

ОЦЕНКА СКОРОСТИ РОСТА РАССЛОЕНИЙ В КВАЗИИЗОТРОПНЫХ КОМПОЗИТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ДЕГРАДАЦИИ ЖЕСТКОСТИ

В.Е. Стрижиус*

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

*e-mail: vitaly.strizhius@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены основные особенности физического моделирования роста расслоений при циклическом растяжении квазиизотропных композиционных материалов с использованием модели снижения начальной жесткости. Отмечено, что эти особенности имеют значительные отличия от положений классической механики межслойного разрушения композиционных материалов. В качестве определенного развития этого направления на основе использования модели деградации жесткости предложен ряд новых соотношений, позволяющих более точно, чем существующие модели, выполнять расчетные оценки скорости роста расслоений. Проведена верификация предложенных соотношений на примере расчетных оценок скорости роста расслоений в квазиизотропном ламинате углепластика XAS/914 [45/90/-45/0]_s.

Ключевые слова: квазиизотропные композиционные материалы, расслоение, циклическое растяжение, деградация жесткости, скорость роста расслоения

1. Введение

Известно, что расслоение является одним из наиболее опасных и трудно контролируемых повреждений слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ). Именно поэтому исследованию возникновения и роста расслоений в ПКМ посвящены работы многих авторов.

Исследования по определению доминирующей моды разрушения при начале и росте расслоения сфокусированы на *механике межслойного разрушения*, в рамках которой требуется определить, прежде всего, изменение энергии деформации за единицу площади приращения расслоения [1]. Этот параметр называется *интенсивностью высвобождения упругой энергии в вершину трещины* G . С целью определения, будет ли расслоение расти, вычисленные значения G сравниваются с критическими значениями G_c и делается вывод о разрушении при статическом нагружении. Как правило, рассматриваются три моды разрушения: мода I (от напряжений отрыва); мода II (от напряжений поперечного сдвига) и мода III (от напряжений продольного сдвига). Моды I и II считаются наиболее критичными и поэтому им уделяют наибольшее внимание при разработке методов испытаний и в расчетных исследованиях [2-3]. Подобный подход требует как компьютерного моделирования, так и определения целого ряда экспериментальных характеристик.

Второй подход заключается в оценке роста расслоений при циклическом (усталостном) нагружении. В работах [2-7] представлен ряд уравнений для оценки скорости роста расслоений при различных модах разрушения. В работе [3]

http://dx.doi.org/10.18720/MPM.4612020_20

© 2020, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

© 2020, Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS

представлено, например, следующее уравнение для оценки скорости роста расслоения для смешанной моды разрушения (I+II):

$$\frac{dL}{dn} = m_1 \left(\frac{G_I}{G_{Ic}} \right)^{n_1} + m_2 \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}} \right)^{n_2}, \quad (1)$$

где:

- $\frac{dL}{dn}$ – рост расслоения за один цикл усталостного нагружения;
- G_I – действующее значение интенсивности высвобождения упругой энергии по моде I при рассматриваемом цикле нагружения;
- G_{II} – действующее значение интенсивности высвобождения упругой энергии по моде II при рассматриваемом цикле нагружения;
- G_{Ic} – критическое значение интенсивности высвобождения упругой энергии по моде I - характеристика трещиностойкости (определяется экспериментально, как правило, меньше значения G_{Ic} при статическом разрушении);
- G_{IIc} – критическое значение интенсивности высвобождения упругой энергии по моде II – характеристика трещиностойкости (определяется экспериментально, как правило, меньше значения G_{IIc} при статическом разрушении);
- m_1, m_2, n_1, n_2 – константы материала.

Анализируя уравнение (1) можно заключить, что оно является достаточно сложным и предполагает значительный объем предварительных экспериментальных исследований, что ставит под сомнение перспективы широкого использования этого уравнения для инженерных оценок начала и длительности расслоения в конкретных слоистых материалах.

Следует также отметить, что представленное уравнение практически непригодно для инженерных оценок роста расслоений в слоистых ПКМ *при циклическом растяжении*. Вместе с тем известно, что подобный расчетный случай и подобная мода повреждения являются достаточно распространенными и поэтому заслуживают отдельного рассмотрения и анализа.

2. Физическая модель роста расслоений при циклическом растяжении квазиизотропных композитов

В работах [8-10] представлены основные положения физической модели роста повреждений при циклическом нагружении слоистых ПКМ, которые имеют значительные отличия от методов линейной механики межслойного разрушения.

В работе [11] в качестве одного из частных случаев этой модели представлены основы физического моделирования роста расслоений в слоистых ПКМ при циклическом растяжении. Иллюстрация моды "расслоение" при подобном нагружении представлена на Рис. 1.

К основным особенностям физического моделирования роста расслоений в слоистых ПКМ при циклическом растяжении по данным работы [11] можно отнести следующие.

Введено понятие параметра расслоения D как нормализованное расслоение площади A/A_0 , где A – фактическая (измеренная) площадь расслоения, а A_0 – общая площадь, доступная для расслоения.

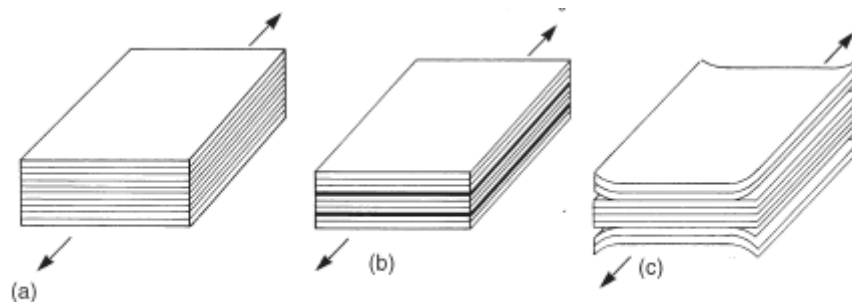


Рис. 1. Иллюстрация моды "расслоение" при растяжении слоистых ПКМ: а) ламинат без расслоения; б) полное расслоение; в) частичное расслоение

Предполагается, что существует соотношение между параметром D и модулем упругости Юнга для рассматриваемого слоистого композита, которое можно записать как:

$$E = E_0 \cdot g(D), \quad (2)$$

где E – текущее значение модуля упругости; E_0 – начальное значение модуля упругости для неповрежденного материала; $g(D)$ – некая функция.

Предложена простая модель для оценки снижения значения модуля упругости при росте расслоений:

$$E = E_0 + (E^* - E_0) \frac{A}{A_0},$$

где E^* – значение модуля упругости, соответствующее полному расслоению композита. На основании обработки известных экспериментальных данных в работе [12] сделан вывод, что когда $A/A_0 = 1$, $E/E_0 = 0.65$.

Функция $g(D)$ в выражении (2) в виде

$$g(D) = a + b \cdot D$$

может быть построена по двум точкам: $D_1 = 0$; $g(D) = 1$; $D_2 = 1$; $g(D) = 0.65$.

Таким образом, функцию $g(D)$ в выражении (2) можно записать как $g(D) = 1 - 0.35D$.

Из этого следует, что:

$$E = E_0(1 - 0.35D); \quad D = 2.857 \left(1 - \frac{E}{E_0} \right);$$

и

$$\frac{dD}{dn} = -2.857 \left(\frac{1}{E_0} \frac{dE}{dn} \right). \quad (3)$$

На Рис. 2 представлены экспериментальные данные зависимости

$$\frac{dD}{dn} = -2.857 \left(\frac{1}{E_0} \frac{dE}{dn} \right) = f \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{UTS}} \right) \quad (3,a)$$

для квазиизотропного ламината углепластика XAS/914 [45/90/-45/0]_s при циклическом растяжении с $R=0.1$, где $\sigma_{UTS}=550$ МПа - предел прочности рассматриваемого ламината на растяжение (данные работы [12]). Там же приведен пример аппроксимации рассмотренных экспериментальных данных, выполненный в работе [12] с использованием уравнения, сходного по форме с известным уравнением Пэриса:

$$\frac{dD}{dn} = 9.2 \times 10^{-5} \times \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{UTS}} \right)^{6,4}. \quad (4)$$

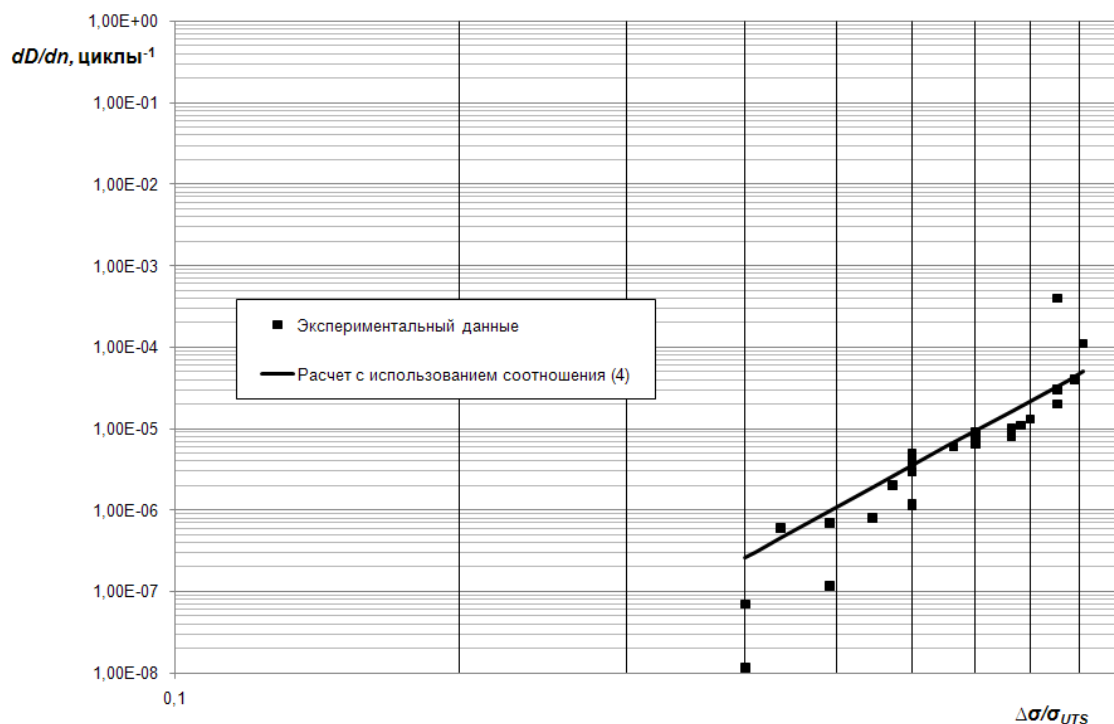


Рис. 2. Экспериментальные данные зависимости (3,а) и зависимость (4) для ламината углепластика KAS/914 [45/90/-45/0]_s при циклическом растяжении с $R=0.1$

По результатам анализа данных, представленных на Рис. 2, можно сделать вывод, что аппроксимация экспериментальных данных зависимостью (4) в области малых и больших значений параметра $\Delta\sigma/\sigma_{UTS}$ не может быть признана достаточно успешной, так как в этих областях можно отметить значительное расхождение между расчетными и экспериментальными данными.

Следует также отметить следующее. Соотношение (3) содержит достаточно важный параметр – dE/dn , который отсутствует в соотношении (4). Таким образом, соотношение (4) практически не учитывает влияние на скорость роста расслоения изменения жесткости слоистого композита в процессе накопления усталости, что с физической точки зрения является очевидным недостатком этого соотношения. Ввиду этого соотношение (4) можно считать достаточно приближенным, при использовании этого соотношения отсутствует возможность исследования изменения скорости роста расслоения в процессе накопления усталости, что, безусловно, представляет значительный научный интерес.

3. Оценка скорости и длительности роста расслоений при циклическом растяжении квазиизотропных композитов с использованием модели деградации жесткости

Известно, что в процессе накопления усталости происходит снижение (деградация) начальной жесткости слоистых композитов. Этой проблеме посвящено достаточно большое количество зарубежных исследований, среди которых, прежде всего, можно отметить работы [13-18]. В этих работах сформированы основные положения модели

деградации жесткости слоистых композитов, причем эти положения, как правило, не связаны с расслоением композита, как с конкретной модой разрушения.

По результатам обзора и анализа данных, представленных в этих работах, можно сделать следующие выводы.

1. Остаточная жесткость композиционного материала, также как и остаточная прочность, является функцией уровня и числа циклов приложенных напряжений.
2. Модели деградации жесткости интересны многим исследователям, так как остаточная жесткость может быть использована как «неразрушающая» мера оценки повреждения ПКМ.
3. Для представления остаточной жесткости как функции уровня и числа циклов в работе [18] для однонаправленного ламината при одноосном циклическом нагружении с постоянной амплитудой приведено следующее уравнение:

$$E(n) = \left(E_0 - \frac{\sigma}{\varepsilon_f} \right) \times \left(1 - \left(\frac{\lg(n) - \lg(0.25)}{\lg(N) - \lg(0.25)} \right)^\lambda \right)^{\frac{1}{\gamma}} + \frac{\sigma}{\varepsilon_f}, \quad (5)$$

где:

- $E(n)$ – остаточная жесткость;
- E_0 – начальная (статическая) жесткость;
- σ – величина прикладываемых напряжений;
- ε_f – средняя деформация при статическом разрушении;
- n – число приложенных циклов;
- N – усталостная долговечность (число циклов до разрушения) при уровне напряжений σ , определяются, как правило, с использованием $S-N$ кривой усталости слоистого ПКМ (кривой Веллера);
- λ и γ – экспериментальные параметры.

Предполагается, что уравнение (5) может быть использовано для решения рассматриваемой задачи – оценки скорости и длительности роста расслоения при циклическом растяжении квазиизотропных композитов.

Действительно, производная функции $E(n)$ равна:

$$E'(n) = \frac{dE}{dn} = - \left(E_0 - \frac{\sigma}{\varepsilon_f} \right) \times \frac{1}{\gamma} \times \left(1 - \left(\frac{\lg(n) - \lg(0.25)}{\lg(N) - \lg(0.25)} \right)^\lambda \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \times \lambda \times \left(\frac{\lg(n) - \lg(0.25)}{\lg(N) - \lg(0.25)} \right)^\lambda \times \frac{1}{\lg(N) - \lg(0.25)} \times \frac{1}{n \cdot \ln 10}. \quad (6)$$

Подставляя соотношение (6) в соотношение (3), может быть определена скорость роста расслоения в процессе накопления усталости при растяжении квазиизотропного композита:

$$\frac{dD}{dn} = -2.857 \left(\frac{E'(n)}{E_0} \right) = f_1(\sigma, R, n/N). \quad (7)$$

Анализируя соотношение (7), можно сделать вывод, что с использованием этого соотношения возможна оценка скорости роста расслоения не только в зависимости от уровня действующих напряжений, но и от уровня накопленной усталости, которая характеризуется величиной n/N . В этом плане можно утверждать, что соотношение (7) описывает изменение скорости расслоения более "физично", чем соотношение (4).

Уравнение (5) можно переписать в следующем виде:

$$\frac{E(n)}{E_0} = \left(1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_f \cdot E_0}\right) \times \left(1 - \left(\frac{\lg(n) - \lg(0.25)}{\lg(N) - \lg(0.25)}\right)^\lambda\right)^{\frac{1}{\gamma}} + \frac{\sigma}{\varepsilon_f \cdot E_0}. \quad (8)$$

Очевидно, что с использованием соотношения (8) могут быть построены графические зависимости

$$\frac{E(n)}{E_0} = f_2(\sigma, R, n, N), \quad (9)$$

с помощью которых можно продемонстрировать процесс накопления меры расслоения в рассматриваемом ламинате.

Расчетная оценка «разрушающей» меры расслоения выполняется при $n = N$.

4. Верификация предложенных соотношений

Верификация предложенного соотношения (7) проведена на примере расчетных оценок скорости роста расслоения в рассмотренном выше квазиизотропном ламинате углепластика XAS/914 [45/90/-45/0]_s при циклическом растяжении с $R=0.1$ при максимальных напряжениях цикла $\sigma_{\max} = 300, 360, 420, 515$ МПа.

При выполнении расчетных оценок использованы следующие уравнения и значения:

1. $\sigma_{UTS} = 550$ МПа – предел прочности рассматриваемого ламината на растяжение (данные работы [12]).
2. Уравнение $S-N$ кривой усталости – уравнение Менделла [19] для ламината из углепластика XAS/914 [45/90/-45/0]_s при циклическом растяжении с $R=0.1$, получено по результатам обработки данных работы [12]:
 $\sigma_{\max} = 801.664 - 71.666 \cdot \lg N$ – для $\sigma_{\max} = 300 \div 515$ МПа.
3. $\varepsilon_f = 0.0136$ – средняя деформация при статическом разрушении - значение принято на основании данных работы [20].
4. $E_0 = \sigma_{UTS} / \varepsilon_f = 40441$ МПа – начальная (статическая) жесткость.
5. $\lambda = 14.57$ и $\gamma = 0.3024$ – значения параметров λ и γ – приняты на основании данных работы [20].

На Рис. 3-4 представлены зависимости (7), построенные для рассматриваемого ламината при рассматриваемых уровнях нагружения.

На Рис. 5 приведены результаты расчетных оценок *максимальных* скоростей роста расслоений, выполненных с использованием соотношения (7), и сравнение этих результатов с экспериментальными данными и расчетными данными, полученными с использованием соотношения (4).

На Рис. 5 представлены также результаты *аппроксимации* расчетных оценок *максимальных* скоростей роста расслоений, выполненной с использованием экспоненциальной зависимости (10):

$$\frac{dD}{dn} = 2 \times 10^{-9} \times e^{11.236 \Delta \bar{\sigma}}, \quad (10)$$

где $\Delta \bar{\sigma} = \Delta \sigma / \sigma_{UTS}$.

Верификация соотношений (8)-(9) проведена на примере расчетных оценок «разрушающей» меры расслоения $E(n)/E_0$ в рассмотренном ламинате при максимальных напряжениях цикла $\sigma_{\max} = 360, 420, 500$ МПа.

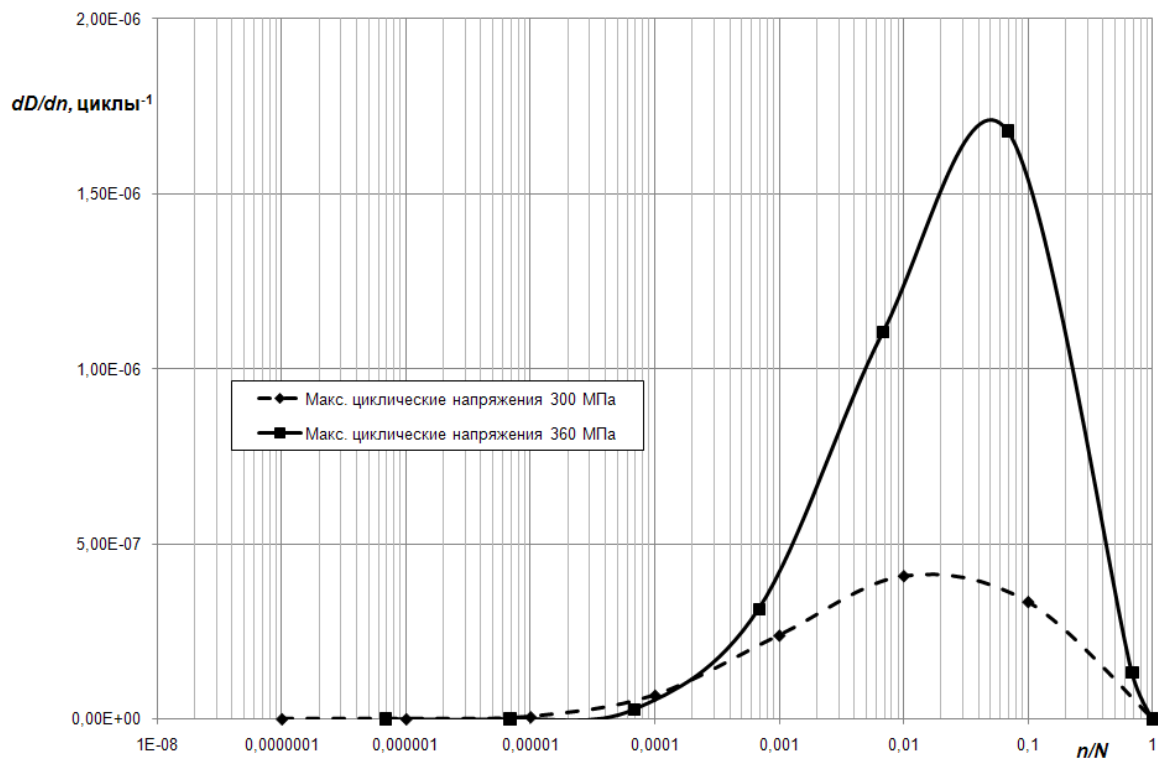


Рис. 3. Зависимости (7) для ламината углепластика XAS/914 [45/90/-45/0]_s при максимальных напряжениях циклического растяжения $\sigma_{\max} = 300$ и 360 МПа

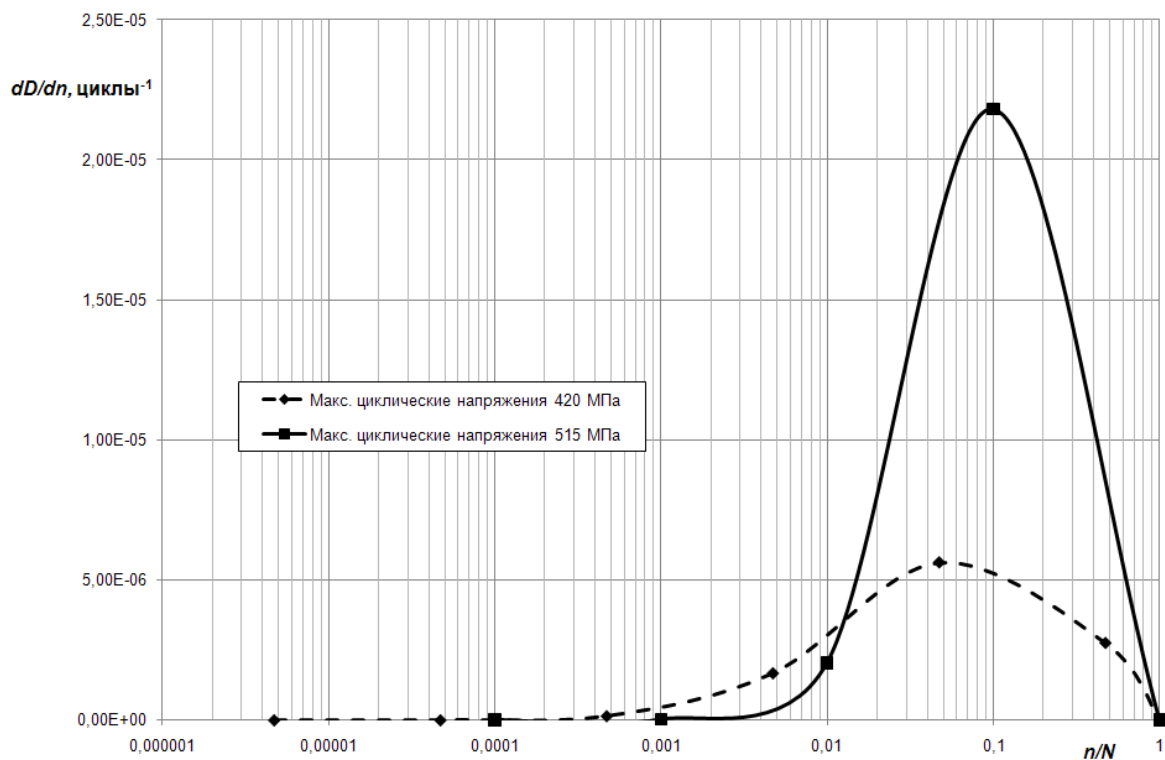


Рис. 4. Зависимости (7) для ламината углепластика XAS/914 [45/90/-45/0]_s при максимальных напряжениях циклического растяжения $\sigma_{\max} = 420$ и 515 МПа

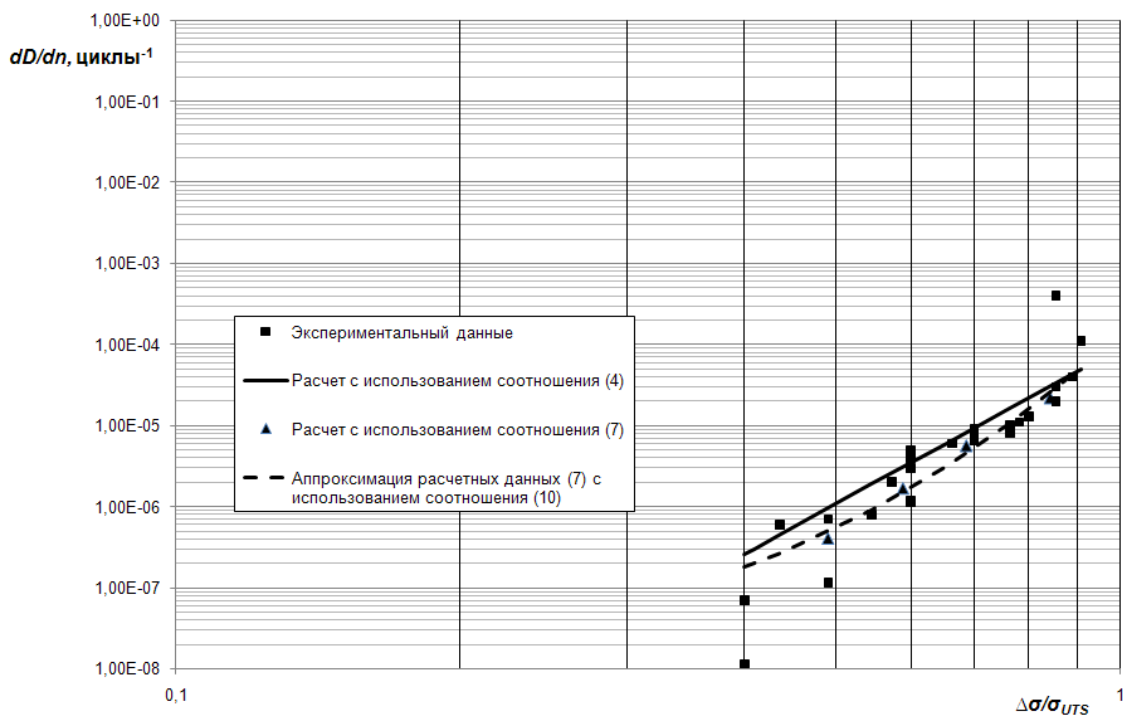


Рис. 5. Результаты расчетных оценок *максимальных* скоростей роста расслоений и сравнение этих результатов с экспериментальными данными для ламината углепластика XAS/914 [45/90/-45/0]_s

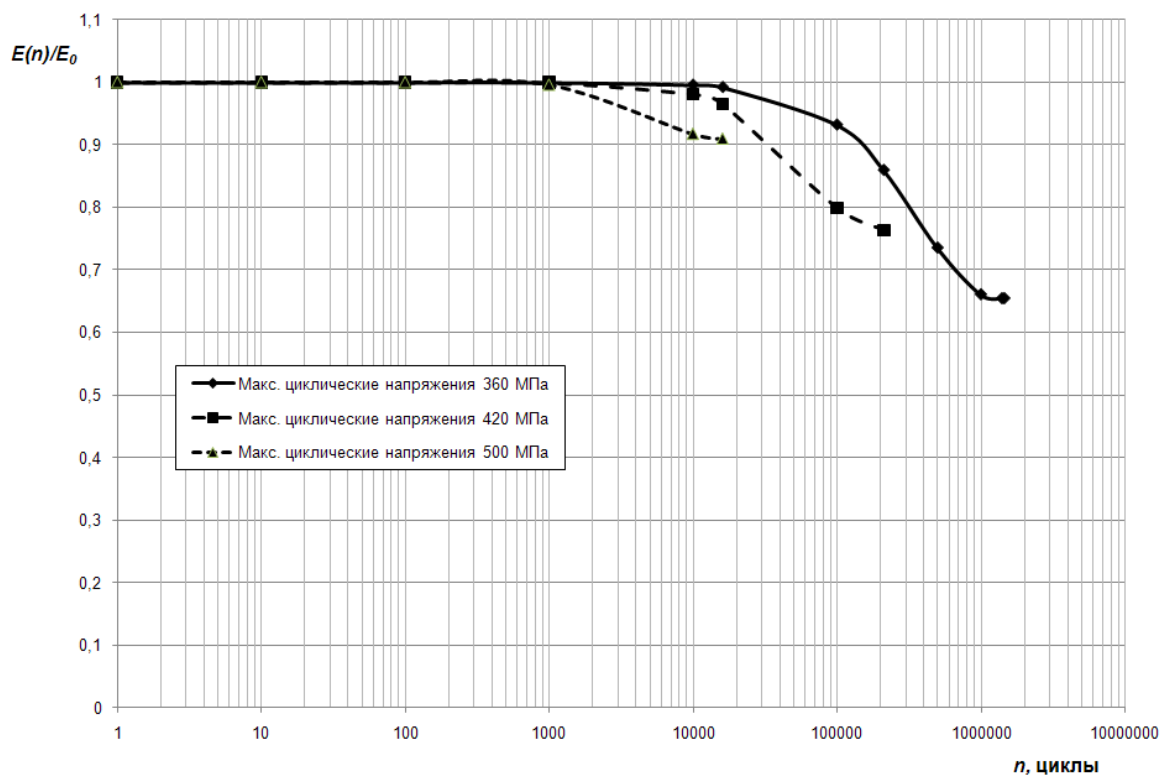


Рис. 6. Графические зависимости (9) для ламината углепластика XAS/914 [45/90/-45/0]_s

На Рис. 6 для рассматриваемого ламината при рассматриваемых уровнях напряжения представлены графические зависимости (9), с использованием которых могут быть выполнены оценки «разрушающей» меры расслоения при достижении наработки $n = N$.

В Таблице 1 представлено сравнение выполненных таким образом расчетных оценок «разрушающей» меры расслоения $E(n)/E_0$ с экспериментальными данными, приведенными в работе [12].

Таблица 1. Сравнение расчетных оценок «разрушающей» меры расслоения $E(n)/E_0$ в ламинате углепластика XAS/914 [45/90/-45/0]_s с экспериментальными данными работы [12]

| σ_{max} , МПа | N , циклы | $E(n)/E_0$, расчет (9) | $E(n)/E_0$, эксперимент |
|----------------------|-------------|----------------------------|-----------------------------|
| 360 | 1 455 000 | 0.65 | 0.67 |
| 420 | 212 000 | 0.76 | 0.78 |
| 500 | 16 190 | 0.91 | 0.94 |

5. Обсуждение результатов

Анализ представленных на Рис. 3-4 зависимостей (7) для квазиизотропного ламината углепластика XAS/914 [45/90/-45/0]_s при циклическом растяжении с $R=0.1$ позволяет сделать следующие выводы.

1. Расчетные скорости роста расслоения в рассматриваемом ламинате находятся в очевидной зависимости от уровня накопленной усталости, которая характеризуется величиной n/N . Можно предположить, что с точки зрения исследования закономерностей изменения скоростей роста расслоения от накопленной усталости использование зависимостей (7) будет представлять значительный интерес.
2. Расчетные скорости роста расслоения в рассматриваемом ламинате ожидаемо зависят от уровня действующих напряжений.

Анализ представленных на Рис. 5 зависимостей позволяет сделать следующие выводы.

1. Результаты расчетных оценок *максимальных* скоростей роста расслоений, выполненные с использованием соотношения (7), хорошо согласуются с экспериментальными данными. Очевидно, что в рассмотренном примере расчета с использованием соотношения (7) были получены более точные результаты расчетных оценок, чем с использованием соотношения (4).
2. Результаты *аппроксимации* расчетных оценок *максимальных* скоростей роста расслоений, выполненной с использованием экспоненциальной зависимости (10), показали достаточно хорошее совпадение зависимости (10) с экспериментальными данными. Величина достоверности собственно аппроксимации составила $R^2=0.9848$.
3. Очевидно, что зависимость (10) более точно, чем соотношение (4), описывает изменение скоростей роста расслоений в рассматриваемом ламинате в зависимости от параметра $\Delta\bar{\sigma} = \Delta\sigma / \sigma_{UTS}$.

На основании анализа данных, представленных на Рис. 6 и в Таблице 1, можно заключить следующее.

1. Графические зависимости (9), представленные на Рис. 6, достаточно наглядно демонстрируют накопление «разрушающей» меры расслоения в рассматриваемом ламинате.

2. Расчетные оценки «разрушающей» меры расслоения, выполненные с использованием зависимостей (9), достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [12].

Как отмечалось выше, базовые соотношения (5)-(7) для оценки скоростей роста расслоения справедливы для квазиизотропных композитов и не могут быть применимы для многослойных композитов с анизотропией слоев. Тем не менее, следует отметить следующее.

По данным работ [21-24] для многослойных композитов может быть использовано следующее соотношение:

$$E(n) = E_1 \times \left(1 - k_1 \times \left(\frac{\sigma_a}{E_0} \right)^{k_2} \times n \right), \quad (11)$$

где:

- $E(n)$ – остаточная жесткость;
- E_0 – начальная статическая жесткость;
- E_1 – начальная циклическая жесткость;
- σ_a – амплитуда циклических напряжений;
- n – число приложенных циклов;
- k_1 и k_2 – постоянные для рассматриваемого материала, получаемые по результатам обработки экспериментальных данных.

В этом случае производная функции $E(n)$ равна:

$$E'(n) = \frac{dE}{dn} = -E_1 \times k_1 \times \left(\frac{\sigma_a}{E_0} \right)^{k_2}. \quad (12)$$

Подставляя соотношение (12) в соотношение (3), может быть определена скорость роста расслоения в процессе накопления усталости при растяжении многослойного анизотропного композита:

$$\frac{dD}{dn} = -2.857 \left(\frac{E'(n)}{E_0} \right) = f_2(\sigma_a). \quad (13)$$

Очевидно, что при наличии экспериментальных данных достаточного объема могут быть определены значения всех необходимых параметров соотношений (11-13) и может быть выполнена оценка скоростей роста расслоения в многослойных композитах с анизотропией слоев.

К сожалению, подобные экспериментальные данные в открытых публикациях практически не представлены и поэтому верификация соотношений (11)-(13) вызывает в настоящее время определенные затруднения.

6. Заключение

Представлены основные особенности физического моделирования роста расслоений в слоистых ПКМ при циклическом растяжении, изложенные в работе [11]. Отмечено, что эти особенности имеют значительные отличия от положений классической механики межслойного разрушения ПКМ.

С использованием известной модели снижения (деградации) начальной жесткости квазиизотропных композитов в процессе накопления усталости предложены новые соотношения (7) и (10), позволяющие более точно, чем существующие модели, выполнять расчетные оценки скорости роста расслоений при циклическом растяжении рассматриваемых ПКМ.

Проведена верификация предложенных соотношений на примере расчетных оценок скорости роста расслоений в квазиизотропном ламинате углепластика XAS/914 [45/90/-45/0]_s при циклическом растяжении с $R=0.1$. Показана приемлемая точность расчетных оценок.

Отмечено, что при наличии экспериментальных данных достаточного объема могут быть определены значения необходимых параметров соотношений (11-13) и в этом случае будет возможна оценка скоростей роста расслоения в многослойных композитах с анизотропией слоев.

Благодарности. Никакого внешнего финансирования для этого исследования получено не было.

Литература

- [1] Martin M. Delamination fatigue. In: Harris B. (ed.) *Fatigue in composites*. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC; 2003. p.173-188.
- [2] Martin RH, Murri GB. Characterization of mode I and II delamination growth and thresholds in AS4/PEEK composites. In: Garbo S. (ed.) *Composite Materials: Testing and Design. ASTM STP 1059 (Ninth Volume)*. 1990. p.251-270.
- [3] Ramkumar RL, Whitcomb JD. Characterization of mode I and mixed-mode delamination growth in T300/5208 graphite/epoxy. In: *Delamination and Debonding of Materials. ASTM STP 876*. 1985. p.315-335.
- [4] Polilov AN, Tatus NA. Energy criteria for FRP delamination. *Vestnik PNIPU*. 2012;3: 176-203. (In-Russian)
- [5] Skvortsov YV. *Mechanics of composite materials. Lecture notes*. Samara: Samara State Aerospace University. 2013. (In-Russian)
- [6] Li C, Teng T, Wan Z, Li G, Rans C. Fatigue delamination growth for an adhesively-bonded composite joint under mode I loading. In: *27th ICAF Symposium*. Jerusalem; 2013.
- [7] Chernyakin SA, Skvortsov YV. Analysis of delamination propagation in composite structures. *Vestnik SibGAU*. 2014;4(56): 249-255.
- [8] Poursartip A, Ashby MF, Beaumont PWR. Damage accumulation during fatigue of composites. *Scripta Metallurgica*. 1982;16(5): 601-606.
- [9] Poursartip A, Ashby MF, Beaumont PWR. Damage accumulation during fatigue of composites. In: *Proc. of the 4th International Conference (ICCM-IV)*. – Tokyo: Japan Society for Composite Materials. 1986. p.693-700.
- [10] Poursartip A, Ashby MF, Beaumont PWR. Damage accumulation in composites during fatigue. In: *Proc. of the 3rd RISØ International Symposium: Fatigue and Creep of Composite Materials*. – Roskilde, Denmark. 1986. p.279-284.
- [11] Beaumont PWR. Physical modelling of damage development in structural composite materials under stress. In Harris B. (ed.) *Fatigue in composites*. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC; 2003. p.365-412.
- [12] Poursartip A, Ashby MF, Beaumont PWR. Fatigue damage mechanics of a carbon fibre composite laminate: Part 1. *Composites Science and Technology*. 1986;25: 193-218.
- [13] Hwang W, Han KS. Fatigue of composites – fatigue modulus concept and life prediction. *Journal of Composite Materials*. 1986;20(2): 154-165.
- [14] Whitworth HW. Modeling stiffness reduction of graphite/epoxy composite laminates. *Journal of Composite Materials*. 1987;21(4): 362-372.
- [15] Highsmith AL, Reifshider KL. Stiffness-reduction mechanisms in composite laminates. *Damage in Composite Materials. ASTM STP 775*. 1982: 103-117.
- [16] Yang JN, Lee LJ, Sheu DY. Modulus reduction and fatigue damage of matrix dominated composite laminates. *Composite Structures*. 1992;21(2): 91-100.

- [17] Jones DL, Yang SH, Lee JH, Whitworth HW. Development of a stiffness degradation model for graphite epoxy laminates under fatigue loading. In: *Proceedings of International Conference on Composite Engineering ICCE*. 1994. p.243-244.
- [18] Shokrieh MM, Lessard LB. Fatigue under multiaxial stress systems. In: Harris B. (ed.) *Fatigue in composites*. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC; 2003. p.63-114.
- [19] Mandell JF. Fatigue behaviour of fibre-resin composites. In: Pritchard G. (ed.) *Developments in Reinforced Plastics 2*. London: Applied Science Publishers; 1982. p.67-108.
- [20] Khan AI, Venkataraman S, Miller I. Predicting Fatigue Damage of Composites Using Strength Degradation and Cumulative Damage Model. *J. Compos. Sci.* 2018;2(1): 9.
- [21] Brøndsted P, Andersen SI, Lilholt H. Fatigue damage accumulation and lifetime prediction of GFRP materials under block loading and stochastic loading. In: *Proceedings of the 18th Risø International Symposium on Materials Science, Risø International Laboratory, Roskilde, Denmark*. 1997.
- [22] Ferreira J, Reis P, Costa J, Richardson M. Fatigue behaviour of composite adhesive lap joints. *Compos. Sci. Technol.* 2002;62(10-11): 1373-1379.
- [23] Vassilopoulos AP, Keller T. *Fatigue of Fiber-reinforced Composites*. London: Springer; 2011.
- [24] Ospina Cadavid M, Al-Khudairi O, Hadavinia H, Goodwin D, Liaghat GH. Experimental Studies of Stiffness Degradation and Dissipated Energy in Glass Fibre Reinforced Polymer Composite Under Fatigue Loading. *Polymers & Polymer Composites*. 2017;25(6): 435-446.

ESTIMATION OF DELAMINATION GROWTH RATE IN QUASI-ISOTROPIC COMPOSITES USING THE STIFFNESS DEGRADATION MODEL

V.E. Strizhius*

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*e-mail: vitaly.strizhius@gmail.com

Abstract. The main features of physical modeling of the growth of delaminations under cyclic tension of quasi-isotropic composite materials are considered using the model of decreasing the initial stiffness. It is noted that these features are significantly different from the provisions of the classical mechanics of interlayer fracture of composite materials. As a definite development of this direction, based on the use of the stiffness degradation model, a number of new relationships have been proposed, which make it possible to more accurately than the existing models to carry out calculated estimates of the growth rate of delamination. Verification of the proposed relations is carried out on the example of calculated estimates of the growth rate of delaminations in a quasi-isotropic CFRP laminate XAS/914 [45/90/-45/0]_s.

Keywords: quasi-isotropic composite materials, delamination, cyclic tension, degradation of stiffness, growth rate of delamination

Acknowledgements. No external funding was received for this study.

References

- [1] Martin M. Delamination fatigue. In: Harris B. (ed.) *Fatigue in composites*. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC; 2003. p.173-188.
- [2] Martin RH, Murri GB. Characterization of mode I and II delamination growth and thresholds in AS4/PEEK composites. In: Garbo S. (ed.) *Composite Materials: Testing and Design. ASTM STP 1059 (Ninth Volume)*. 1990. p.251-270.
- [3] Ramkumar RL, Whitcomb JD. Characterization of mode I and mixed-mode delamination growth in T300/5208 graphite/epoxy. In: *Delamination and Debonding of Materials. ASTM STP 876*. 1985. p.315-335.
- [4] Polilov AN, Tatus NA. Energy criteria for FRP delamination. *Vestnik PNIPU*. 2012;3: 176-203. (In-Russian)
- [5] Skvortsov YV. *Mechanics of composite materials. Lecture notes*. Samara: Samara State Aerospace University. 2013. (In-Russian)
- [6] Li C, Teng T, Wan Z, Li G, Rans C. Fatigue delamination growth for an adhesively-bonded composite joint under mode I loading. In: *27th ICAF Symposium*. Jerusalem; 2013.
- [7] Chernyakin SA, Skvortsov YV. Analysis of delamination propagation in composite structures. *Vestnik SibGAU*. 2014;4(56): 249-255.
- [8] Poursartip A, Ashby MF, Beaumont PWR. Damage accumulation during fatigue of composites. *Scripta Metallurgica*. 1982;16(5): 601-606.

- [9] Poursartip A, Ashby MF, Beaumont PWR. Damage accumulation during fatigue of composites. In: *Proc. of the 4th International Conference (ICCM-IV)*. – Tokyo: Japan Society for Composite Materials. 1986. p.693-700.
- [10] Poursartip A, Ashby MF, Beaumont PWR. Damage accumulation in composites during fatigue. In: *Proc. of the 3rd RISØ International Symposium: Fatigue and Creep of Composite Materials*. – Roskilde, Denmark. 1986. p.279-284.
- [11] Beaumont PWR. Physical modelling of damage development in structural composite materials under stress. In Harris B. (ed.) *Fatigue in composites*. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC; 2003. p.365-412.
- [12] Poursartip A, Ashby MF, Beaumont PWR. Fatigue damage mechanics of a carbon fibre composite laminate: Part 1. *Composites Science and Technology*. 1986;25: 193-218.
- [13] Hwang W, Han KS. Fatigue of composites – fatigue modulus concept and life prediction. *Journal of Composite Materials*. 1986;20(2): 154-165.
- [14] Whitworth HW. Modeling stiffness reduction of graphite/epoxy composite laminates. *Journal of Composite Materials*. 1987;21(4): 362-372.
- [15] Highsmith AL, Reifshider KL. Stiffness-reduction mechanisms in composite laminates. *Damage in Composite Materials. ASTM STP 775*. 1982: 103-117.
- [16] Yang JN, Lee LJ, Sheu DY. Modulus reduction and fatigue damage of matrix dominated composite laminates. *Composite Structures*. 1992;21(2): 91-100.
- [17] Jones DL, Yang SH, Lee JH, Whitworth HW. Development of a stiffness degradation model for graphite epoxy laminates under fatigue loading. In: *Proceedings of International Conference on Composite Engineering ICCE*. 1994. p.243-244.
- [18] Shokrieh MM, Lessard LB. Fatigue under multiaxial stress systems. In: Harris B. (ed.) *Fatigue in composites*. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC; 2003. p.63-114.
- [19] Mandell JF. Fatigue behaviour of fibre-resin composites. In: Pritchard G. (ed.) *Developments in Reinforced Plastics 2*. London: Applied Science Publishers; 1982. p.67-108.
- [20] Khan AI, Venkataraman S, Miller I. Predicting Fatigue Damage of Composites Using Strength Degradation and Cumulative Damage Model. *J. Compos. Sci.* 2018;2(1): 9.
- [21] Brøndsted P, Andersen SI, Lilholt H. Fatigue damage accumulation and lifetime prediction of GFRP materials under block loading and stochastic loading. In: *Proceedings of the 18th Risø International Symposium on Materials Science, Risø International Laboratory, Roskilde, Denmark*. 1997.
- [22] Ferreira J, Reis P, Costa J, Richardson M. Fatigue behaviour of composite adhesive lap joints. *Compos. Sci. Technol.* 2002;62(10-11): 1373-1379.
- [23] Vassilopoulos AP, Keller T. *Fatigue of Fiber-reinforced Composites*. London: Springer; 2011.
- [24] Ospina Cadavid M, Al-Khudairi O, Hadavinia H, Goodwin D, Liaghat GH. Experimental Studies of Stiffness Degradation and Dissipated Energy in Glass Fibre Reinforced Polymer Composite Under Fatigue Loading. *Polymers & Polymer Composites*. 2017;25(6): 435-446.