

К ВОПРОСУ О КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СВОЙСТВ ПКМ© 2017 С.Е. Истягин^{1,2}, В.И. Постнов^{1,2}¹Институт авиационных технологий и управления

Ульяновского государственного технического университета

²Ульяновский научно-технологический центр федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский институт авиационных материалов»

Статья поступила в редакцию 29.09.2017

Современные полимерные композиционные конструкционные материалы (ПКМ), применяемые в авиастроении, ценят за их удельные прочностные характеристики. Это достигается различными способами проектирования структуры композита: применением вариаций видов армирующих материалов и укладкой их в различных относительных направлениях, полимерных матриц и их содержания в пластике, способов отверждения и их температурных, временных и физических параметров (например, давление прессования). Несомненно, материал должен иметь необходимые для его эксплуатации упруго-прочностные показатели. Данные параметры проектируются, как правило, сочетанием различных видов наполнителей и полимерных матриц с известными характеристиками. Для эффективного использования механических характеристик материала необходимо решить задачу оптимизации: максимальное совпадение полей напряжения и полей сопротивления. На уровне детали это достигается различного рода конструктивными усилениями. Распределение полей напряжения внутри структуры материала (элементарного объёма), разделов фаз матрица/волокно, матрица/дефект, волокно/дефект и др. зависит от армирования и расположения арматуры в объёме материала. В композитах на основе тканых наполнителей задача сводится к укладке армирующих слоёв в различных направлениях относительно основы. Правильность и точность решения описанной выше задачи является одним из решающих факторов в повышении ресурса деталей и их конструктивного совершенствования. В статье приводятся результаты исследований, показывающие важность учёта схемы укладки наполнителя для выявления корреляционной связи. Так, как в пластиках на основе тканых наполнителей процесс распределения внутренних напряжений (в том числе и колебаний) усложняется вследствие переплетения нитей утка (90°) и основы (0°), проведены статистические исследования для углепластика КМУ-11ТР на основе углеткани марки УТ-900.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, неразрушающий контроль, информативный параметр контроля, углепластик, динамический модуль упругости, корреляция, регрессионный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Определение реальных зон напряженности в полимерном композиционном материале (ПКМ) детали является очень трудной задачей. Даже с использованием систем автоматизации инженерных расчетов, рассчитанные поля напряжений носят лишь приблизительный теоретический характер. Они не учитывают расположение реальных дефектов в материале конструкции: микротрещин, участков повышенной пористости, расслоений, разрывов волокон, складок, локального нарушения содержания армирующего наполнителя, матрицы и пр. Особенно такое проектирование сложно для интегральных конструкций. В них формиро-

вание напряжений имеет очень сложную зависимость от совместной работы группы деталей под действием большого количества нагрузок, в том числе переменных по направлению, интенсивности, локальности и другим параметрам. Учесть полностью такое разнообразие переменных является фактически непосильной задачей для современных доступных расчётных систем.

Данная проблема может решаться диагностикой свойств ПКМ с применением неразрушающих методов контроля [1-4]. Для этого составляются корреляционные уравнения, связывающие информативный параметр контроля с его физическими характеристиками (пределы прочности, модули упругости и др.), к примеру, до эксплуатации и после неё. Кроме того, возможно определение на этой основе таких параметров, как плотность, пористость, содержание наполнителя и матрицы и др.

При составлении корреляционных уравнений обычно не учитывают отношение информативного параметра контроля слоёв, с углом

Истягин Сергей Евгеньевич, аспирант кафедры «Самолетостроение», инженер-технолог 3 категории. E-mail: fratos19@mail.ru

Постнов Вячеслав Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Самолетостроение», начальник филиала. E-mail: untcviam@gmail.com

укладки, отличным от направления основы (90° ; $\pm 45^\circ$; $\pm 30^\circ$ и т.д.) к информативному параметру контроля слоёв основы (0°). Другими словами, уравнения составляются без учёта схемы армирования слоев наполнителя в ПКМ. Кроме того, уравнения корреляции составлялись исследователями для материалов на основе однонаправленных наполнителей, что упростило задачу по составлению корреляционных уравнений. Это выражается в хорошей линейной зависимости корреляции изменений информативного параметра при изменении свойств материала, т.е. высоком коэффициенте корреляции.

Понимание структурной схемы композиционного материала и протекающих в нём процессов напряженно-деформированного состояния при его нагружении играет важную роль в определении и прогнозировании прочностных показателей материала [5, 6], в том числе и методами неразрушающего контроля, в том числе совместно с компьютерными расчетами в CAE-системах.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.3.: Неразрушающий контроль («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [7, 8].

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Применяемая модель структурной схемы композиционного материала

Известно, что переход к некоторой квазиоднородной анизотропной среде по всему объему материала соответствует частичному сглаживанию неоднородности материала: арматура усредняется со связующим в модифицированную матрицу. В этом случае композиционный материал представляется как одномерный материал с модифицированной матрицей, для которого достаточно просто учитывается кинематическая связь компонентов материала при их совместном деформировании. Такой подход не является универсальным, так как при изменении ориентации волокон одного из направлений запись кинематических условий совместного деформирования по поверхности контакта арматуры со связующим зависит от угла армирования. Путь существенного упрощения состоит в введении в расчет типичных элементов структуры, объединяющих семейство волокон одного или двух направлений. Деформационные свойства таких элементов рассчитывают по формулам для анизотропного тела. Кроме этого намного упрощается запись условий совместного деформирования [8]. В теории армированных сред за типичный элемент композиционного материала принимается элементарный слой.

Данные исследования затрагивают композиционные материалы с углеродным наполни-

телем в виде тканей (в том числе равнопрочных) и лент. За элементарный слой здесь принимается объемный элемент, выделенный двумя параллельными плоскостями, содержащий в себе один слой ткани (с волокнами в направлениях основы и утка). Смежные слои могут различаться по углу ориентации волокон. Варьируется угол поворота от направления основы (0°). Если в каждом слое пренебречь неоднородностью структуры и найти эффективные характеристики как квазиоднородного материала, то деформационная модель всего материала представится в виде неоднородного блока, составленного из различных слоев. В исследованиях будет использоваться послойная модель композиционного материала.

1.2. Поворот осей симметрии

Для понимания изменения различных характеристик слоя при его повороте в образце, необходимо рассмотреть симметрию материала. Рассмотрим достаточно большой объем анизотропного тела и вырежем из него в различных направлениях по отношению к связанной с телом системе координат. Для материала, не обладающего симметрией строения, поведение таких образцов при одинаковых условиях нагружения не будет идентичным. Однако большинство материалов, применяющихся в инженерной практике, имеют направления, в которых реакция материала на идентичное нагружение является одинаковой. Это свойство должно быть отражено в структуре обобщенного закона Гука [9].

Математически существование направлений, для которых характерна одинаковая реакция анизотропного материала на идентичное нагружение, эквивалентно предположению о неизменности коэффициентов жесткости и податливости при повороте осей декартовой системы координат. Имея это в виду, рассмотрим преобразования систем координат и, соответственно, упруго-прочностных свойств, подробно рассмотренные в [9].

Две системы координат, связанные преобразованием

$$x'_i = a_{ij}x_j, \quad (1)$$

где $a_{ij} = \cos(x'_i, x_j)$ – направляющие косинусы углов между новыми координатными осями x'_i и первоначальными x_j . Преобразование (4) определяет поворот координатной системы, если $\det a_{ij} = 1$, и поворот с инверсией, если $\det a_{ij} = -1$. Направляющие косинусы a_{ij} удовлетворяют условиям

$$a_{ik}a_{jk} = \delta_{ij}; a_{ki}a_{kj} = \delta_{ij}, \quad (2)$$

где символ Кронеккера

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j; \\ 0, & \text{если } i \neq j. \end{cases} \quad (3)$$

Легко установить, что напряжения и деформации изменяются по закону

$$\sigma'_{ij} = a_{im}a_{jn}\sigma_{mn}; \quad \varepsilon'_{ij} = a_{im}a_{jn}\varepsilon_{mn}. \quad (4)$$

Умножая равенства (4) на $a_{jk}a_{il}$ и учитывая (8), получим соотношения

$$\sigma_{kl} = a_{ik}a_{jl}\sigma'_{ij}, \quad \varepsilon_{kl} = a_{ik}a_{jl}\varepsilon'_{ij}, \quad (5)$$

отражающие зависимость преобразованной системы координат от изначальной. Записывая обобщенный закон Гука в новой системе координат

$$\sigma'_{ij} = B_{ijmn}\varepsilon'_{mn}. \quad (6)$$

И переходя к напряжениям и деформациям в первоначальной системе, с помощью равенств (5) можно записать соотношения, определяющие преобразование коэффициентов жесткости

$$B'_{ijkl} = a_{im}a_{jn}a_{kp}a_{lq}B_{mnpq}. \quad (7)$$

Обратное преобразование имеет вид

$$B_{ijkl} = a_{mi}a_{nj}a_{pk}a_{ql}B'_{pqmn}. \quad (8)$$

Аналогичные равенства справедливы и для коэффициентов податливости. Можно было бы ввести сокращенные обозначения, однако окончательные соотношения окажутся менее наглядными [10].

1.3. Плоскости симметрии материала

Материал, имеющий три взаимно ортогональные плоскости симметрии, называют ортотропным. Рассматриваемый материал КМУ-11ТР

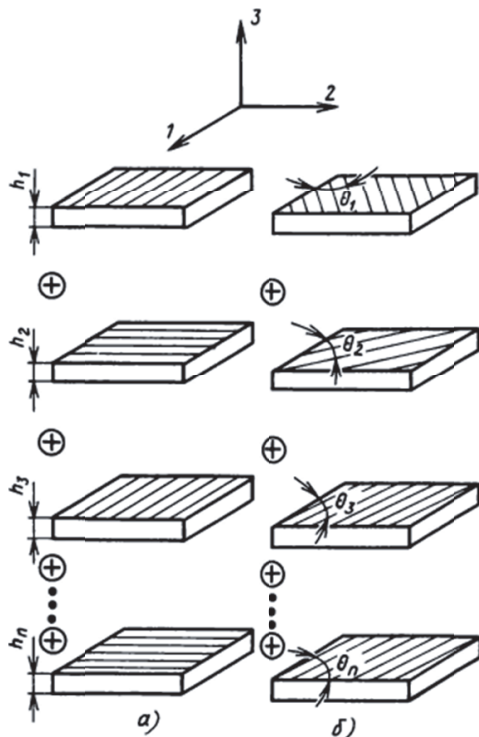


Рис. 1. Схема сложения слоев: оси ортотропии слоя совпадают с выбранной системой координат (а) и направлены под углом к выбранной системе координат (б)

на основе ткани УТ-900 имеет три взаимно ортогональные плоскости симметрии, на примере образца для испытаний на растяжения (рис. 1(а)): по ширине образца, по длине и по толщине (середина схемы при симметричной укладке).

1.4. Усреднение упругих характеристик материала

Известно, что упругие константы рассчитывают по известным формулам теории упругости [9, 10]. При этом напряженное состояние в отдельных слоях рассматривают на «макроуровне». Переход к макронапряжениям в этом случае означает осреднение покомпонентных полей напряжений. Степень осреднения при этом определяется областью интегрирования. Упругие характеристики каждого из слоев определяются свойствами компонентов и их объемной концентрацией; построение расчетной модели материала завершается наложением слоев друг на друга. Для этого необходимо компоненты жесткости каждого слоя выписать в системе координат повернутой относительно исходных, в общем случае неортогональных, векторов и воспользоваться общими формулами (7,8), соответствующими совместному деформированию пакета слоев. При моделировании слоистой среды макронапряжения относятся к отдельному слою, который имеет свои деформативные характеристики. Интегральное осреднение этих напряжений по объему материала, включающему все слои, приводит к средним напряжениям [8].

Определение деформационных характеристик композиционных материалов по свойствам компонентов и характеру их расположения в материале представляет одну из основных задач теории армирования. Для решения ее используют различные подходы, основанные на применении статистических методов и создании феноменологических расчетных моделей материала [11, 12, 13].

В некоторых случаях при расчете модулей упругости структурно неоднородных материалов можно ограничиться средним арифметическим или геометрическим их усредненных значений по Фойгту и Рейссу. Такой прием приводит к удовлетворительным результатам для однофазных поликристаллов, в которых различия в свойствах компонентов (отдельных кристаллов) обусловлены только их анизотропией [14, 15]. С увеличением различий между упругими характеристиками компонентов материала точность таких усреднений снижается [16].

Согласно методу регуляции структуры, частично упорядоченную реальную структуру армированного материала заменяют некоторой моделью, состоящей из периодически чередующихся в пространстве компонентов материала. Расчет упругих констант такой модели состоит

в решении граничной задачи для многосвязной области и улучшается с применением компьютерного расчёта. Этот метод наряду с методом слоистой модели, зачастую применяется моделирования конструкций, симуляции физических нагрузок и определении деформационных характеристик материалов и конструкций в современных САЕ-системах.

Однако и расчет по методу регуляризации не исключает погрешностей, обусловленных отклонением реальной структуры материала от идеализированной ее модели. Для оценки указанного отклонения применяют статистические методы, основанные на различных приближениях теории случайных функций. Целью этих методов является представление эффективных значений упругих констант композиционного материала с учетом усредненных их значений и корреляционной добавки к ним. Разработке подходов к решению этой задачи, позволяющей использовать корреляционное и сингулярное приближения теории случайных функций, в настоящее время посвящено много работ. Указанные методы теории случайных функций достаточно работоспособны только при малой относительной разнице модулей упругости компонентов материала. При этом результаты существенно зависят от точности определения корреляционных функций констант материала [14].

При расчете деформативных характеристик ортогонально-армированного волокнистого композиционного материала используется прием, сущность которого состоит в том, что расчет проводят по формулам для однонаправленного материала, но характеристики связывающего рассчитывают предварительно через свойства полимерной матрицы и армирующих волокон.

Расчет однонаправленных и слоистых композиционных материалов в указанной постановке сравнительно прост. Характеристики материала, волокна которого уложены в различных направлениях, но параллельно одной плоскости, можно рассчитать с помощью формул для однонаправленного материала, используя прием разбиения материала на слои. Упругие характеристики материала вычисляют с учетом упругих констант отдельных слоев по сравнительно несложным зависимостям.

Наиболее простой моделью композиционных материалов, с точки зрения расчета ее деформативных свойств, является слоистая модель, составленная из чередующихся плоских слоев арматуры с полимерными прослойками. Простые модели существуют и для однонаправленного волокнистого материала, для которого разработаны достаточно точные методы расчета упругих характеристик.

Установлено [17], что материал, армированный в двух взаимно перпендикулярных направлениях большим количеством волокон, с доста-

точной для практики точностью, можно считать квазиоднородным и ортотропным. При этом два главных направления ортотропии совпадают с направлениями армирования, а третье перпендикулярно поверхности укладки волокон. Главные направления упругости изменяются, поворачиваясь параллельно линии укладки волокон.

1.5. Принцип сложения слоев

Рассмотрим вариант расчета, основанный на методе слоистой аналогии, в соответствии с которым пластик сводится к слоистой двумерной модели. Построение модели материала производится путем наложения слоев друг на друга. Неоднородная структура пространственно-армированного материала представляется в виде пакета слоев, уложенных друг на друга, с различными свойствами (рис. 1). Каждый слой может содержать волокна в произвольном направлении. При таком подходе неоднородность структуры материала обусловлена только различием деформативных свойств слоев. Достоверность расчета зависит от точности вычисления упругих констант отдельного слоя [8].

Общий случай анизотропии упругих свойств слоя имеет место для отдельного слоя материала [18]. Композиционный материал, «разбитый» на чередующиеся плоские слои параллельно плоскости 12 (см. рис. 1), обладает неоднородностью упругих свойств в направлении 3, перпендикулярном слоям, тогда как вдоль слоев его свойства постоянны. В этом случае задача вычисления эффективных значений упругих констант материала является одномерной и точно решается для произвольного набора толщин и свойств слоев.

В силу одномерной зависимости упругих свойств материала от координаты 3 из уравнения равновесия и совместности деформаций следуют условия Рейсса и Фойгта соответственно для поперечных к плоскости слоя напряжений, а в плоскости слоя – для деформаций [19]. Эти условия для соответствующей части компонент тензора напряжений и деформаций в системе координат 1 2 3 имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{i3} &= \langle \sigma_{i3} \rangle, & i &= 1, 2, 3; \\ \varepsilon_{\alpha\beta} &= \langle \varepsilon_{\alpha\beta} \rangle, & \alpha, \beta &= 1, 2; \end{aligned} \quad (9)$$

угловыми скобками отмечены средние для всего материала напряжения и деформации.

1.6. Заключение по первому разделу

Подразделы 1.1-1.4 объясняют необходимость учета различия свойств разнонаправленных слоёв для точного определения упруго-прочностных свойств композитов. Особенно важным этот момент является для проведения исследовательских работ средствами неразру-

шающего контроля новых материалов, либо диагностики характеристик материала, ранее не диагностируемого данными средствами. Отсутствие учета данного различия приведет к искажению реальной корреляционной зависимости, что может послужить поводом для неверных выводов об упруго-прочностных характеристиках материала. Следовательно, для составления корреляционных уравнений, точно описывающих характеристики материала, методика неразрушающего контроля должна учитывать относительные упруго-прочностные свойства отдельных слоёв композита. Описанные заключения подтверждены нижеследующими исследованиями на примере углепластиков с наполнителем в виде ленты и ткани.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения эффективных упруго-прочностных характеристик материала широко применяется неразрушающий контроль его свойств [5, 20]. Ультразвуковой и другие методы неразрушающего контроля, выявляющие свойства материала в определенном его объеме, удовлетворяют вышеописанным теоретическим представлениям об определяемых эффективных упруго-прочностных свойствах материала конструкций. Величина контролируемого объема материала конструкции зависит от вида, способа и входных параметров контроля. Входными параметрами могут выступать частотные, амплитудные, временные и др. Для исследований был выбран метод определения динамического модуля упругости на приборе ИМД-1, разработанном в ФГУП ВИАМ с последующим расчётом

модуля упругости при растяжении. Стоит отметить: данный способ неразрушающего контроля согласовывается с теоретическими выдержками из раздела 1.4, а конкретнее - с измерением характеристик в определенном объеме материала (эффективные характеристики).

Объектом первого этапа исследования служили образцы с размерами 250×12×1 мм (ГОСТ 11262-80), предназначенные для входного контроля механических характеристик материала КМУ-3Л: 33 партии по 5 образцов в каждой. На данных образцах-свидетелях были проведены измерения динамического модуля упругости E_d на приборе ИМД-1. Затем образцы подвергались испытанию на разрыв с целью определения статического модуля упругости растяжения. На рис. 2 изображены полученные результаты взаимосвязи динамического и статического модулей упругости при растяжении.

В последующей серии измерений исследовали 40 образцов, различающихся схемами укладки углеленты и количеством слоёв с диапазоном изменения упругости от 25 до 175 ГПа. Было получено следующее уравнение регрессии:

$$E_p = 1,06E_d (\text{ГПа}); r = 0,833; r_{cr} = 0,562. \quad (10)$$

Повышение коэффициента корреляции объясняется испытанием образцов с широким технологическим диапазоном.

Точность данного уравнения может быть существенно повышена при учёте схемы укладки слоёв. Учет схемы укладки и упругих характеристик слоёв разного направления состоит в определении относительных модулей упругости между направлением основы и направлением отдельных слоёв в материале. Для этого нужно

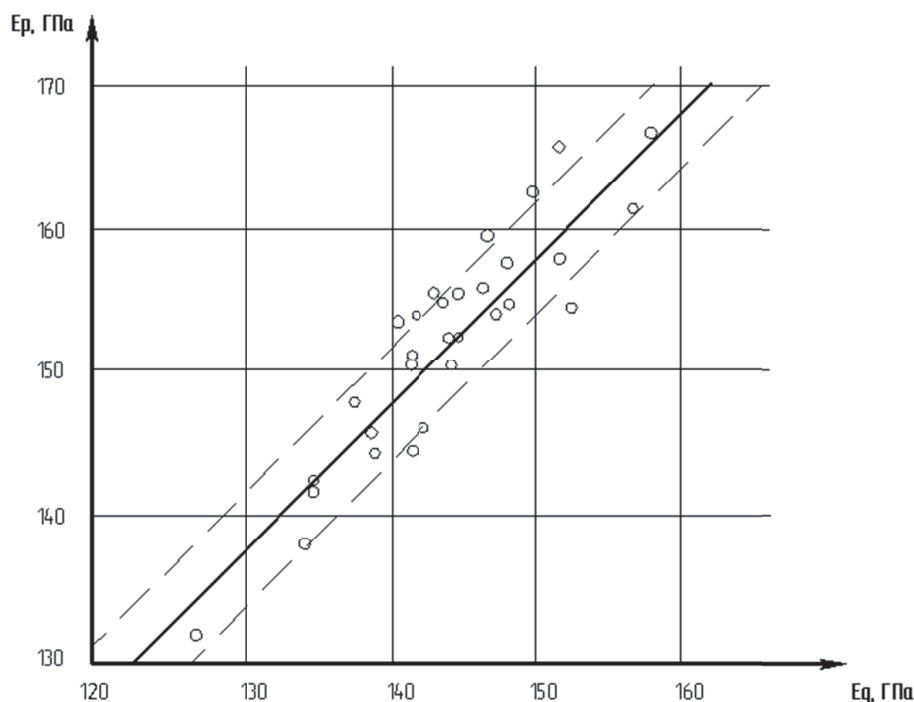


Рис. 2. Зависимости динамического модуля упругости от статического модуля углепластика КМУ-3Л

определить модули упругости образцов с каждым из направлений укладки (углов укладки слоёв наполнителя). На рис. 3 изображена зависимость относительного модуля упругости ($\Sigma = \Sigma_0 / \Sigma_{\varphi^0}$) от направления укладки углерента φ^0 .

Для установления зависимости динамического модуля упругости от предела прочности на образцах-свидетелях толщиной от 1 до 15 мм с разными схемами укладки и с учётом укладки слоёв были проведены измерения динамического модуля упругости. Затем образцы подвергались испытанию на растяжение с целью

определения предела прочности. Зависимость прочностных свойств от упругих характеристик для образцов-свидетелей деталей можно описать одним общим уравнением линейной регрессии во всём диапазоне измерения модулей:

$$\sigma_s = 5,5 \times 10^{-3} E_d + 7,9 \text{ (МПа)}; \quad r = 0,951; r_{cr} = 0,562; \frac{S}{\langle \sigma_s \rangle} = 0,15. \quad (11)$$

На рис. 4 изображена зависимость предела прочности при растяжении от квадрата динамического модуля.

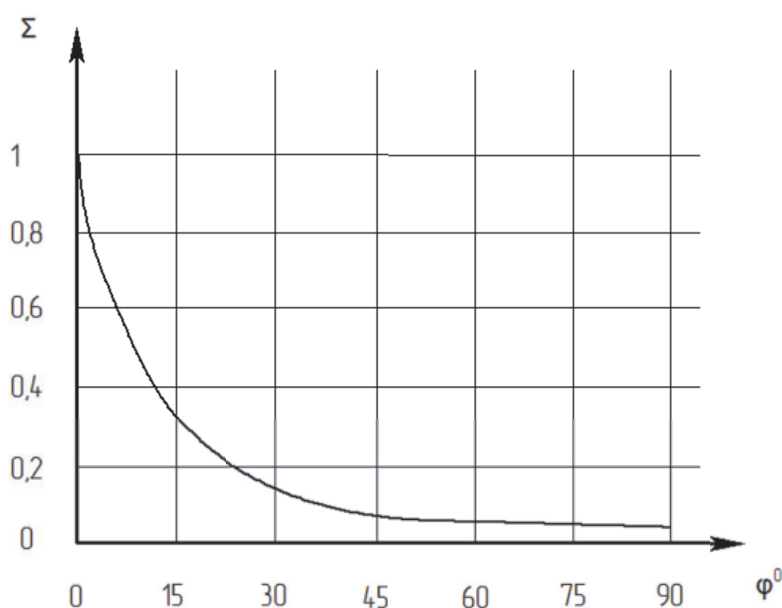


Рис. 3. Зависимость относительного модуля упругости Σ углепластика от направления укладки углерента φ^0

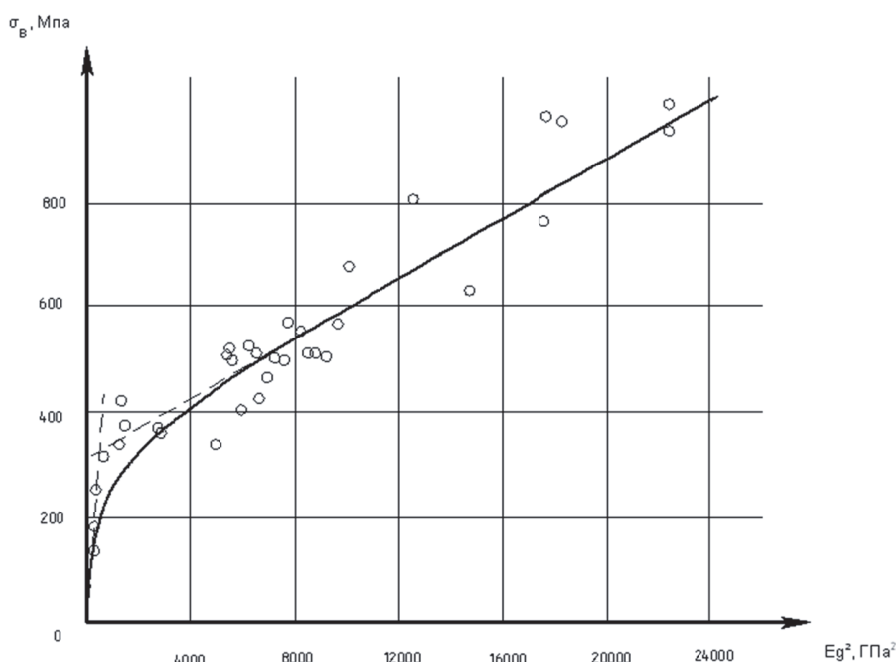


Рис. 4. Зависимость динамического модуля упругости от предела прочности при растяжении углепластика КМУ-3Л

Исследования проводились в соответствии с выпущенной в ФГУП ВИАМ технологической рекомендацией «Определение статического модуля упругости растяжения углепластиков по динамическому модулю на основании корреляционных уравнений».

На основе проведённых ранее исследований, очевидно, что высокая степень корреляция динамического модуля упругости наблюдается для углепластиков с однонаправленным наполнителем (жгуты, ленты). Но помимо них, широкое распространение имеют материалы на основе тканых углеродных наполнителей. Обширных работ по исследованию корреляции динамического модуля упругости от механических характеристик таких материалов не проводилось. Причиной этого может быть сложное распределение колебаний внутри материала в виду наличия тканого наполнителя.

В связи с этим, следующим шагом в рамках исследований, была проверка возможности

применения вышеописанного метода для выявления корреляционной зависимости динамического модуля упругости и статического модуля упругости при растяжении. Для этого проводились испытания образцов углепластика КМУ-11ТР на основе углеткани УТ-900 и связующего ЭДТ-69Н. Исследования проводились на двадцати партиях образцов вырезанных отдельно в направлении основы и утка. С помощью регрессионного анализа по результатам неразрушающих и разрушающих испытаний рассчитаны уравнения регрессии зависимостей статического модуля упругости при растяжении от динамического модуля с коэффициентами корреляции при вырезке образцов в направлении основы и утка:

$$E_{p(\text{осн})} = 0,41E_d + 48,3 \text{ (ГПа)}, r = 0,759; r_{cr} = 0,408;$$

$$E_{p(\text{уток})} = 0,24E_d + 56 \text{ (ГПа)}, r = 0,614; r_{cr} = 0,507;$$

Результаты приведены на рис. 5 и 6.

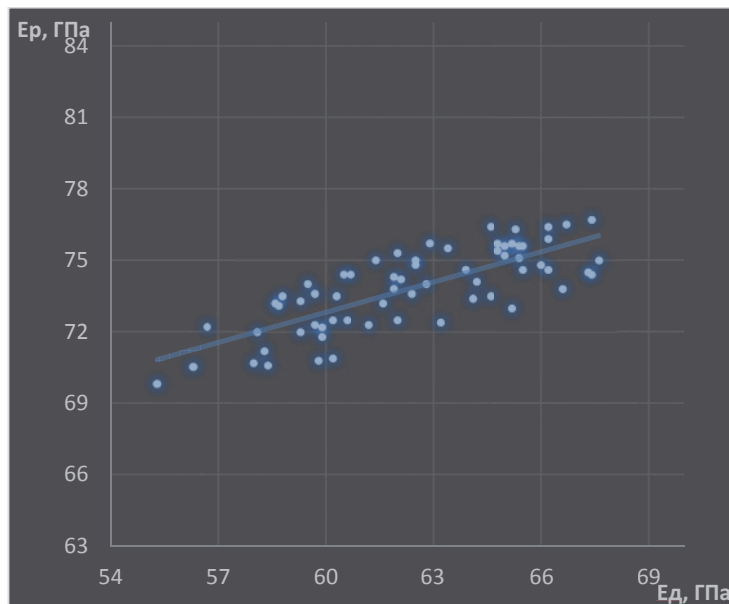


Рис. 5. Зависимость динамического модуля упругости от статического модуля образцов углепластика КМУ-11ТР в направлении основы

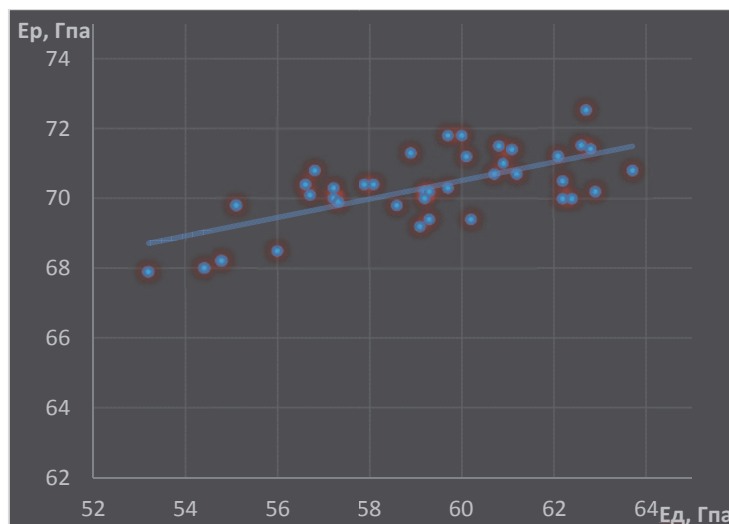


Рис. 6. Зависимость динамического модуля упругости от статического модуля образцов углепластика КМУ-11ТР в направлении утка

Регрессионный анализ показал возможность расчёта упругих характеристик материала. Не высокий коэффициент корреляции в сравнении с КМУ-3Л, как и их отличие основы от утка, объясняется недостаточным количеством партий образцов. Для уточнения коэффициентов необходимо исследование как минимум 30 партий различных образцов. Путь существенного улучшения точности регрессионного анализа лежит в введении в образцы искусственных дефектов различной степени (например, сухих слоёв наполнителя) для расширения технологического диапазона механических свойств, и в применении метода учёта укладки слоёв. Это расширит технологический разброс упругих свойств углепластика, следовательно, усилит корреляцию упруго-прочностных свойств с динамическим модулем упругости.

3. ВЫВОДЫ

Показана возможность диагностики углепластиков с тканым наполнителем с помощью параметра динамического модуля упругости. Точность корреляции может быть повышена предложенным методом пересчета укладки слоёв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каблов Е.Н.* Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2001. №1. С. 3–8.
2. *Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В.* Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой. // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. № 4. С. 17–20.
3. Неразрушающие методы контроля содержания связующих в препрегах и ПКМ (обзор) / *В.И. Постнов, О.Л. Бурхан, А.Э. Рахматуллин, С.М. Качура* // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.*, 2013. №12. ст.06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.04.2017)
4. *Гуляев А.И., Исходжанова И.В., Журавлева П.Л.* Применение метода оптической микроскопии для количественного анализа структуры ПКМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.*, 2014. №7. ст.07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 24.04.2017) DOI/10.18577/2307-6046-2014-0-7-7-7.
5. *Каблов Е.Н.* Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // *Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932 – 2002*. М.: МИСиС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
6. *Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник / Ю.М. Тарнопольский, И.Г. Жигун, В.А. Поляков*. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
7. *Каблов Е.Н.* Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
8. *Орлов М.Р.* Стратегические направления развития Испытательного центра ФГУП «ВИАМ» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 387–393

9. *Композиционные материалы: В 8-ми т. Пер. с англ. / Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока*. М.: Машиностроение, 1978. – Пер. изд.: *Composite Materials*. Нью-Йорк, 1975. – Т.7. Анализ и проектирование конструкций. Часть 1 / Под ред. К. Чамиса. 1978. 300 с.
10. *Лехницкий С.Г.* Анизотропные пластинки. М.–Л.: ОГИЗ Гостехиздат. 1947. 355 с.
11. *Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г.* Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 263 с.
12. *Болотин В.В., Новичков Ю.Н.* Механика многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1980, 375 с.
13. *Скудра А.М., Булаве Ф.Я.* Прочность армированных пластиков. М.: Химия, 1982. 216 с.
14. Упрочнение металлов волокнами / *В.С. Иванова, И.М. Кольев, Л.Р. Ботвина, Т.Д. Шермергор*. М.: Наука, 1973. 206 с.
15. *Шермергор Г.Д.* Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977, 400 с.
16. *Победра Б.Е.* Механика композиционных материалов. М.: Изд-во МГУ, 1984, 336 с.
17. *Болотин В.В.* Плоская задача теории упругости для деталей из армированных материалов. // *Расчеты на прочность*. № 12. М.: Машиностроение, 1966. С. 3–31.
18. *Сапожников С.Б., Безмельницын А.В.* Неоднородность локальной жесткости и прочности композита на основе стекломата // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2012. №2. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/neodnorodnost-lokalnoy-zhestkosti-i-prochnosti-kompozita-na-osnove-steklomata> (дата обращения: 29.09.2016).
19. *Жигун И.Г., Поляков В.А.* Свойства пространственно-армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1978. 215 с.
20. *Троицкий В.А., Карманов М.Н., Троицкая Н.В.* Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, №3, 2014, С. 29–33.

REFERENCES

1. *Kablov E.N.* Quality control of materials - guarantee of safety of operation of aviation equipment // *Aviation materials and technologies*. 2001. №1. Pp. 3–8.
2. *Kablov E.N., Sivakov D.V., Gulyaev I.N., Sorokin K.V.* Methods of research of structural composite materials with an integrated electromechanical system // *Aviation materials and technologies*. 2010. № 4. P. 17–20.
3. Non-destructive methods for controlling the content of binders in prepregs and PCM (review) / *V.I. Postnov, O.L. Burhan, A. E. Rakhmatullin, S.M. Kachura* // *Proceedings of VIAM: electron. Scientific-technical. Zhurnal.*, No. 2013. No. 12. St.06. URL: <http://www.viam-works.ru> (reference date: 04.24.2017)
4. *Gulyaev A.I., Iskhodzhanova I.V., Zhuravleva P.L.* Application of the method of optical microscopy for quantitative analysis of the structure of PCM // *Proceedings of VIAM: electron. Scientific-technical. Zhurnal.*, 2014. №7. 07.07. URL: <http://www.viam-works.ru> (date of circulation: 04.24.2017) DOI / 10.18577 / 2307-6046-2014-0-7-7-7
5. *Kablov E.N.* Aviation materials science in the XXI century. Prospects and problems // *Aviation materials. Selected works VIAM 1932 - 2002*. Moscow: MISIS-VIAM, 2002. P. 23–47.
6. *Spatially-reinforced composite materials: Reference*

- book / *Y.M. Tarnopolsky, I.G. Zhigun, V.A. Polyakov*. M.: Mechanical Engineering, 1987. 224 p.
7. *Kablov E.N.* Strategic directions of development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030 // *Aviation materials and technologies*. 2012. №S. Pp. 7-17.
 8. *Orlov M.R.* Strategic directions of development of the Test Center of FSUE «VIAM» // *Aviation Materials and Technologies*. 2012. №S. Pp. 387-393
 9. *Composite materials: In the 8th century*. Trans. With the English. Ed. L. Brautman and R. Krok. M.: Mechanical Engineering, 1978. - Trans. Ed.: *Composite Materials*. New York, 1975. T.7. Analysis and design of structures. Part 1 / Ed. K. Chamis. 1978. 300 s.
 10. *Lekhnitsky S.G.* Anisotropic plates. M.-L.: OGIZ Gostehizdat. 1947. 355 p.
 11. *Alfutov N.A., Zinoviev P.A., Popov B.G.* Calculation of multilayered plates and shells from composite materials. M.: Mechanical Engineering, 1984. 263 p.
 12. *Bolotin V.V., Novichkov Yu.N.* Mechanics of multilayer structures. M.: Mechanical Engineering, 1980, 375 p.
 13. *Skudra A.M., Bulava F.Ya.* Strength of reinforced plastics. Moscow: Chemistry, 1982. 216 p.
 14. *Hardening of metals by fibers* / *V.S. Ivanova, IM Kol'ev, L.R. Botvina, T.D. Shermergor*. M.: Nauka, 1973. 206 p.
 15. *Shermergor G.D.* Theory of Elasticity of Microinhomogeneous Media. M.: Science, 1977. 400 p.
 16. *Pobedrya B.E.* Mechanics of Composite Materials. Moscow: Izd-vo MGU, 1984, 336 p.
 17. *Bolotin V.V.* Flat problem of the theory of elasticity for parts from reinforced materials. // *Calculations for strength*. No. 12. Moscow: Mashinostroenie, 1966, pp. 3-31.
 18. *Sapozhnikov S.B., Besmel'nitsyn A.V.* Inhomogeneity of local rigidity and strength of a composite based on glass mat // *Vestnik PNIIP. Mechanics*. 2012. № 2. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/neodnorodnost-lokalnoy-zhestkosti-i-prochnosti-kompozita-na-osnove-steklomata> (yes-that address: 29.09.2016).
 19. *Zhigun I.G., Polyakov V.A.* Properties of spatially reinforced plastics. Riga: Zinatne, 1978. 215 p.
 20. *Troitsky V.A., Karmanov M.N., Troitskaya N.V.* Non-destructive quality control of composite materials // *Technical diagnostics and non-destructive testing*, No. 3, 2014, pp. 29-33.

THE ISSUE OF CORRELATION DEPENDENCE OF INFORMATIVE PARAMETERS OF CONTROL IN DIAGNOSTICS THE PROPERTIES PCM

© 2017 S.E. Istyagin^{1,2}, V.I. Postnov^{1,2}

¹ Institute of Aviation Technologies and Management of Ulyanovsk State Technical University

² Ulyanovsk Scientific-Technological Center – Branch of Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”

Modern polymer composite structural materials (PCM) used in aircraft, valued for their specific strength characteristics. This is achieved by designing the various composite structures ways: using variations kinds of reinforcing materials and laying them in the desired directions relative, polymer matrices and their content in the plastic, and methods of curing temperature, time and physical properties (e.g., compression pressure). Clearly, the material must have the necessary operation for its elastic-strength characteristics. These parameters are designed, usually a combination of different types of filler and polymer matrix with known characteristics. For effective use of the mechanical characteristics of the material is necessary to solve the optimization problem: the best congruence straining fields and counter stand fields. At the level of detail is achieved by different kinds of structural reinforcements. The distribution of stress field inside the material structure (elementary volume), matrix/fiber phases, the matrix/defect, the fiber/defect al. Depends on the reinforcement and valve arrangement in the bulk material. The composites on the basis of tissue fillers problem is reduced to the installation of reinforcing layers in different directions relative to the substrate. The correct solution of the problem described above is one of the key factors in increasing the resource of parts and their structural improvement. The complexity of the problems solved by modern industry often requires complex engineering analysis, including the interaction of various physical phenomena and regions (solid mechanics, fluid mechanics and gas, electromagnetism, etc.). The combined use of CAE-systems and non-destructive testing methods will help more accurately predict the behavior of a particular part in the operation. The article presents the results of research showing the importance of taking into account the placement scheme for detecting a correlation. So how in plastics based on tissue fillers stress distribution process (including vibrations) complicated by intertwining weft (90°) and a base made statistical analyzes for carbon fiber CMU-11TR mark on the fabric UT-900. Possible options for further research and application of this approach to defining the characteristics of composite materials using nondestructive inspection techniques and sharing with CAE-systems.

Keywords: polymer composite material, non-destructive testing, informative parameter of control, carbon fiber, dynamic modul of elasticity, correlation, regression analysis.

Sergey Istyagin, Post-Graduate Student at the Aircraft Construction Department, Engineer-Technologist of the Third Category. E-mail: fratos19@mail.ru

Vyacheslav Postnov, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Construction Department, Head of the Branch. E-mail: untcviam@gmail.com