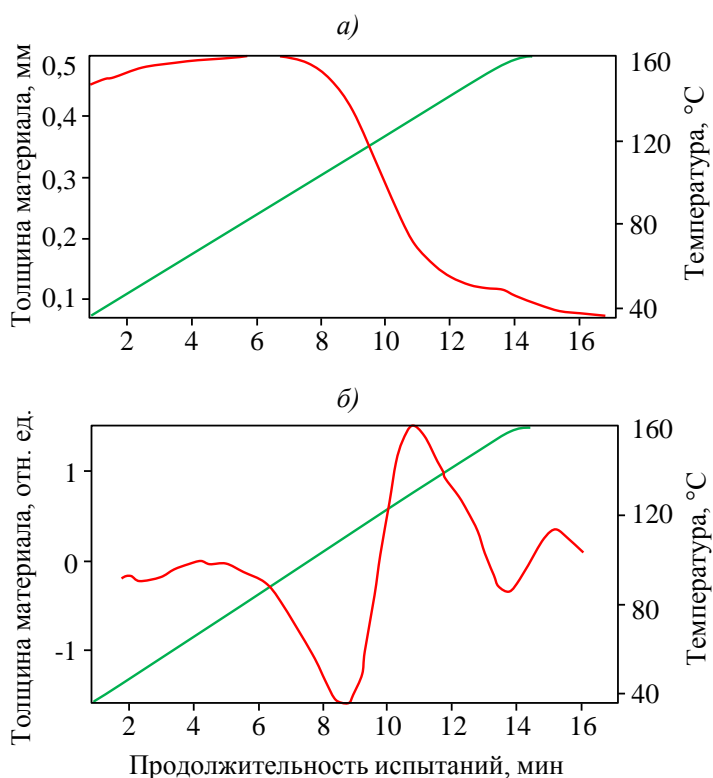


Рисунок 9. Кривая изменения толщины (—) ПКМ под индентором в локальном месте нагрева (а) и кривая перехода через нулевое значение второй производной, определяющей температуру стеклования (—) (б)

Оснастка установки перед измерением может быть установлена на поверхность пластиковой конструкции одинарной кривизны с радиусом изгиба $>0,5$ м. Локальный нагрев ведется по заданной программе от компьютера. Кривая изменения толщины ПКМ под индентором установки в локальном месте нагрева показана на рис. 9, а. Наклонная прямая показывает график нагрева поверхности. Переход через нулевое значение второй производной определяет температуру стеклования 121°C (рис. 9, б).

**Методика акустического контроля модуля упругости
армированных пластиков**

Для проведения-экспресс контроля упруго-прочностных свойств ПКМ в конструкциях в ВИАМ разработана методика и изготовлена установка по акустическому контролю модуля упругости армированных пластиков.

Метод основан на возбуждении в образце пластика собственных акустических колебаний. Динамический модуль упругости первого рода и логарифмический декремент затухания определяются по формулам

$$E_{и} = 0,9464 \cdot \frac{\rho l^4}{h^2 T^2}; \quad \delta = \frac{1}{N_{\epsilon}},$$

где $E_{и}$ – динамический модуль упругости изгиба первого рода; δ – логарифмический декремент затухания; ρ , l , h – плотность, длина и толщина материала соответственно; T – период собственных изгибных колебаний; N_{ϵ} – число колебаний, за которое амплитуда уменьшается в 2,72 раза.

Для многослойных пластиков формула приобретает следующий вид:

$$E = k \cdot E_{и}; \quad k = \frac{n^2}{12 \left[\sum_{i=1}^n \epsilon_i i^2 / \sum_{i=1}^n \epsilon_i - \left(\sum_{i=1}^n \epsilon_i i / \sum_{i=1}^n \epsilon_i \right)^2 \right] + 1},$$

где E – модуль упругости при растяжении; k – коэффициент корреляции; n – общее количество слоев в образце; i – порядковый номер слоя; ϵ_i – относительные модули упругости отдельных слоев вдоль оси образца по отношению к модулю упругости вдоль основы наполнителя.

Статистическая взаимосвязь статического модуля упругости E и предела прочности при растяжении $\sigma_{в}$ с динамическим модулем упругости изгиба $E_{и}$ для образцов-свидетелей деталей, изготовленных при формовании конструкции из ПКМ, имеет вид

$$E = 1,09 \cdot k \cdot E_{и} + 3,4; \quad \sigma_{в} = 6,22 \cdot 10^{-3} \cdot k \cdot E_{и}$$

с коэффициентами корреляции соответственно 0,99 и 0,96.

Статические параметры определяются нормативными документами для каждого вида пластиков.

Ультразвуковая автоматизированная установка «Измеритель модуля динамического» ИМД-3002, разработанная в ВИАМ, представлена на рис. 10.

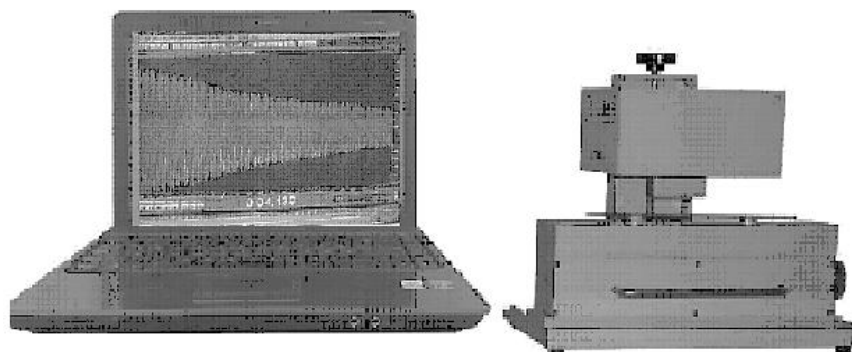


Рисунок 10. Установка ИМД-3002 для измерения динамического модуля упругости

Здесь собственные затухающие колебания в образце из ПКМ возбуждаются динамиком, расположенным над образцом, который управляется от компьютера. Компьютер регистрирует степень затухания амплитуды собственных колебаний и производит расчет динамического модуля и логарифмического декремента затухания, по которым производится расчет статических прочностных параметров ПКМ.

Результаты и обсуждение

Применение той или иной методики и средств контроля определяется производственными условиями на разных этапах изготовления полуфабрикатов и конструкций из ПКМ. Так, при изготовлении препрегов наиболее приемлемым является встроенный в производственный цикл технологический контроль (установка серии ИСС) для непрерывной пропитки наполнителя, так как прерывание процесса приводит к нарушению технологического режима.

Перед формованием крупногабаритных конструкций из ПКМ для исключения изготовления бракованного изделия из дорогостоящих материалов необходимо предварительное опробование всего цикла режима формования конкретного ПКМ. Для этого возможно такое опробование на образцах в автоклаве, печи или установке ИПФ-2003, на которой расходуется наименьшее количество ПКМ при отработке режима формования.

Предлагаемые методики контроля могут быть заменены альтернативными, например, рентгенометрическая методика – акустической, но для этого необходимо проведение исследований.

При комплексном подходе к созданию неразрушающего лабораторного и технологического контроля на основных этапах изготовления как полуфабрикатов, так и конструкций из ПКМ, решены следующие задачи:

– разработан и внедрен бесконтактный неразрушающий рентгенометрический метод сквозного просвечивания низкоэнергетическим рентгеновским излучением для измерения суммарного массового содержания связующего в препреге с погрешностью не более 1,5%;

– средства рентгенометрического метода эффективно использованы как для непрерывного контроля при нанесении связующего в препрегах, так и для экспресс-контроля содержания связующего в готовых пластиках в лабораторных условиях;

– наиболее эффективными для контроля параметров ПКМ в процессе формования изделий являются ультразвуковые методы, которые обладают наибольшей универсальностью и методической простотой, позволяя непосредственно определять с помощью известных соотношений вязко-упругие характеристики материала по измеренным значениям скорости распространения и коэффициента затухания ультразвука;

– ультразвуковые средства контроля встраиваются в технологические оснастки (формы) для осуществления непрерывного неразрушающего контроля параметров ПКМ на протяжении всего времени формования конструкций непосредственно в производственных условиях;

– разработана методика акустического контроля динамического модуля упругости пластиков, которая является универсальной и используется как экспресс-метод косвенной оценки прочностных характеристик ПКМ;

– разработана методика оценки температуры стеклования ПКМ с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$.

Заключение

Разработанный комплекс вышеуказанных методик и средств контроля значительно снижает риск нарушения технологических режимов на основных этапах производства, тем самым повышая выход годных полуфабрикатов и изделий из ПКМ, и в конечном счете – качество и надежность самолетных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
3. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов //Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.
4. Румянцев С.В., Кулиш Е.Е., Борисов О.И. Источники низкоэнергетического излучения в неразрушающем контроле. М.: Атомиздат. 1976. 128 с.
5. Никитин К.Е., Постнов В.И., Качура С.М., Рахматуллин А.Э., Бурхан О.Л. Компьютерная установка ИСС 1003М для непрерывного мониторинга содержания связующего в препрегах в процессе пропитки //Авиационные материалы и технологии 2009. №4. С. 21–23.
6. Постнов В.И., Бурхан О.Л., Петухов В.И. Автоматизированный метод измерения и управления технологическими параметрами формования изделий из ПКМ /В сб. статей «Инновации в машиностроении». Пенза. 2007. С. 202–204.
7. Постнов В.И., Никитин К.Е., Бурхан О.Л., Петухов В.И., Орзаев В.Г. Исследование ультразвуковым методом структурных изменений в ПКМ в процессе формования полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2009. №3. С. 25–29.
8. Никитин К.Е., Бурхан О.Л., Постнов В.И., Петухов В.И. Лабораторная установка для исследования и отработки режимов формования ИПФ2003 полимерных композиционных материалов ультразвуковым методом //Заводская лаборатория. 2008. №4. С. 38–40.
9. Постнов В.И., Бурхан О.Л., Рахматуллин А.Э., Качура С.М., Никитин Е.К. Методика неразрушающего контроля температуры стеклования в изделиях из ПКМ /В сб. трудов III Международной науч.-практич. конф. «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники». Ульяновск. 2012. С. 181.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and

- technologies of their processing for the period till 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
2. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovanija shestogo tehnologicheskogo uklada [Materials for the product «Buran» – innovative solutions of forming of the sixth technological way] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 3–9.
 3. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Jurkov G.Ju. Perspektivy ispol'zovanija uglerod-soderzhashhikh nanochastic v svjazujushhikh dlja polimernyh kompozicionnyh materialov [Perspectives of use of carbon-containing nanoparticles in binding for polymeric composite materials] //Rossijskie nanotehnologii. 2013. T. 8. №3–4. S. 24–42.
 4. Rumjancev S.V., Kulish E.E., Borisov O.I. Istochniki nizkoenergeticheskogo izluchenija v nerazrushajushhem kontrole [Sources of low-energy emission in non-destructive testing]. M.: Atomizdat. 1976. 128 s.
 5. Nikitin K.E., Postnov V.I., Kachura S.M., Rahmatullin A.Je., Burhan O.L. Komp'juternaja ustanovka ISS 1003M dlja nepreryvnogo monitoringa sodержanija svjazujushhego v pre-pregah v processe propitki [The ISS 1003M computer installation for continuous monitoring of the contents binding in prepregs in the course of impregnation] //Aviacionnye materialy i tehnologii 2009. №4. S. 21–23.
 6. Postnov V.I., Burhan O.L., Petuhov V.I. Avtomatizirovannyj metod izmerenija i upravlenija tehnologicheskimi parametrami formovanija izdelij iz PKM [The automated method of measurement and management of technological parameters of formation of products from PKM] /V sb. statej «Innovacii v mashinostroenii». Penza. 2007. S. 202–204.
 7. Postnov V.I., Nikitin K.E., Burhan O.L., Petuhov V.I., Orzaev V.G. Issledovanie ul'trazvukovym metodom strukturnyh izmenenij v PKM v processe formovanija polimernyh kompozicionnyh materialov [Research by ultrasonic method of structural changes in PKM in the course of formation of polymeric composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2009. №3. S. 25–29.
 8. Nikitin K.E., Burhan O.L., Postnov V.I., Petuhov V.I. Laboratornaja ustanovka dlja issledovanija i otrabotki rezhimov formovanija IPF2003 polimernyh kompozicionnyh materialov ul'trazvukovym metodom [Laboratory installation for research and working off of modes of formation ИПФ2003 of polymeric composite materials by ultrasonic method] //Zavodskaja laboratorija. 2008. №4. S. 38–40.
 9. Postnov V.I., Burhan O.L., Rahmatullin A.Je., Kachura S.M., Nikitin E.K. Metodika nerazrushajushhego kontrolja temperatury steklovanija v izdelijah iz PKM [Technique of

non-destructive testing of glass transition temperature in products from PKMJ /V sb. trudov III Mezhdunarodnoj nauch.-praktich. konf. «Sistemy upravlenija zhiznennym ciklom izdelij aviacionnoj tehniki». Ul'janovsk. 2012. S. 181.