



Изменение упругих характеристик углепластика, как результат усталостного повреждения

М.Ш.Нихамкин, Д.Г.Соломонов, Н.А.Саженов

Аннотация. Слоистые углепластики все чаще используются в нагруженных элементах самолетов, кораблей и т.д. Важным требованием к таким конструкциям является усталостная прочность.

Деградация материала вследствие постепенного накопления усталостных повреждений сопровождается снижением жесткости. Снижение жесткости при усталостных повреждениях может привести к изменению собственных частот конструкций. Целью данного исследования является получение экспериментальных данных об изменении упругих характеристик слоистого углепластика в результате прогрессирующего усталостного повреждения. В качестве исследуемых характеристик ламината рассматриваются четыре параметра упругости монослоя. Эти характеристики широко используются в моделях прочности и долговечности ламината.

Методика исследования основана на экспериментальном изучении собственных частот колебаний образцов при их усталостных испытаниях. Испытания на усталость образцов проводятся при циклическом растяжении с сохранением постоянной амплитуды и среднего значения нагрузки. Модальные испытания проводились с помощью сканирующей лазерной виброметрии. Определение указанных выше четырех упругих параметров монослоя рассматривается как обратная задача идентификации по результатам модальных испытаний. Получены зависимости указанных упругих характеристик от относительной усталостной долговечности.



ВВЕДЕНИЕ



Многослойные угле- и стеклопластики все чаще используются в высоконагруженных конструкциях самолетов, кораблей, ветряных турбин, космических аппаратов. Высокая устойчивость к усталостному разрушению таких конструкций при циклических нагрузках является существенным требованием [1]. Многочисленные исследования усталостного разрушения показали, что постепенное накопление усталостных повреждений сопровождается снижением жесткости материала. Этот эффект неоднократно предлагалось использовать для прогнозирования усталостной долговечности композитных деталей.



Снижение жесткости при усталостных повреждениях косвенно проявляется в изменении модальных характеристик (в частности, собственных частот) конструкций и образцов. Этот эффект наблюдается как в случае металлов, так и в случае композиционных материалов, как это показано в исследованиях [2-6]. Проведение усталостного испытания на резонансных машинах является простейшим способом определения собственной частоты [6], но дает только одну собственную частоту. Испытание на усталость прерывалось при различных значениях относительной усталостной наработки (N/N_f , где N - текущее число циклов нагружения, а N_f - общее число циклов до разрушения). Каждый раз проводились модальные испытания с целью выявления изменения модальных параметров. Изменения собственных частот образцов при проведении усталостных испытаний экспериментально выявлены для композитов, армированных углеродным волокном [2] и композитов, армированных стекловолокном [6].



ВВЕДЕНИЕ



Значительное снижение (до 30%) изгибной жесткости образцов из ортотропного и квазиизотропного ламината было экспериментально обнаружено авторами [7]. Исследования [8-12] содержат экспериментальные данные об изменении характеристик упругости (только одного модуля Юнга) композиционных материалов при усталостных повреждениях. Результаты показывают небольшое падение модуля Юнга на первой стадии усталости, за которой следует стадия со стабильным медленным снижением E/E_0 (E - текущий модуль Юнга, E_0 - его начальное значение) до стадии его резкого падения и конечной деструкции. Авторами [9] предложена эмпирическая формула, описывающая отношение E/E_0 от N/N_f . Авторы [1, 12] отмечают, что коэффициент Пуассона более чувствителен к усталостному повреждению, чем модуль Юнга.

Целью настоящей статьи является разработка методики и получение экспериментальных данных по снижению упругих характеристик монослоя, армированного волокнами ламината, в результате развития усталостных повреждений. Особенностью является то, что исследован не только один модуль Юнга, но все четыре характеристики упругости монослоя ламината (два модуля Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона). Соответствующие возможности для этого дает использование лазерной виброметрии при проведении экспериментального модального анализа.



МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА



Методика исследования состоит из двух этапов. На первом этапе экспериментально получены собственные частоты и собственные формы колебаний образцов при их усталостных испытаниях. Определена зависимость собственных частот от числа циклов нагружения. На втором этапе полученные собственные частоты используются для решения обратной задачи идентификации указанных выше четырех параметров упругости монослоя ламината.

Объектом исследования является полимерный композиционный материал, армированный тканью и состоящий из по-разному ориентированных идентичных слоев (ламинат). Образцы для испытаний представляют собой тонкие вырезанные из ламината пластины длиной 250 и шириной 25 мм (рис. 1). Такие образцы рекомендованы стандартом ASTM для испытаний на усталость полимерных композитов [13]. Исследуемые образцы были вырезаны из углепластиковой пластины, армированной равнопрочной тканью. Схема укладки $[0/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/90/-45/0]$. Толщина образца 3,6 мм, вес 35 г.

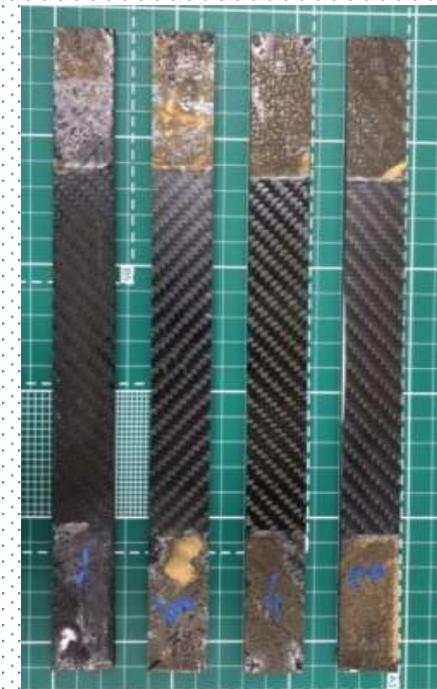


Рисунок 1. Исследуемые образцы

Образцы подвергались усталостным испытаниям. Методика испытаний основана на требованиях стандарта [13]. Она предусматривает проведение испытаний при циклическом растяжении с сохранением постоянной амплитуды и среднего значения нагрузки. Использована электрорезонансная усталостная машина Zwick Amsler HFP 5100 [14, 15]. При проведении усталостных испытаний были реализованы следующие параметры нагрузки: коэффициент асимметрии $R=0,1$, температура 200С. Амплитуда переменного напряжения для исследуемых образцов была на 15-30% выше предела усталости. Нарботка до разрушения образцов N_f в этих условиях составила 0,9 – 2,5 млн. циклов. Испытания на усталость прекращались после появления видимых трещинили отслоений в образце.



МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА



Первое модальное испытание каждого образца было проведено до испытаний на усталость. Затем испытание образца на усталость несколько раз останавливалось для проведения модальных испытаний. Модальные испытания проводились методом сканирующей лазерной виброметрии с использованием лазерного виброметра PSV-400-3D [16-17]. Основным преимуществом методики является бесконтактное измерение и возможность с высокой точностью находить большое количество собственных форм и частот колебаний. Образец подвешивался на жесткую раму на тонких эластичных нитях (рис. 2). Его колебания возбуждали акустическим динамиком. Он создавал акустическую нагрузку, которая изменялась во времени по гармоническому закону с непрерывно возрастающей частотой от 0 до 6400 Гц. Сетка сканирования включала 165 узлов. Для каждого образца было проведено как минимум три испытания.

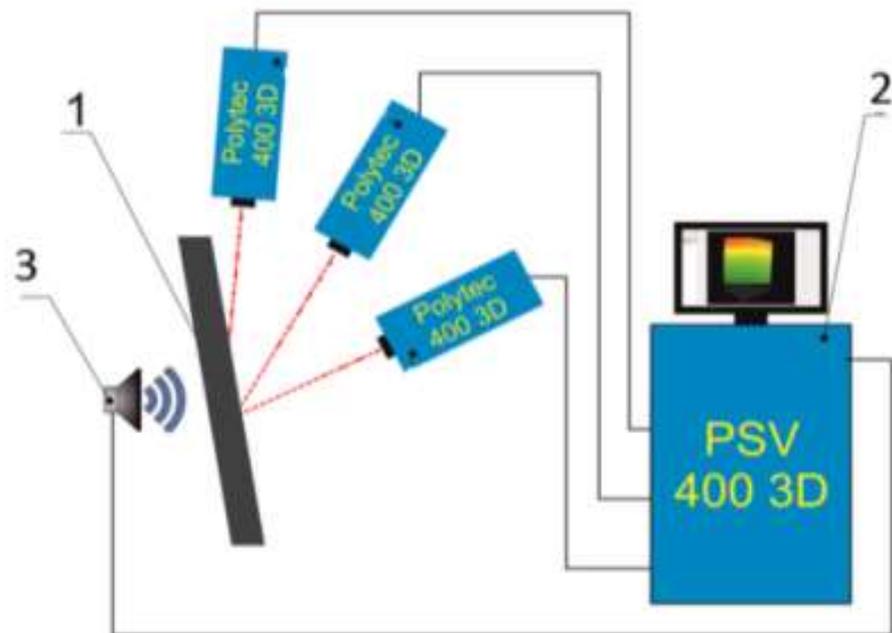


Рисунок 2. Экспериментальная установка: 1 - образец, 2 - лазерный виброметр, 3 - акустический динамик



МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА



Четыре параметра характеризуют упругие свойства монослоя ламината, армированного волокнами:

$$\mathbf{E} = [E_{11}, E_{22}, G_{12}, \nu_{12}]^T$$

где \mathbf{E} – вектор идентифицируемых параметров, E_{11} и E_{22} – Юнга в направлении основы и утка армирующей ткани в монослое ламината, G_{12} – модуль сдвига, ν_{12} – коэффициент Пуассона, индекс T означает операцию транспонирования. Каждый параметр упругости монослоя был получен на каждом уровне усталостной долговечности как функция безразмерных значений числа циклов.

Определение этих параметров рассматривается в данном исследовании как обратная задача идентификации по результатам модальных тестов. В рамках этого подхода была использована смешанная численная экспериментальная методика [18-21]. Она включает оптимизационную процедуру идентификации математической модели образца по экспериментальным данным о его собственных частотах. Оптимизация осуществляется путем выбора характеристик упругости \mathbf{E} , обеспечивающих минимальное расхождение между набором m вычисленных и экспериментальных собственных частот (f_{ci} и f_{ei}) с весовыми коэффициентами α_i :

$$I(\mathbf{E}) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \left(\frac{f_{ci}(\mathbf{E}) - f_{ei}}{f_{ei}} \right)^2 \rightarrow \min$$

В процессе оптимизации вычисленные значения собственных частот f_{ei} определялись методом конечных элементов из решения задачи собственных значений:

$$\det[[K] - \omega^2[M]] = 0$$

Здесь $[K]$ и $[M]$ – матрицы жесткости и массы; матрица жесткости включает в себя идентифицируемые характеристики упругости, входящие в вектор \mathbf{E} .

Более подробно методика описана в [20, 21]. Как показано в [20, 21], описанный метод определения характеристик упругости обеспечивает погрешность определения модуля Юнга в пределах 1%, модуля сдвига и коэффициента Пуассона в пределах 5%.



РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ



Сначала модальные испытания образцов были проведены до испытания на усталость. Был исследован диапазон частот до 5000 Гц и найдено 8 собственных форм колебаний. Собственные формы и соответствующие собственные частоты для одного из исследуемых образцов до проведения усталостного испытания приведены в таблице 1. Собственные моды формы других образцов те же, что и в Таблице 1.

Таблица 1. Собственные частоты и собственные формы колебаний для одного из исследуемых образцов

i	Собственные формы	Собственные частоты f_{i0} , Гц		i	Собственные формы	Собственные частоты f_{i0} , Гц
1		319		5		2791
2		874		6		3146
3		1557		7		4137
4		1702		8		4787



РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ



Испытания на усталость каждого образца несколько раз останавливались для проведения модального испытания. Последний раз модальное испытание проводилось после окончания усталостных испытаний, $N/N_f = 1$. Было обнаружено незначительное снижение всех исследованных собственных частот при увеличении числа циклов нагружения. На рисунке 3 показано типичное изменение собственных частот образца во время проведения усталостного испытания. Все исследуемые собственные частоты постепенно уменьшаются в ходе испытания на 4-6%. Снижение собственных частот объясняется снижением жесткости материала вследствие накопления усталостных повреждений. Представленные экспериментальные данные о снижении собственных частот образцов согласуются с данными, представленными в [2, 3].

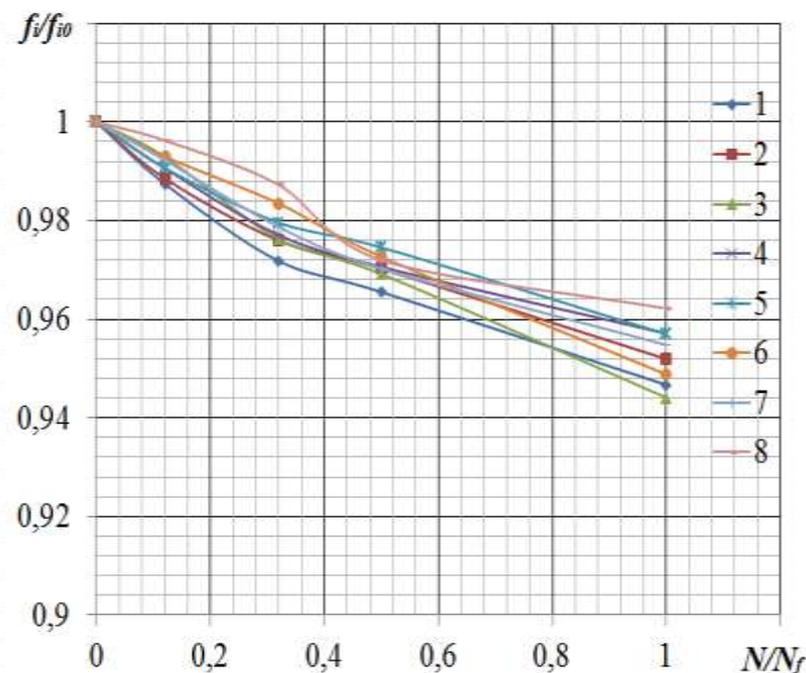


Рисунок 3. Типичная зависимость отношения f_i/f_{i0} от относительной усталостной наработки N/N_f для одного из образцов. $i=1-8$ – номер собственной частоты.



РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

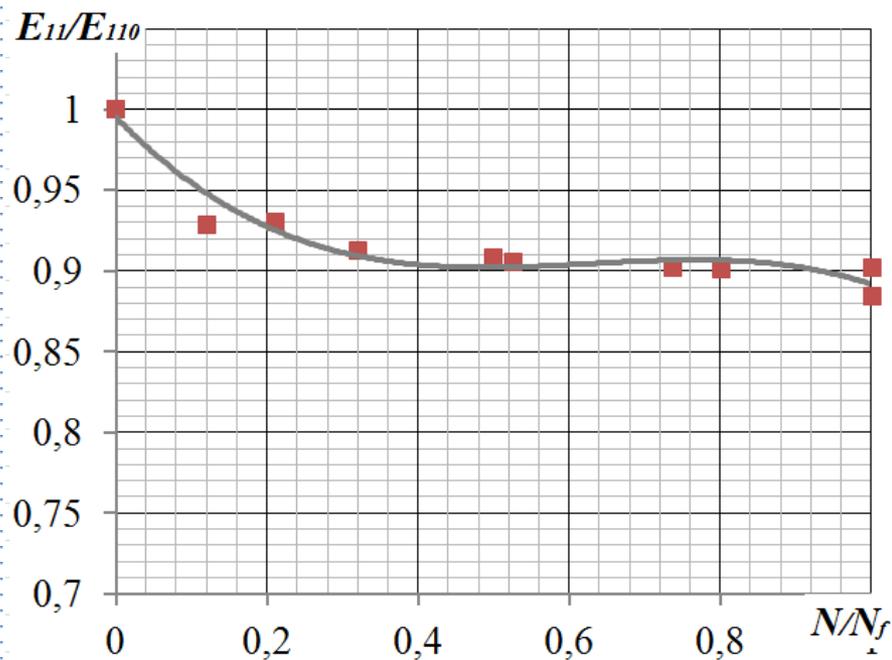


Рисунок 4. Зависимость отношения E_{11}/E_{110} от относительной усталостной наработки N/N_f для исследованных образцов.

Описанное изменение собственных частот образцов при проведении усталостных испытаний соответствует снижению упругих характеристик монослоя. Например, при усталостной долговечности 2,5 млн. циклов модуль Юнга E_{11} снижается на 10%. На рис. 4 показано снижение модуля Юнга E_{11} во время усталостных испытаний. На графике приведены данные, полученные для набора исследуемых образцов, различных усталостных нагрузок и различной усталостной наработки. Видно, что все точки лежат на одной кривой, независимо от амплитуды напряжений. Это подтверждает, что относительное снижение характеристик упругости монослоя определяется не величиной напряжений, а накопленными усталостными повреждениями.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ



В настоящей работе получены экспериментальные данные об изменении характеристик упругости слоистого углепластика в результате накопления усталостных повреждений. Проанализированы характеристики монослоя ламината: два модуля упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона. Получены зависимости относительного снижения характеристик упругости монослоя от относительной усталостной наработки. Эти зависимости количественно описывают накопление усталостных повреждений.

Описанные в работе экспериментальные данные могут быть использованы в математических моделях и методах оценки усталостной долговечности деталей из углепластиков. Разработанная методика может быть использована для получения аналогичных данных для других слоистых композитов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Представленное исследование было частично поддержано Правительством Пермского края, исследовательский проект № С-26/790 от 21.12.2017г.



ЛИТЕРАТУРА



1. Kelly A. The engineering triumph of carbon fibre. *Composites and nanostructures*, 2009, №1, pp. 38 – 49.
2. Kulkarni P.V., Sawant P.J., Kulkarni V.V. Fatigue life prediction and modal analysis of carbon fiber reinforced composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*. V.4. (2018). Issue 4. Pp. 651-659.
3. Abo-Elkhier M., Hamada A.A. El-Deen B. Prediction of fatigue life of glass fiber reinforced polyester composites using modal testing. *International Journal of Fatigue*. 69 (2014). Pp.28–35.
4. Giannoccaro N.I., Messina A., R.Nobile, Panella F.W. Fatigue damage evaluation of notched specimens through resonance and anti-resonance data. *Engineering Failure Analysis*. V. 13. Issue 3. 2006. Pp. 340-352.
5. Wang J., Tan N., Zhou S., Sun Q. Experimental Study on High-Cycle Fatigue Behavior of GFRP-Steel Sleeve Composite Cross Arms. *Advances in Civil Engineering*. 2018, Article ID 6346080, 12 p.
6. Cesnik M., Slavic J., Boltezar M. Uninterrupted and accelerated vibrational fatigue testing with simultaneous monitoring of the natural frequency and damping. *Journal of Sound and Vibration*. V. 331 (2012). Pp. 5370-5382.
7. Michel S.A., Kieselbach R., Martens H.J. Fatigue strength of carbon fibre composites up to the gigacycle regime (gigacycle-composites). *International Journal of Fatigue*. V.28 (2006). Pp.261–270.
8. Reis P.N.B., Ferreira J.A.M., Costa J.D.M., Richardson M.O.W. Fatigue life evaluation for carbon/epoxy laminate composites under constant and variable block loading *Composites Science and Technology*. V. 69 (2009). Pp.154–160.
9. Patel A.G., Shah D.S., Patel D.C. A review of progressive damage analysis and fatigue life prediction for degraded e-glass FRP material. *International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science*. V.4 (2018). Issue 12. Pp. 295 -299.
10. Karahana M., Lomov S.V., Bogdanovich A.E., Verpoesta I. Fatigue tensile behavior of carbon/epoxy composite reinforced with non-crimp 3D orthogonal woven fabric. *Composites Science and Technology*. V.71, Issue 16. Pp. 1961-1972.
11. Liang S., Gning P.B., Guillaumat L. Properties evolution of flax/epoxy composites under fatigue loading. *International Journal of Fatigue*, Elsevier, 2014, 63, pp.36-45.



ЛИТЕРАТУРА



12. Van Paepegem W., De Baere I., Lamkanfi E., Degrieck J. Poisson's ratio as a sensitive indicator of (fatigue) damage in fibre-reinforced plastics. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*. V.30(4) (2007). Pp.269-276.
13. ASTM standard D 3479. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International, 2007. 6 p.
14. Nikhamkin M.Sh., Sazhenkov N.A., Samodurov D. Fatigue testing method of test coupon and structurally equivalent samples of carbon fiber reinforced polymer for gas turbine engine parts and assemblies. *Solid State Phenomena*. 284 SSP (2018). Pp. 43-47.
15. Nikhamkin M.Sh., Sazhenkov N. A., Samodurov D. Fatigue fracture of fiber reinforced polymer honeycomb composite sandwich structures for gas turbine engines. *Journal of Physics: Conference Series*, 843 (1) (2018). Article № 012029.
16. Nikhamkin, M., Bolotov, B. Experimental and finite element analysis of natural modes and frequencies of hollow fan blades (2014) *Applied Mechanics and Materials*, 467, pp. 306-311.
17. Grinev M.A., Anoshkin A.N., Pisarev P.V., Shipunov G.S., Nikhamkin M.Sh, Balakirev A.A., Konev I.P., Golovkin. Experimental and numerical research of the dynamic response of composite outlet guide vane for aircraft jet engine. *PNRPU Mechanics Bulletin*, (4) (2016). Pp. 106-119.
18. Sol H, Hua H, De Visscher J, Vantomme J, De Wilde WP. A mixed numerical/experimental technique for the nondestructive identification of the stiffness properties of fiber reinforced composite materials. *J. Independent Nondestructive Testing and Evaluation*.V.30(2) (1997). Pp. 85–91.
19. Barkanov E.N., Chebakov M.I. Inverse technique for characterisation of elastic and dissipative properties of materials used in a composite repair of pipelines. *Proceedings of XLII International Summer School–Conference APM 2014*. Pp. 232- 246.
20. Nikhamkin M. Sh., Sememnov S. V., Solomonov D. G. Application of Experimental Modal Analysis for Identification of Laminated Carbon Fiber-Reinforced Plastics Model Parameters. *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2019. Pp. 487-497.
21. Nikhamkin M. Sh., Sememnov S. V., Silberschmidt V.V., Solomonov D. G. Identification of elastic parameters of laminated carbon fiber plates using experimental modal analysis. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. V.14. № 12 (2019). Pp.2279 – 2285.