

УДК 620.1

ВЛИЯНИЕ ПЕРВИЧНЫХ РАЗРУШЕНИЙ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

Басов Ф.А., Иванов А.И.

Филиал ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Согласно нормам прочности для авиационных конструкций, любые разрушения при эксплуатационных нагрузках недопустимы. Поэтому при расчетах необходимо принимать во внимание первичные разрушения матрицы. Основной задачей данной работы было исследование первичных разрушений в образцах из углепластика. Образцы были изготовлены из углепластика марки ВКУ-30. Этот материал показал относительно высокую трещиностойкость по сравнению с остальными композиционными материалами. Было изготовлено две панели с двумя различными укладками. Из каждой панели была вырезана партия образцов для последующих испытаний. После определения максимальной разрушающей нагрузки все остальные образцы были разделены на две группы. Первая группа была контрольной, вторая подвергалась нагружению на растяжение до 89% от разрушающей нагрузки. Все образцы подвергались неразрушающему контролю с помощью лазерно-ультразвукового метода до и после испытаний, а также до и после механической обработки. Затем (после нагружения на растяжение до 89% от разрушающей нагрузки) другие образцы, из двух групп, были вырезаны для испытаний на сжатие и межслоевой сдвиг, кроме образцов, подвергнутых микроскопии. Микроскопические исследования не выявили микроповреждений их структуры. Вырезанные образцы были нагружены до разрушения. Также не было обнаружено значительной разницы между результатами испытаний двух групп.

Ключевые слова: допустимые напряжения; первичные разрушения матрицы

INITIAL MATRIX CRACKING INFLUENCE ON LOAD-CARRYING ABILITY OF CARBON FIBER SPECIMENS

Basov F.A., Ivanov A.I.

PSC "Company" Sukhoi" "EDB Sukhoi", Moskva, Russia

ABSTRACT

The airworthiness requirements specify that ultimate loads be carried by the structure without failure. That is why one must take into account initial matrix cracking. The primary aim of this work was investigation of initial matrix cracking in carbon fiber specimens. The specimens were made from carbon fiber composite material VKU-30. This material has shown relatively good toughness as compared with other composite materials. Two panels with different layups were made. A batch of specimens for test program was made from each panel. After definition of the ultimate tensile load all of the remaining specimens were divided into two groups. The first group was for reference samples, the second one was for loading in tension under 89% of tension fracture load. Each of these specimens was subjected to contact laser ultrasonic evaluation before and after test and also before and after machining. Then (after tension loading under 89% of tension fracture load) the other specimens from two groups were cut out for compression strength test and short-beam strength test except specimens which were

subjected to microscopy. No initiation of interlaminar cracking was detected by the instrumentality of microscopy. Cutout specimens were loaded to failure. Also no considerable result differentials between two groups were revealed.

Keywords: allowable stress; initial matrix cracking

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее острых вопросов расчёта полимерных композиционных материалов (ПКМ) является определение допустимых напряжений. Допустимые напряжения ниже расчетных напряжений вследствие наличия понижающих коэффициентов. Несмотря на то, что накопление повреждений в волокнистых полимерных композитах происходит на всех структурных уровнях [1], свои ограничения на значение допустимых напряжений накладывают первичные разрушения (напряжения при которых разрушается матрица в поперечных слоях). В общем, растрескивание матрицы не ведет к разрушению ПКМ [2], но, согласно нормам прочности для авиационных конструкций, любые разрушения при эксплуатационных нагрузках недопустимы. Поэтому при расчёте допустимых напряжений необходимо учитывать и первичные разрушения, применяя системный подход для того, чтобы быть уверенным в правильности расчетов [3]. Несмотря на обилие работ по тематике первичных разрушений в ПКМ, невозможно теоретически принять во внимание все параметры и промоделировать их влияние на поведение материала [4]. Обеспечение требуемого ресурса изделий возможно только при осуществлении в лабораторных условиях широкого экспериментального моделирования по изучению влияния различных технологических, конструктивных, эксплуатационных факторов на характеристики статической прочности и усталостной долговечности элементов конструкций их ПКМ [5]. Поэтому, целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование первичных разрушений и предварительная оценка их влияния на остаточную прочность образцов.

На первом этапе данной работы были проведены предварительные исследования образования первичных разрушений и их влияния на остаточную прочность образцов. Исследованию подлежали образцы из углепластика ВКУ-17УОЛ на базе связующего ВСК-14-3 (эпоксидной клеевой композиции, включающей эпоксидную основу и отвердитель) толщиной 9,64 мм, со сложной укладкой, соответствующей рабочей конструкции. Образцы испытывались на трехточечный изгиб (нестандартные испытания) и межслоевой сдвиг по ОСТ 90199-75. Образцы для испытаний на трехточечный изгиб имели габариты 150×18×9,64 мм; расстояние между опорами составляло 130 мм. Образцы для испытаний на межслоевой сдвиг имели габариты 54×18×8,98 мм; расстояние между опорами составляло 36 мм.

Все образцы до и после испытаний проходили неразрушающий контроль лазерно-акустическим методом. Микроскопические исследования образцов, нагруженных до 95% от разрушающей нагрузки, не выявили наличия микротрещин (первичных разрушений). Одновременно с данной работой специалистами «ОКБ Сухого» совместно со специалистами ФГУП «СибНИА» были проведены исследования, которые показали относительно высокую трещиностойкость связующего ВСК-14-3 [5,6]. Проведенные исследования выявили необходимость более тщательных изысканий в данном направлении. Целью следующей работы было выявление первичных разрушений в образцах

из углепластика ВКУ-30К.Р14535 (далее ВКУ-30) и их влияния на несущую способность образцов.

1. АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы из углепластика ВКУ-30 изготавливались с 2-мя различными типами укладок:

- со следующим процентным содержанием слоев: $0^\circ - 40\%$, $\pm 45^\circ - 40\%$, $90^\circ - 20\%$ (далее укладка (40/40/20));
- ортогональная, со следующим процентным содержанием слоев: $0^\circ - 50\%$, $90^\circ - 50\%$ (далее укладка (50/0/50)).

Толщина образцов с укладкой (40/40/20) составляла 7,14 мм. Толщина образцов с укладкой (50/0/50) составляла 4,2 мм. Расчет укладки (40/40/20) программой «АСПР» [7] показал, что при растяжении вдоль оси X первичные разрушения наступают при 59% от разрушающей нагрузки. Для того чтобы избежать разрушения всех образцов (что при испытании части образцов наблюдалось на первом этапе работы), но при этом подвергнуть их максимальному нагружению, было принято экспертное решение проводить испытания на статическое растяжение до 89% от разрушающей нагрузки. Все образцы с идентичной укладкой, в том числе и для определения разрушающей нагрузки, были вырезаны из одной панели.

Затем из этих образцов были вырезаны образцы для определения остаточных пределов прочности на межслоевой сдвиг и статическое сжатие (основная группа). Из той же панели, что и основные образцы, вырезались контрольные образцы (контрольная группа) для определения пределов прочности на межслоевой сдвиг и статическое сжатие. Контрольные образцы не нагружались предварительно статическим растяжением. Результаты испытаний основных и контрольных образцов сравнивались. Часть образцов подвергалась микроскопическим исследованиям. С целью минимизации влияния климатических и других подобных факторов на состояние образцов, все одинаковые испытания основных и контрольных образцов проводились без значительных временных интервалов между испытаниями двух групп. Общий алгоритм проведения испытаний приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий алгоритм проведения испытаний.

Все образцы до и после испытаний (если образцы не разрушались), а также до и после механической обработки проходили неразрушающий контроль с помощью лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М, обладающего повышенной разрешающей способностью и чувствительностью.

Конфигурация образцов представлена на рис.2. Основное различие образцов с разными типами укладок состояло в том, что образцы для сравнительных испытаний в случае укладки (40/40/20) вырезались вдоль, а в случае укладки (50/0/50) поперек (рис.2).

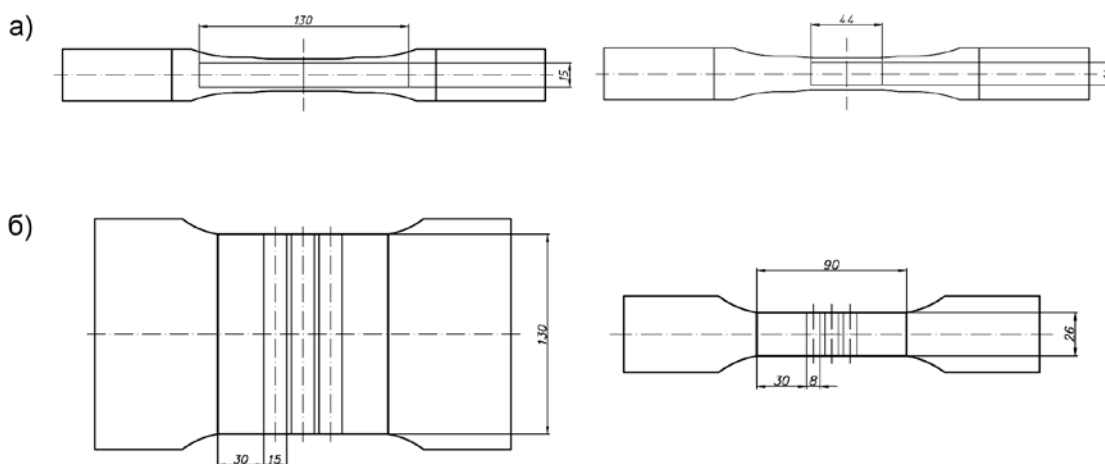


Рис.2. Конфигурация образцов для испытаний: а) образцы с укладкой (40/40/20); б) образцы с укладкой (50/0/50).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

На первом этапе испытаний была определена разрушающая нагрузка при растяжении для образцов с укладками (40/40/20) и (50/0/50). База испытаний составляла 20 образцов. Затем, в соответствии с методикой, описанной выше, последовательно проводились все остальные испытания. Сравнительные испытания образцов проводились на сжатие по ГОСТ 25.602 и межслоевой сдвиг по ASTM D2344. Данные виды испытаний были выбраны по двум причинам. Во-первых, на результаты испытаний на сжатие и межслоевой сдвиг значительно влияет состояние матрицы ПКМ. Во-вторых, образцы для этих испытаний имеют малые габариты, что позволило их «разместить» в рабочей части образцов на предварительное растяжение (рис.2).

Результаты испытаний образцов приведены в таблицах 1, 2. Доверительные интервалы рассчитаны с доверительной вероятностью 0,95. В последнем столбце показано отношение средней разрушающей нагрузки основной группы образцов к средней разрушающей нагрузке контрольной группы образцов. Как видно из результатов испытаний, для обоих типов укладок падение прочности при испытаниях предварительно нагруженных образцов составляет не более 10%, что лежит в пределах общепринятой допустимой погрешности для ПКМ. Также следует отметить, что доверительные интервалы образцов контрольной и основной групп перекрывают друг друга.

Неразрушающий контроль образцов лазерно-акустическим методом не выявил дефектов их структуры.

Таблица 1.

Результаты испытаний образцов на межслоевой сдвиг.

Вид первичного нагружения (уровень нагрузки)	Укладка	Кол-во образцов	$P_{\text{разр}}, \text{Н}$	$P_{\text{разр}}/P_{\text{разр}}^{\text{к}}, \%$
нет	СЧФ	10	9770 ± 773	100
Статическое нагружение (89%)	СЧФ	9	8772 ± 587	90
нет	$[0^\circ/90^\circ]$	15	2722 ± 209	100
Статическое нагружение (89%)	$[0^\circ/90^\circ]$	15	2862 ± 355	105

Таблица 2.

Результаты испытаний образцов на статическое сжатие.

Вид первичного нагружения (уровень нагрузки)	Укладка	Кол-во образцов	$P_{\text{разр}}, \text{Н}$	$P_{\text{разр}}/P_{\text{разр}}^{\text{к}}, \%$
нет	$[0^\circ/90^\circ]$	15	39358 ± 2184	100
Статическое нагружение (90%)	$[0^\circ/90^\circ]$	15	35760 ± 1764	91
нет	СЧФ	10	82593 ± 3521	100
Статическое нагружение (89%)	СЧФ	10	81909 ± 4493	99

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис.3 представлена фотография поверхности шлифа в центральной области образца, после предварительного статического растяжения до 89% от разрушающей нагрузки, при увеличении 500-х.

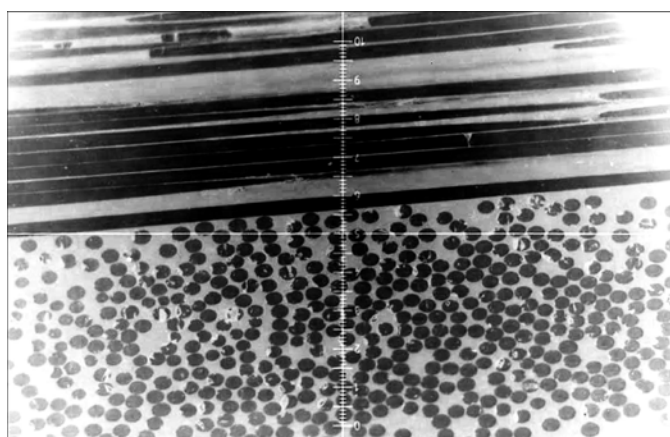


Рис.3. Фотография поверхности шлифа в центральной области образца, после предварительного статического растяжения до 89% от разрушающей нагрузки, при увеличении 500-х (инвертированное изображение).

Микроскопическим исследованиям подлежали шлифы, вырезанные из средней части образца. Плоскость исследования располагалась поперек образца и отстояла от середины образца не более чем на 5 мм. Исследование (сканирование) образца проводилось при увеличении 200-х. При подозрениях на наличие микроповреждений исследование образца проводилось при увеличении 500-х.

Для микроскопических исследований были выбраны: образцы, не подвергавшиеся нагружению и образцы, нагруженные статическим растяжением до 89% от разрушающей нагрузки. Микроскопические исследования всех образцов не выявили микроповреждений их структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

а) Падение прочности при испытаниях предварительно нагруженных образцов (до нагрузки, составляющей до 89% от разрушающей) составляет не более 10%, что лежит в пределах общепринятой допустимой погрешности для ПКМ. Доверительные интервалы образцов контрольной и основной групп перекрывают друг друга. Следует особо отметить, что данный вывод справедлив лишь для одноосного предварительного статического растяжения вдоль оси X.

б) Микроскопические исследования предварительно нагруженных образцов не выявили микроповреждений структуры.

К недостаткам работы следует отнести то, что относительно низкое качество шлифов, не позволило провести микроскопические исследования при увеличении более 500-х.

Отсутствие прогнозируемых микроповреждений в матрице может быть обусловлено уникальными характеристиками клеевого связующего ВСК-14-3 [8,9]. Результаты испытаний в «ОКБ Сухого» и ФГУП «СибНИА» образцов из ПКМ, на основе данного связующего, подтверждают их относительно высокую трещиностойкость [5,6]. В связи с этим большой интерес вызывает проведение испытаний образцов, изготовленных из углепластиков на основе разных типов связующих.

Для уточнения методик расчета конструкций из ПКМ на основании оценки снижения прочности предварительно нагруженных образцов потребуется проведение исследований с большим количеством образцов и с разными видами нагружения. При этом наибольший акцент следует сделать на испытаниях образцов циклическим нагружением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перепелкин К.В. *Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты*. – М.: НОТ, 2015. – 380 с.
2. Kollár L.P., Springer G.S. *Mechanics of Composite Structures*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2003. – 500 p.
3. Dimitrov N., Friis-Hansen P., Berggreen C. *Enforcing a system approach to composite failure criteria for reliability analysis / 18th Intern. Conf. on Composite Materials (ICCM)*. Electronic publication. South Korea, Jeju International Convention Center, 2011.

4. Vassilopoulos A.P., Keller T. *Fatigue of Fiber-reinforced Composites*. Springer-Verlag London Limited, 2011.
5. Рудзей Г.Ф., Калюта А.А., Чаплыгин В.Н., Иванов А.И., Лапшина Т.В. *Оценка влияния конструктивных и технологических факторов на механические характеристики образцов из ПКМ // Авиационная промышленность*. – 2015. – №4. – С.32-35.
6. Рудзей Г.Ф., Калюта А.А., Фролова В.А., Иванов А.И., Яшков М.В. *Исследование механических характеристик образцов из углепластиков с учётом процессов старения // Конструкции из композиционных материалов*. – 2016. – №1. – С.56-61.
7. Андриенко В.М., Сухобокова Г.П. *Методика расчета упругих и прочностных характеристик слоистых гибридных КМ (ТКЭ-350)*. – М.: ЦАГИ, 1991.
8. Каблов Е.Н., Минаков В.Т., Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Аниховская Л.И., Хайретдинов Р.Х., Виноградова Н.В., Барзова Л.С., Бочарова Л.И., Панкратова С.П., Батизат Д.В. *Эпоксидная клеевая композиция, препрег на ее основе и изделие, выполненное из него / Патент РФ № 2230764 от 12.03.2003*.
9. Морозов Б.Б., Филатов А.А. *Особенности изготовления деталей из углепластика ВКУ-30К.Р14535, имеющих сложную внутреннюю структуру // Конф. «Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники». Сборник материалов. Научное электронное издание локального распространения*. – Москва, 2015.

REFERENCES

1. Perepelkin K.V. *Armiruiushchie volokna i voloknistye polimernye kompozity [Reinforcing filaments and fibrous polymer composites]*. Moskva, NOT, 2015, 380 p.
2. Kollár L.P., Springer G.S. *Mechanics of Composite Structures*. Cambridge University Press, 2003.
3. Dimitrov N., Friis-Hansen P., Berggreen C. *Enforcing a system approach to composite failure criteria for reliability analysis*. 18th Intern. Conf. on Composite Materials (ICCM). Electronic publication. South Korea, Jeju International Convention Center, 2011.
4. Vassilopoulos A.P., Keller T. *Fatigue of Fiber-reinforced Composites*. Springer-Verlag London Limited, 2011.
5. Rudzei G.F., Kaliuta A.A., Chaplygin V.N., Ivanov A.I., Lapshina T.V. *Otsenka vliianiia konstruktivnykh i tekhnologicheskikh faktorov na mekhanicheskie kharakteristiki obraztsov iz PKM [Evaluation of the influence constructive and technology factors on the mechanical characteristics of samples from polymeric composite materials]*. *Aviatsionnaia promyshlennost'*, 2015, No.4, Pp.32-35.
6. Rudzei G.F., Kaliuta A.A., Frolova V.A., Ivanov A.I., Iashkov M.V. *Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik obraztsov iz ugleplastikov s uchetom protsessov stareniiia [Research of mechanical characteristics of samples of carbon fiberin view of the aging process]*. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2016, No.1, Pp.56-61.
7. Andrienko V.M., Sukhobokova G.P. *Metodika rascheta uprugikh i prochnostnykh kharakteristik sloistykh gibridnykh КМ (ТКЭ-350)[Analysis procedure of laminated hybrid CM characteristics (ТКЭ-350)]*. Moskva, TsAGI, 1991.

8. Kablov E.N., Minakov V.T., Dement'eva L.A., Serezhenkov A.A., Anikhovskaia L.I., Khairetdinov R.Kh., Vinogradova N.V., Barzova L.S., Bocharova L.I., Pankratova S.P., Batizat D.V. *Эпоксидная клеваая композиция, prepreg на ее основе и изделие, выполненное из него [Epoxide glue compound, prepreg based on it and product made of it]*. Patent RF № 2230764 от 12.03.2003.
9. Morozov B.B., Filatov A.A. *Особенности изготовления детали из углепластика VKU-30K.R14535, имеющей сложную внутреннюю структуру [Complex parts made of carbon fiber composite VKU-30K.R14535 manufacturing features]*. Конференция «Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники», Сbornik materialov, Nauchnoe elektronnoe izdanie lokal'nogo rasprostraneniia, Moskva, 2015.

Поступила в редакцию 19 декабря 2016 года

Сведения об авторах:

Басов Федор Александрович – к.т.н., вед. инж. отд. филиала ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», г. Москва, Россия, e-mail: okbsu@yandex.ru

Иванов Алексей Ильич – нач. отд. филиала ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», г. Москва, Россия, e-mail: sohaty2004@mail.ru