

УДК 621.431.75+620.179.1

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. ВЫЯВЛЕНИЕ ГРАНИЦ ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТОВ

© 2014 Т. Д. Каримбаев, Д. С. Пальчиков

Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, г. Москва

Для обеспечения надёжности изделий из композиционных материалов (КМ) важной технической задачей является установление опасных типов дефектов, допустимых их величин и разработки способов их обнаружения. Применительно к проблеме контроля и выявления границ допустимости технологических дефектов деталей авиадвигателей из композиционных материалов представлен комплекс методов неразрушающего контроля (НК), а также проведены экспериментальные исследования по определению влияния дефекта волокна на механические характеристики полимерного композиционного материала. Совокупное применение различных методов НК необходимо для обнаружения присущих КМ многообразных типов технологических дефектов. Дефектоскопия является неотъемлемой частью технологии переработки композиционных материалов в изделия. Испытаниями образцов с искусственно нанесёнными повреждениями волокон показано существенное их влияние на характеристики прочности при растяжении и модуль сдвига в плоскости слоя. Влияние возможных дефектов волокон на механические характеристики следует учитывать при проектировании изделий из КМ.

Неразрушающий контроль, лазерно-ультразвуковая дефектоскопия, ИК-термография, рентгеновская томография, дефект, допустимая повреждаемость.

Введение

Одним из ключевых этапов разработки технологии изготовления деталей и узлов авиационных двигателей из композиционных материалов (КМ), их моделей, конструктивно-подобных элементов и образцов является неразрушающий контроль (НК) их качества.

Многочисленными исследованиями установлено, что характерными производственными дефектами являются:

а. дефекты в волокне:

- разрывы,
- свиелитовость (искривлённость) волокон,

• несоответствие их расположения проектным требованиям;

б. дефекты в матрице:

- пористость,
- участки с повышенным или пониженным содержанием матрицы;

в. дефекты на границе раздела:

- участки сухого волокна,
- расслоения.

Указанные дефекты присущи любой технологии. Они проявляются в большей или меньшей мере в широко используемых технологиях (автоклавной техноло-

гии, технологии инфузии, намотки, пресования и др.) переработки КМ.

В ЦИАМ решается задача установления влияния технологических дефектов на прочность и жёсткость конструкции. Выявление реальных границ допустимых дефектов представляется важной технической задачей для обеспечения надёжности конструкций из КМ.

Для решения поставленных целей в ЦИАМ используется комплекс методов НК.

Лазерно-ультразвуковая дефектоскопия

Особенности метода

Метод основан на принципе генерации широкополосных ультразвуковых (УЗ) сигналов при поглощении коротких лазерных импульсов в специальном оптико-акустическом (ОА) генераторе. Возбуждаемый в ОА-генераторе УЗ сигнал распространяется в исследуемый объект, где рассеивается назад на неоднородностях структуры. После чего рассеянный сигнал, несущий информацию об акустических свойствах и структуре объекта, регистрируется широкополосным пьезоприёмником (рис. 1).

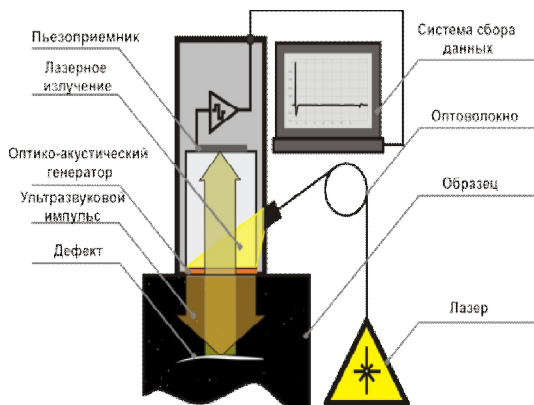


Рис. 1. Принцип работы лазерно-ультразвукового преобразователя (ПЛУ)

Метод обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами ультразвукового контроля. Специфика генерируемого акустического импульса такова, что при одинаковых центральных частотах УЗ сигналов длительность импульса лазерного ультразвука в 6-7 раз меньше, чем для пьезо-ультразвука, что позволяет достичь разрешения в 30-50 мкм. Раздельная генерация и регистрация акустических импульсов в преобразователе приводит к принципиальному отсутствию «мёртвой зоны». Метод чувствителен к знаку изменения импеданса среды, в которой распространяется импульс, что позволяет отличать такие дефекты, как трещины (пустоты) и плотные включения. Малый диаметр пробного акустического импульса приводит к повышенной чувствительности при регистрации дефектов малой площади.

По техническому заданию ФГУП ЦИАМ Международный Лазерный Центр МГУ разработал на основе описанного метода лазерно-ультразвуковой дефектоскоп УДЛ-4 (рис. 2). Установка автоматизирована при помощи трёхкоординатной портальной системы позиционирования, что сводит к минимуму влияние оператора на результат контроля.

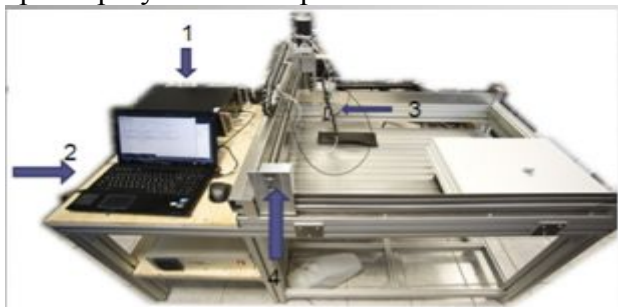


Рис. 2. Автоматизированная система контроля УДЛ-4

Результатом автоматического сканирования фактически является матрица А-сканов изделия в различных его точках. Данная матрица несёт 3D информацию о внутренней структуре объекта по всему его объёму. С помощью специально разработанного программного обеспечения полученные данные отображаются в удобной форме (в виде сечений) для дальнейшего анализа их оператором (рис.3).

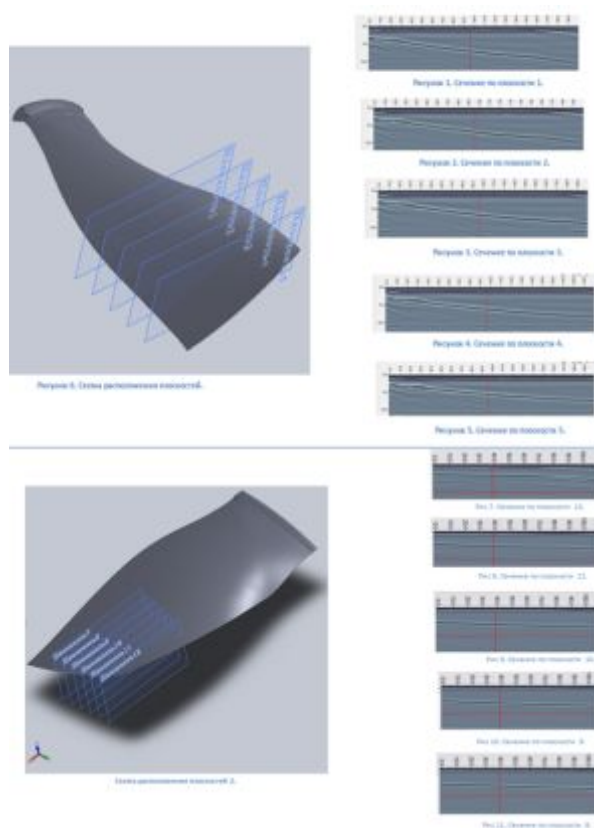


Рис. 3. Результаты исследования лопатки вентилятора из ПКМ

Отработка методики определения внутренних дефектов изделий из КМ при помощи УДЛ-4

Для отработки методики определения внутренних дефектов в изделиях из КМ был изготовлен тестовый образец в виде пластины из углепластика с искусственно заложенными внутренними дефектами (расслоения, избыток связующего, недостаточная пропитка внутренних слоёв композита, инородные включения). При помощи УДЛ-4 удалось выявить все дефекты, некоторые из которых представлены на рис. 4.

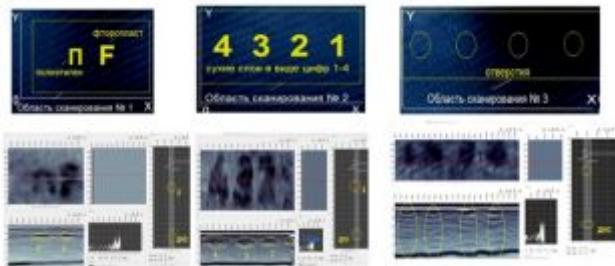


Рис. 4. Обработка методики определения внутренних дефектов изделий из КМ (тестовый образец)

Результаты исследования деталей АД из КМ при помощи УДЛ-4

Ниже представлены результаты исследования закрылка, выполненного из углепластика с закладным элементом (углепластиковым стержнем), проходящим по всей его длине. Вследствии сложной геометрии исследуемого объекта и ограничений угла наклона преобразователя, сканирование проводилось по предварительно обозначенным зонам (рис. 5).

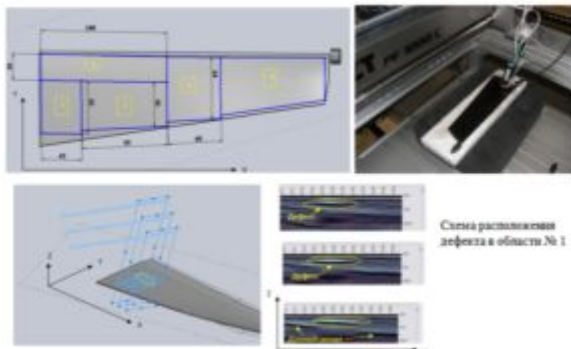


Рис.5. Результаты УЗ исследования закрылка из ПКМ

Кроме представленной на рис. 5 дефектной области, в других зонах закрылка также были выявлены неоднородности. Общая карта дефектов исследуемого изделия представлена на рис. 6.

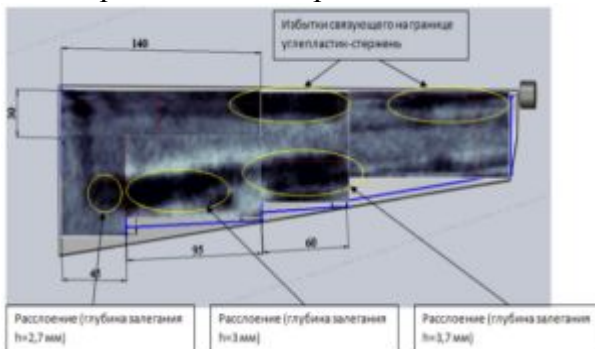


Рис. 6. Карта дефектов

Измерение динамических модулей упругости при помощи УДЛ-4

Лазерно-ультразвуковой дефектоскоп УДЛ-4 также позволяет определять динамические модули упругости КМ путём измерения скорости распространения ультразвуковой волны в заданном направлении при помощи специального преобразователя. Динамический модуль упругости в заданном направлении вычисляется по известным соотношениям на основе измеренной скорости и известной плотности материала. На рис. 7 показан процесс измерения в восьми направлениях динамических модулей упругости лопатки вентилятора из углепластика.

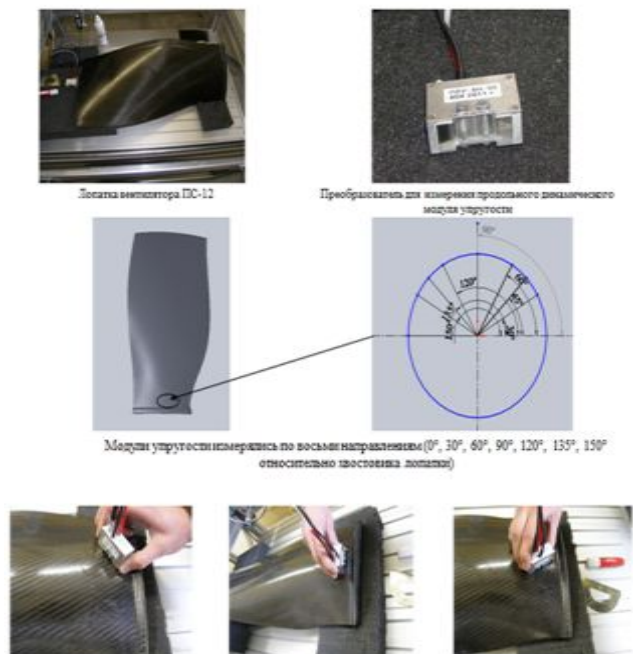


Рис. 7. Измерение динамических модулей упругости лопатки вентилятора в области хвостовика

ИК-термография

Термографический метод НК основан на измерении температурного поля объекта исследования при его нагреве или охлаждении. Дефекты приводят к неоднородности температурного поля, что фиксируется термографом «Иртис 2000» (рис. 8).



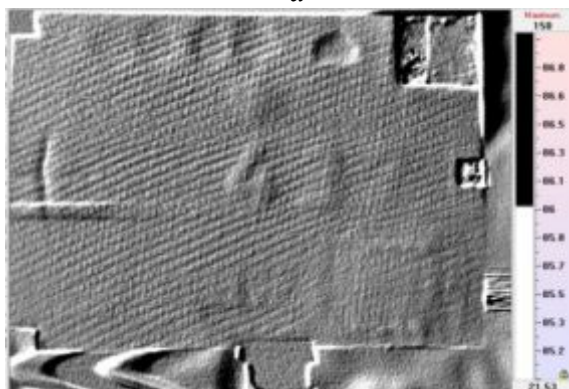
Рис. 8. ИК-термограф «Иртис 2000»

Ниже приведены исследования тестового образца (рис.4) с различными видами дефектов.

На рис.9, 10 представлены термограммы тестовой пластины.



а



б

Рис. 9. Пластина из углепластика с искусственно заложенными технологическими дефектами (а) и её термограмма (б)

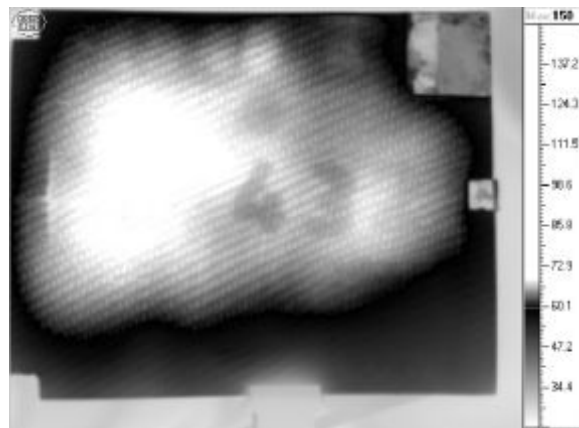


Рис. 10. Термограмма тестовой пластины

ИК-термография является экспресс - методом НК, не требующим больших временных затрат на исследование. Однако, не все виды дефектов удаётся обнаружить этим методом. Так, например, не определялся дефект в виде инородного включения (металлической вставки). Метод также не даёт полной информации о размере и глубине залегания дефекта.

В ЦИАМ ИК-термография использовалась для определения начала разрушения в динамических испытаниях лопатки турбины (рис.11). Процесс разрушения лопатки в ходе испытания на динамическом вибростенде сопровождается локальным повышением температуры в окрестности повреждённой области.

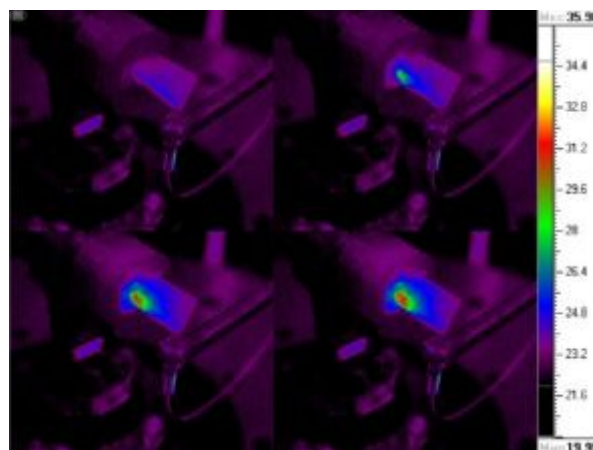


Рис. 11. Разогрев зоны разрушения лопатки турбины в процессе испытаний на МнЦУ

Рентгеновская томография

Одним из перспективных методов НК является рентгеновская компьютерная томография. Содействие д.т.н. Э.И. Вайнберга позволило при помощи высокоэнер-

гетического компьютерного томографа «Проминтро» исследовать на наличие внутренних дефектов изготовленные в ЦИАМ из КМ рабочие лопатки вентилятора, рабочее колесо турбины, тела качения подшипников.

Установка позволяет реконструировать 3D-модель объекта контроля по сечениям и получить полную картину внутренней структуры материала. На рис. 12 представлены томограммы рабочей лопатки вентилятора из полимерного КМ (ПКМ). При исследовании в области хвостовика были обнаружены зоны пониженной плотности, что свидетельствует о недостаточной пропитке.

Метод томографии эффективен при контроле составных конструкций сложной формы, например, рабочего колеса (РК) турбины высокого давления (рис. 13).

Обнаруженные расслоения в наружном кольце и трещины в штифтах устранены до проведения испытаний.

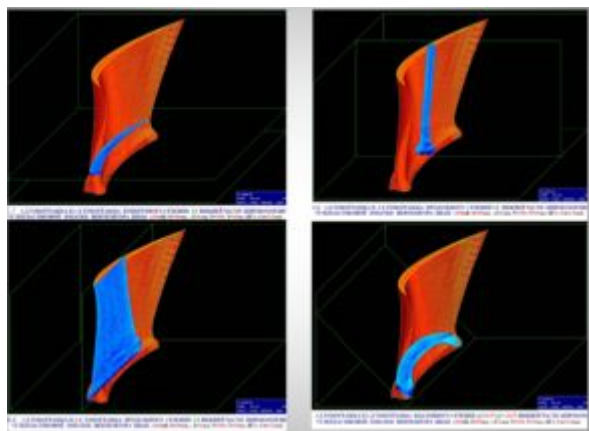


Рис. 12. Томограммы лопатки вентилятора из ПКМ

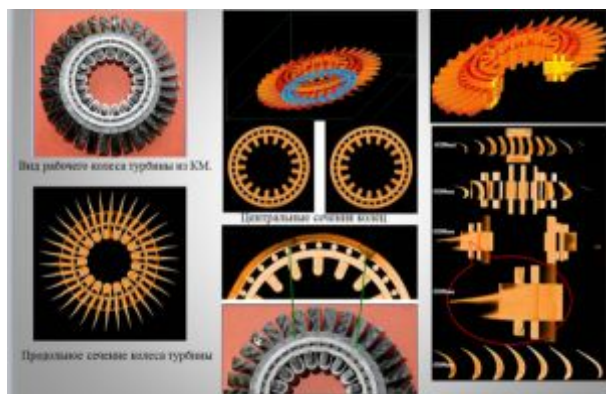


Рис. 13. Результаты рентгеновского контроля заготовки РК турбины из ПКМ

Как уже было показано выше, метод применим к изделиям любой геометрии. Ниже приведены результаты контроля шариков подшипников из керамического КМ на наличие рыхлостей в структуре и пористости (рис. 14).

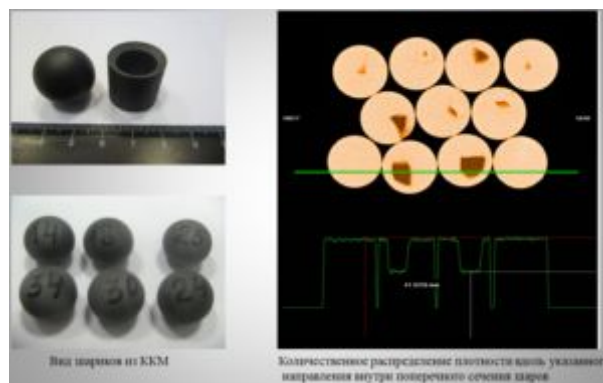


Рис. 14. Результаты исследования шариков из ККМ

Выявлены «провальные» зоны плотности материала шаров, достигающие до 56% по сравнению с бездефектными областями.

Задачи контроля технологических дефектов деталей из КМ

Совокупное использование описанных методов НК позволяет установить технологические дефекты различного вида, различных размеров и их место расположения в изделиях из КМ. Изделия из КМ, как правило, всегда содержат изъяны и одновременно они являются дорогостоящими. В этой ситуации важно иметь руководство о допустимых в изделии несовершенствах. Руководства являются сводом правил, построенным на обобщении практики проектирования деталей из КМ. Однако, в существующих руководствах (например, АМС 20-29) приводится только качественная классификация производственных дефектов и эксплуатационных повреждений. Фрагмент такой квалификации приведён на рис.15. Описанные в АМС 20-29 и других документах границы допустимых повреждений, общие для всех видов повреждений, для всех типов деталей и для любых условий эксплуатации, недостаточны для непосредственного использования.



Рис.15. Классификация производственных дефектов и повреждений

Такой документ с конкретными видами повреждений, с конкретными их размерами и местом расположения должен быть разработан для каждой ответственной детали авиационного двигателя. Так как условия эксплуатации для конкретной детали двигателя при этом становятся более определёнными, то указанная выше конкретизация допустимых повреждений становится разрешимой технической задачей. Решение её актуально для квалификации детали. Такая задача решается в ЦИАМ, в частности, применительно к проблеме создания рабочей лопатки вентилятора из полимерных КМ.

Экспериментальные исследования влияния дефекта волокна на механические характеристики КМ

На первом этапе по экспериментальному определению допустимости технологических дефектов были выполнены работы по выявлению влияния дефекта волокна на механические характеристики углепластика. Для этого были спроектированы и изготовлены три пластины из 18-слойного углепластика длиной $L = 280$ мм, шириной $b = 200$ мм и толщиной $h = 3,8$ мм с различным количеством симметрично расположенных повреждённых слоёв:

- первый тип пластины – с 9-ю поврежденными слоями ткани из 18 (50%),
- второй тип пластины – с 6-ю поврежденными слоями ткани из 18 (33,3%),

• третий тип пластины – с 3-мя поврежденными слоями ткани из 18 (16,6%).

На рис. 16 приведено место расположения повреждённых слоёв в трёх типах изготовленных пластин.

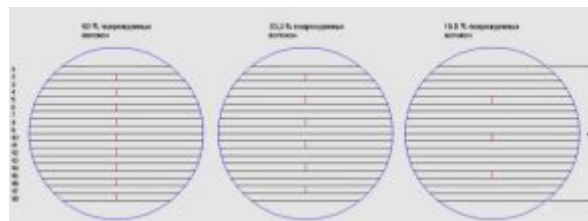


Рис. 16. Схема распределения повреждённых слоёв по толщине углепластика

Предварительно каждая из изготовленных пластин была подвержена контролю отработанными методами НК:

- ИК-термографии,
- лазерно-ультразвуковой дефектоскопии.

На рис.17 представлен результат анализа с помощью ИК-термографии пластины с 50% содержанием повреждённых слоёв.

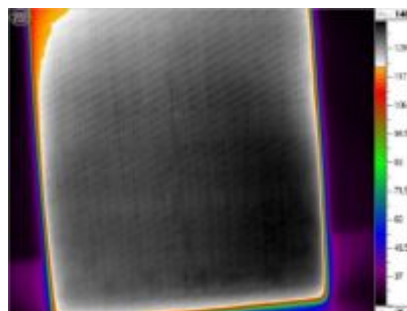


Рис. 17. Термограмма пластины с дефектами волокна

На рис. 18 представлены результаты лазерно-ультразвуковой (ЛУЗ) дефектоскопии. Пластина с 50% содержанием поврежденных слоёв исследовалась в сечении с повреждениями.

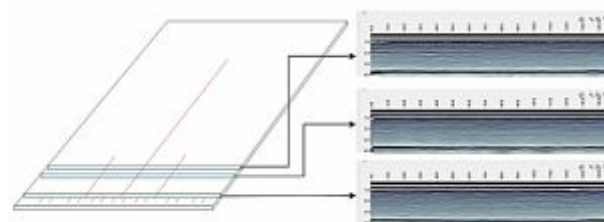


Рис. 18. Результаты ЛУЗ контроля дефектных областей пластины

Производственный дефект в виде повреждения 50% слоёв углепластика не

удалось обнаружить ультразвуковым и тепловым методами НК. Предположительно, рассматриваемый вид повреждения может быть обнаружен при помощи компьютерной рентгеновской томографии. В соответствии с существующими руководствами, в том числе, АМС 20-29, нет оснований забраковать образец. Далее из каждой пластины по разработанной схеме, приведённой на рис. 19, были вырезаны образцы для испытаний. Такими образцами являются

– 9 образцов для испытаний на растяжение (ГОСТ 25.601-80), из которых 7 образцов имеют дефектные слои и 2 образца контрольные бездефектные;

– 14 образцов для испытаний на межслоевой сдвиг (ASTMD2344), из которых 7 образцов имеют дефектные слои и 7 образцов контрольные бездефектные;

– 9 образцов для испытаний на сдвиг в плоскости слоя (ASTMD5379), из которых 6 образцов имеют дефектные слои и 3 образца контрольные бездефектные.

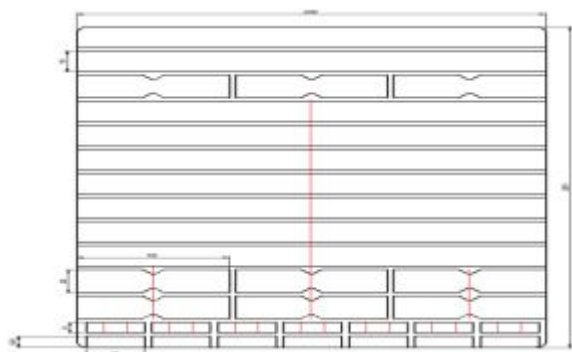


Рис.19. Схема расположения дефектов волокон в пластине

На рис. 20 приведены фотографии подготовленных образцов, на которых бе-

лым маркером помечены области расположения дефектных слоёв.



Рис. 20. Подготовленные для испытаний образцы

Испытания на растяжение

На рис. 21 приведены диаграммы деформирования при растяжении образцов с 50% повреждённых волокон, а также двух бездефектных образцов.

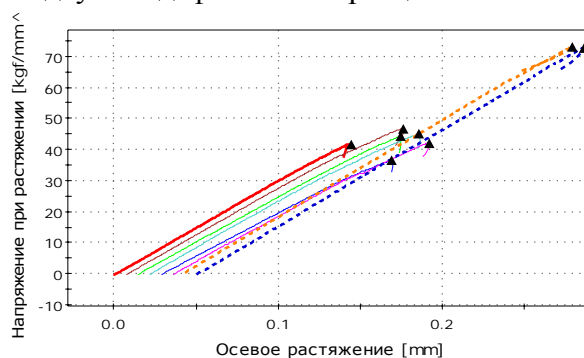


Рис. 21. Результаты испытаний образцов с 50% повреждённых волокон

На диаграмме пунктирными линиями отмечены кривые деформирования образцов без дефектов. Предел прочности образцов с дефектом составил 60% от предела прочности бездефектного образца. Результаты испытаний всех образцов, в том числе с 33,3% и 16,6% повреждённых волокон, приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Сравнительные данные характеристик материала

Характеристика	Без поврежденных	16,6 % поврежденных	33,3 % поврежденных	50 % поврежденных
Модуль упругости E_1 , кг/мм ²	7801,19	7652,52	7602,9	7512,78
Коэффициент Пуассона μ_{12}	0,0552	0,0434	0,0550	0,0466
Коэффициент Пуассона μ_{13}	0,4985	0,5050	0,5650	0,6292
Предел прочности при растяжении σ_{11} , кг/мм ²	71,13	62,48	56,24	42,68
Предельная деформация ϵ_1 , %	0,960	0,919	0,826	0,623
Предел прочности при межслоевом сдвиге τ_{13} , кг/мм ²	4,467	---	---	4,880
Модуль сдвига в плоскости слоя G_{12} , кг/мм ²	453,179	---	---	392,64
Предел прочности при сдвиге в плоскости слоя τ_{12} , кг/мм ²	7,88	---	---	8,72

Испытания на межслоевой сдвиг

Испытания проводились согласно ASTM D2344. На рис. 22 показана схема нагружения и месторасположение повреждённых слоёв.

По результатам испытаний методом «короткой балки» дефектных и бездефектных образцов на межслоевой сдвиг не выявлено влияние повреждений на характеристики сдвиговой прочности материала (табл. 1).

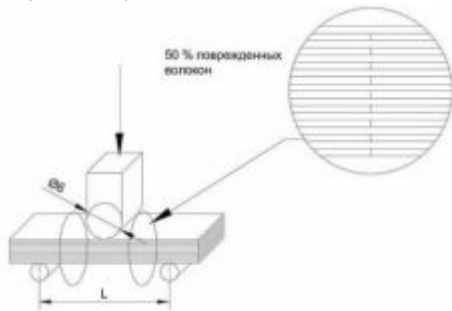


Рис. 22. Схема нагружения при испытаниях на межслоевой сдвиг

Следует также отметить, что характер разрушения бездефектных образцов и образцов с повреждениями идентичен (рис.23).

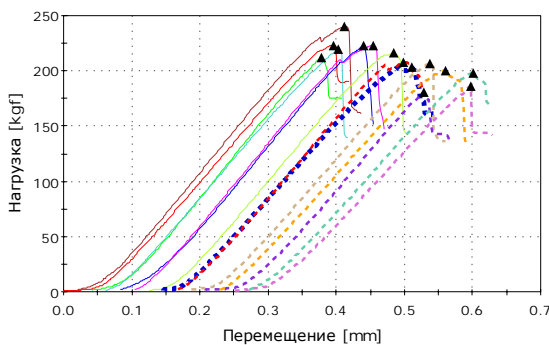


Рис.23. Кривые деформирования дефектных (пунктирная линия) и бездефектных образцов при испытаниях на межслоевой сдвиг

Рассмотренный тип повреждений слоёв для напряжённого состояния, обусловленного изгибом, не влияет на характеристику межслоевой прочности.

6.3 Испытания на сдвиг в плоскости слоя

Для испытаний на сдвиг в плоскости слоя использовались образцы с V-образным вырезом (рис. 24).

По результатам испытаний образцов с 50% повреждённых волокон выявлено снижение модуля сдвига на 13 % по сравнению с бездефектными образцами. На рис. 25 приведены кривые деформирования образцов при сдвиге в плоскости слоя.

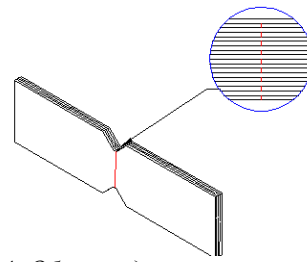


Рис. 24. Образец для испытаний на сдвиг в плоскости слоя (ASTM D5379)

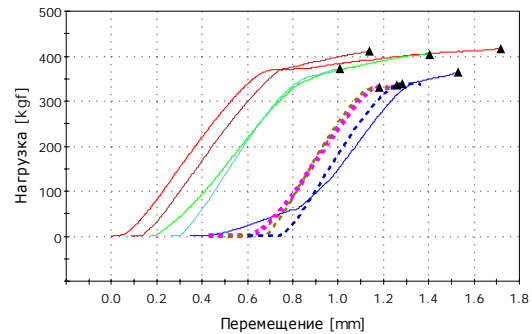


Рис. 25. Кривые деформирования образцов при сдвиге в плоскости (сплошная линия-образцы с дефектами волокна, пунктирная-бездефектные)

Наличие 50% дефектных волокон существенно не повлияло на сдвиговую прочность в плоскости слоя.

Анализ результатов

Обобщённые результаты испытаний вырезанных из трёх пластин образцов с дефектами и без них приведены в табл. 1.

Испытаниями показано, что наличие дефектных слоёв в наибольшей степени сказывается на пределе прочности при растяжении. Зависимость отношения пределов прочности образцов с дефектами к пределу прочности бездефектных образцов (σ_v^* и σ_v – предел прочности образцов с дефектами волокна и без них) приведена на рис.26.

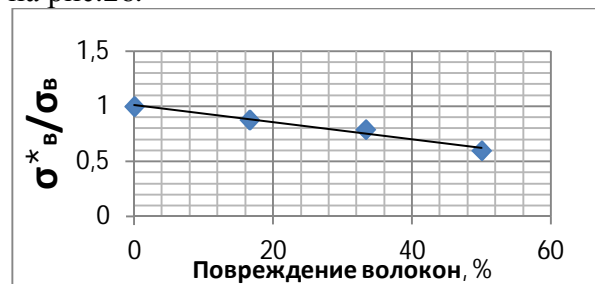


Рис. 26. Зависимость предела прочности при растяжении от процентного содержания дефектных волокон

В испытаниях на растяжение дефектных и бездефектных образцов обнаружено не только отличие в величине

пределных напряжений, но и в самом характере разрушения. На рис. 27 видны некоторые различия в характере разрушения образцов в зависимости от степени повреждения.



Рис. 27. Фотографии разрушенных образцов с различным содержанием дефектных слоёв ткани (снизу - вверх: 50%, 33,3%, 16,6%, 0% повреждённых волокон)

Бездефектные образцы разрушались с одновременным расслоением и разрыхлением материала в области разрушения. Область расслоения материала снижалась по мере увеличения дефектных слоёв. Образцы с 50% содержанием повреждённых

ных слоёв ткани разрушались хрупко без видимого расслоения материала.

1. Заключение

Для обеспечения надёжности изделий из КМ важной технической задачей является установление опасных типов дефектов, допустимых их величин и разработки способов их обнаружения.

Совокупное применение различных методов НК необходимо для обнаружения присущих КМ многообразных типов технологических дефектов.

Дефектоскопия является неотъемлемой частью технологии переработки композиционных материалов в изделия.

Испытания образцов с искусственно нанесёнными повреждениями волокон показали существенное их влияние на характеристики прочности при растяжении и модуль сдвига в плоскости слоя. Влияние возможных дефектов волокон на механические характеристики следует учитывать при проектировании изделий из КМ.

Библиографический список

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М: Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Karabutov A.A., Kershtein I.M., Pelivanov I.M., Podymova N.B. Laser ultrasonic investigation of the elastic properties of unidirectional graphite-epoxy composites // *Mechanics of Composite materials*. 1998. V. 34, no. 6. P. 575-582.
3. Wu T.-T., Liu Y.-H. One the measurement of anisotropic elastic constants of fiber reinforced composite plate using ultrasonic bulk wave and laser generated Lamb wave // *Ultrasonics*. 1999. V. 37, no. 6. P. 405-412.
4. Вайнберг Э.И., Вайнберг И.А. Универсальные компьютерные томографы для отработки технологии и сертификации отечественных промышленных изделий. Критерии выбора // *Двигатель*. 2011. № 4 (76). С. 22-27

Информация об авторах

Каримбаев Тельман Джамалдинович, доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова, г. Москва. E-mail: karymbayev@ciam.ru. Область научных интересов: конструкционная прочность керамических и композиционных материалов.

Пальчиков Денис Сергеевич, инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова, г. Москва. E-mail: palchikov@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: конструкционная прочность керамических и композиционных материалов.

**NON-DESTRUCTIVE TESTING OF AIRCRAFT ENGINE PARTS
MADE OF COMPOSITE MATERIALS.
IDENTIFYING THE LIMITS OF ACCEPTABLE DEFECTS**

©2014 T.D. Karimbayev, D.S. Palchikov

Baranov Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation

An important engineering challenge of providing the reliability of products made of composite materials (CM) is the identification of dangerous types of defects, their permissible values and developing techniques for their detection. A set of techniques of non-destructive testing (NDT) is presented as applied to the problem of monitoring and identification of the acceptable limits of technological defects of aircraft engine parts made of composite materials. The paper also includes experimental tests aimed at determining the effect of a fiber defect on the mechanical characteristics of a polymer composite material. Joint use of different NDT techniques is necessary for the detection of multiple types of technological defects typical for CMs. Defect detection is an integral part of the processing of composite materials into products. Test samples with artificially damaged fibers show their significant influence on tensile strength characteristics and shear modulus in the plane of the layer. The effect of possible defects on the mechanical characteristics of fiber should be considered when designing CM products.

Nondestructive testing, laser-ultrasonic testing, infrared thermography, X-ray tomography, defect, allowable damage rate.

References

1. Yermolov I.N., Lange Yu.V. Nerazrushayushchiy kontrol'. T. 3. Ul'trazvukovoy kontrol' [Non-destructive testing. T. 3. Ultrasonic testing]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2004. 864 p.
2. Karabutov A.A., Kershtein I.M., Pelivanov I.M., Podymova N.B. Laser ultrasonic investigation of the elastic properties of unidirectional graphite-epoxy composites // Mechanics of composite materials. 1998. V. 34, no. 6. P. 575-582.
3. Wu T.-T., Liu Y.-H. One the measurement of anisotropic elastic constants of fiber reinforced composite plate using ultrasonic bulk wave and laser generated Lamb wave // Ultrasonics. 1999. V. 37, no. 6. P. 405-412.
4. Weinberg E.I., Weinberg И.А. Universal computer tomography for the development of technology and certification of industrial products. Selection Criteria // Dvigatel'. 2011. No. 4(76). P. 22-27. (In Russ.)

About the authors

Karymbayev Telman Djalmaldinovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department, Central Institute of Aviation Motors named after Baranov P.I., Moscow. E-mail: karymbayev@ciam.ru. Area of Research: structural strength of ceramic and composite materials.

Palchikov Denis Sergeevich, engineer, Central Institute of Aviation Motors named after Baranov P.I., Moscow. E-mail: palchikov@rtc.ciam.ru. Area of Research: structural strength of ceramic and composite materials.