

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-12-81-87>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ МЕЖСЛОЙНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

© Илья Сергеевич Белоусов^{1,2*}, Валерий Андреевич Беспалов¹

¹ СибНИА им. С. А. Чаплыгина, Россия, 630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, д. 21;
*e-mail: nio2_s2024@sibnia.ru

² Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, д. 20.

*Статья поступила 15 февраля 2023 г. Поступила после доработки 3 апреля 2023 г.
Принята к публикации 30 мая 2023 г.*

При решении задачи моделирования распространения межслоевых дефектов в многослойных композитных материалах необходимо знать характеристики рассматриваемого материала, связанные с процессами разрушения. Цель данной работы — определение межслоевой вязкости разрушения в случае нормального отрыва — G_{Ic} . Представлены результаты испытаний по определению вязкости разрушения в условиях нормального отрыва. На основании полученных данных проведено конечно-элементное моделирование испытаний. Процесс расслоения моделировали с помощью подходов, наиболее распространенных в рамках метода конечных элементов: VCCT (virtual crack closure technique) и CZM (cohesive zone model). В данных подходах вязкость разрушения используется как основной параметр возникновения расслоения. Проведено сравнение полученных данных с экспериментом. Для подтверждения корректности экспериментальных данных вязкости разрушения G_{Ic} проведено моделирование процесса испытаний на сжатие образца типа полоса с дефектом в виде сквозного непрочлея. Данная задача включает в себя нелинейный статический расчёт с учетом потери устойчивости и последующего закритического поведения и, как следствие, распространения зоны расслоения. Результаты, полученные с помощью конечно-элементного моделирования, согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: композитные материалы; расслоение; конечно-элементное моделирование; вязкость разрушения.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE INTERLAYER FRACTURE TOUGHNESS OF A COMPOSITE MATERIAL

© Илья С. Белоусов^{1,2*} Valerii A. Beshpalov¹

¹ S. A. Chaplygin Siberian Research Institute of Aviation, 21, Polzunova ul., Novosibirsk, 630051, Russia;
*e-mail: nio2_s2024@sibnia.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marksa prosp., Novosibirsk, 630073, Russia.

Received February 15, 2023. Revised April 3, 2023. Accepted May 30, 2023.

Modeling the propagation of interlaminar defects in multilayer composite materials requires knowledge of the characteristics of the material under study associated with the fracture processes. The goal of the study is determination of the interlaminar fracture toughness in the case of normal traction (G_{Ic}). Finite element modeling of testing was carried out proceeding from the data obtained. The delamination process was modeled using the most common approaches within the finite element method: VCCT (virtual crack closure technique) and CZM (cohesive zone model), wherein the fracture toughness is used as the main parameter for the occurrence of delamination. The obtained data are compared with the experiment. To confirm the correctness of the obtained experimental data on the fracture toughness G_{Ic} , modeling of the process of compression testing of a strut-type specimen with a defect in the form of a through-the-width delamination was carried out. This problem includes a nonlinear static solution with buckling and subsequent post-buckling behavior, and, as a result, the spread of the delamination zone. The data obtained using finite element modeling are consistent with the available experimental data.

Keywords: composite materials; delamination; finite element modeling; fracture toughness.

Введение

В элементах конструкций, выполненных из многослойных композитных материалов, одним из наиболее распространенных типов дефектов являются расслоения — нарушение связи между слоями, обычно приводящее к снижению их жесткости и прочности. Множество работ посвящено исследованию влияния наличия таких дефектов на конструкцию [1 – 5].

В условиях нормального отрыва (тип разрушения I) и поперечного сдвига (тип разрушения II) поведение дефектов типа расслоения аналогично поведению трещин, следовательно, для задач анализа роста расслоений обычно применяют методы линейной упругой механики разрушения [6].

Напряженно-деформированное состояние вблизи сингулярности можно характеризовать конечным параметром механики разрушения — интенсивностью освобождения энергии G , а сопротивление расслоению — критической работой расслоения (вязкостью межслойного разрушения) G_c . Поскольку многослойные композиты — материалы с высокими эксплуатационными характеристиками, имеется необходимость точного расчета межслойной вязкости разрушения для оптимального проектирования и подбора материала для композитных конструкций. Существуют различные методы испытаний по определению G_c для соответствующих типов расслоения. Межслойное разрушение типа I (нормальный отрыв) получило наибольшее внимание от исследователей. Это связано с тем, что энергия начала расслоения в данном случае меньше, чем при поперечном сдвиге [7 – 9].

Существуют различные аналитические подходы к решению задачи устойчивости, определению закритического состояния элементов конструкций, а также к прогнозированию распространения расслоений. Все они имеют ряд существенных ограничений, например, по относительной

сложности решаемых задач, трудоемкости решений, типовым элементам конструкций (балки, пластины), геометрическим параметрам рассматриваемых элементов конструкций, по количеству и параметрам учитываемых межслойных дефектов. Для решения задачи устойчивости, определения закритического состояния, а также прогнозирования распространения расслоений элементов конструкций хорошо подходит метод конечных элементов. В рамках данного метода существуют различные подходы к моделированию развития трещин, в частности расслоений. Одним из распространенных является метод виртуального закрытия трещины (virtual crack closure technique, VCCT), подробно описанный в работе [10]. Данный метод основывается на линейной упругой механике разрушения и критерии Ирвина [11]. В рамках другого подхода для моделирования роста расслоения, основанного на контактном взаимодействии тел, используется модель когезионной зоны (cohesive zone model, CZM) [12, 13]. В этом случае базовой является зависимость усилий растяжения (или сдвига) в контактной паре от расстояния между узлами этих контактных пар. Характеристикой материала, необходимой для реализации обоих подходов, является вязкость межслойного разрушения G_c .

Испытания для определения критической работы расслоения в условиях отрыва

Для определения величины G_{Ic} для композитов, изготовленных из препрега Torayca T800, были проведены соответствующие испытания в соответствии с ГОСТ Р 56815–2015.

Образцы представляли собой двойную консольную балку (ДКБ) с предварительно выполненным на конце (по центру толщины) расслоением. Усилия прилагались к образцу через блоки нагружения. Эскиз образцов с характерными размерами представлен на рис. 1, размеры образцов — в табл. 1. Толщину h и ширину b образцов измеряли в трех местах (в середине и по краям образца) и записывали среднее значение.

Образцы из препрега Torayca T800 содержали 40 слоев, направленных вдоль длины образца L (укладка: $[0]_{40}$). Механические характеристики монослоя приведены в табл. 2.

Испытания проводили в машине Instron 8801. Вид образца, установленного в испытательной машине, до и после испытаний представлен на рис. 2.

По итогам испытаний получены: вязкость разрушения страгивания $G_{Ic}^{ini} = 0,031$ кгс/мм, соответствующая началу распространения расслоения; вязкость разрушения распространения $G_{Ic}^{prop} = 0,065$ кгс/мм, соответствующее установившемуся процессу расслоения. Значительная

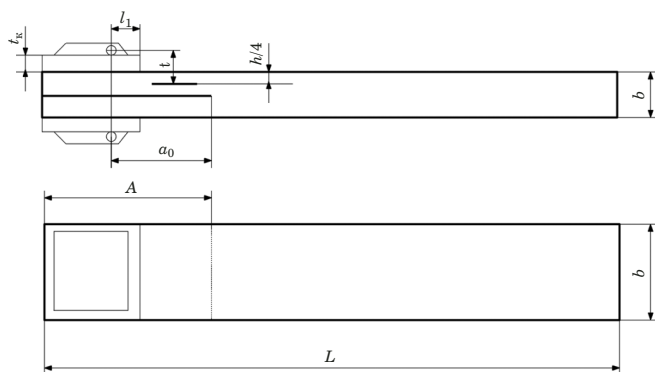


Рис. 1. Образец ДКБ с блоками нагружения

Fig. 1. DCB specimen with loading blocks

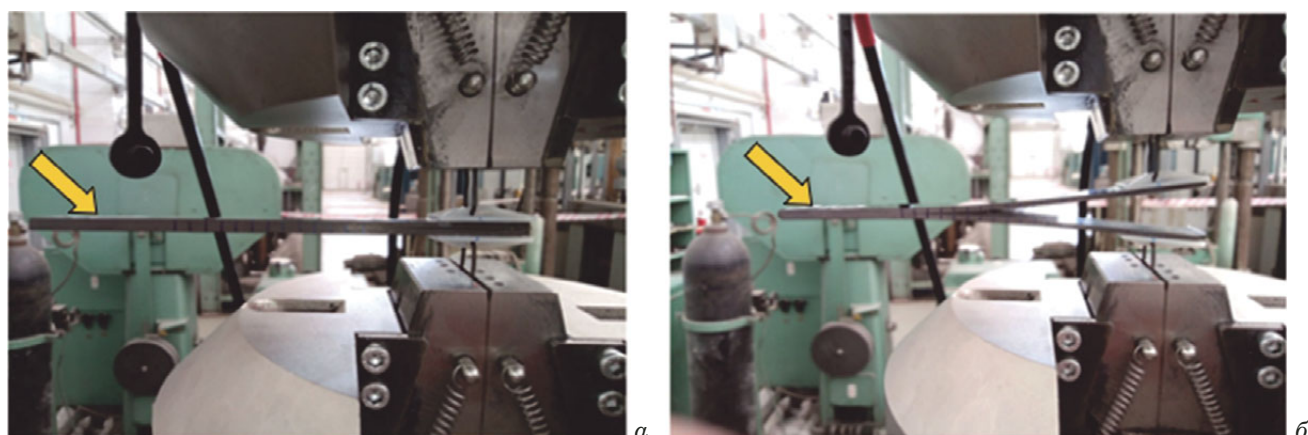


Рис. 2. Образец в испытательной машине Instron 8801 в начале (а) и конце (б) испытаний

Fig. 2. Specimen in an Instron 8801 testing machine in the beginning (a) and at the end of testing (b)

разница в величинах вязкости разрушения может быть объяснена различиями гладких поверхностей предварительного дефекта, которые образуются путем введения тefлоновой пленки, и неровных поверхностей, образующихся в результате роста расслоения. В результате процесса расслоения остаются волокна-мостики (bridge-fibers), которые соединяют берега расслоения и, соответственно, препятствуют процессу расслоения [14 – 16].

Методы моделирования процесса расслоения в композитных материалах

Рассмотрим подходы к моделированию процесса расслоений VCST и CZM на примере испытаний образцов ДКБ, описанных выше, с использованием данных, полученных в результате испытаний.

Построение конечно-элементной модели проводили в программном комплексе ANSYS, при моделировании применяли восьмиузловой объемный конечный элемент SOLID185. Конечным элементам присваивали свойства ортотропного материала с обобщенными механическими характеристиками композитного пакета [17]. В качестве граничных условий задавали перемещения в противоположные стороны к краям балки с торца, где расположено предварительное расслоение, а также жесткую заделку с противоположного торца. Такие граничные условия соответствуют условиям нагружения при испытаниях.

Конечно-элементная модель такого образца с приложенными граничными условиями представлена на рис. 3. На рис. 4 показано деформированное состояние образца, для которого про-

Таблица 1. Размеры образцов

Table 1. Specimen sizes

Номер образца	L , мм	b , мм	h , мм	A , мм	α_0 , мм	t , мм	t_k , мм	l_1 , мм
G1-1	160	24,30	4,57	50	32,5	4,14	3,0	13
G1-2	160	24,20	4,60	50	33,0	2,65	1,5	13
G1-3	159	24,30	4,50	50	33,5	2,63	1,5	13
G1-4	159	24,37	4,50	50	33,5	2,63	1,5	13
G1-5	160	24,87	4,53	50	32,0	2,63	1,5	13
G1-6	160	24,13	4,70	50	33,5	2,68	1,5	13
G1-7	160	23,60	4,40	50	34,0	2,60	1,5	13
G1-8	160	24,74	4,70	50	34,0	2,68	1,5	13

Таблица 2. Механические характеристики монослоя препрега Torayca T800 вдоль направления волокон

Table 2. Mechanical properties of prepreg Torayca T800 along the fiber direction

E_x , кгс/мм ²	E_y , кгс/мм ²	E_z , кгс/мм ²	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} , кгс/мм ²	G_{yz} , кгс/мм ²	G_{xz} , кгс/мм ²	δ , мм
14300	920	920	0,34	0,34	0,34	437	437	437	0,113

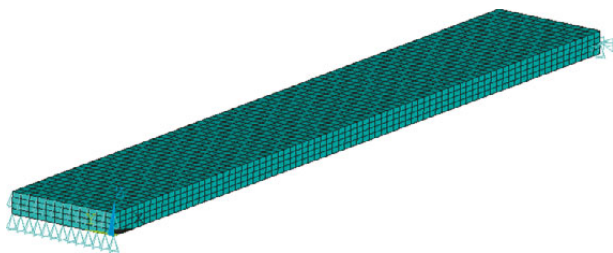


Рис. 3. Конечно-элементная модель образца двойной консольной балки

Fig. 3. Finite element model of a DCB specimen

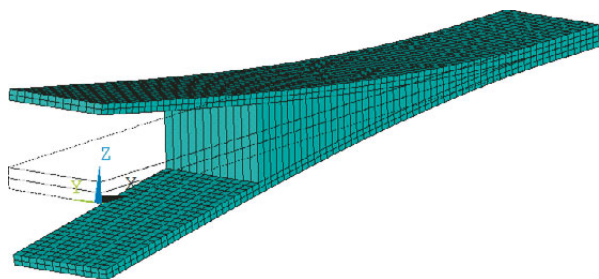


Рис. 4. Деформированная конечно-элементная модель образца двойной консольной балки (процесс расслоения моделировали с помощью метода VCCT)

Fig. 4. Deformed finite element model of a DCB specimen (the delamination process was modeled using the VCCT method)

цесс расслоения моделировали с помощью метода VCCT.

На рис. 5 приведены зависимости нагрузки P от перемещений U для образцов G1-1 – G1-8, полученные из испытаний, а также аналогичные графики, построенные с помощью КЭМ при $G_{Ic} = G_{Ic}^{ini}$ и $G_{Ic} = G_{Ic}^{prop}$. Можно заключить, что в качественном отношении оба метода показывают неплохое соответствие эксперименту. Однако количественно метод CZM дает результаты, более близкие к экспериментальным, чем метод VCCT, причем нагрузка страгивания расслоения точнее прогнозируется при использовании вязкости страгивания G_{Ic}^{ini} , а подрастание расслоения — при G_{Ic}^{prop} , что соответствует физической природе этих коэффициентов.

Таким образом, полученные в результате испытаний значения G_{Ic}^{ini} и G_{Ic}^{prop} для материала можно считать приемлемыми. Отличия зависимостей нагрузки P от перемещений U , полученных по итогам испытаний, от аналогичных графиков, построенных с помощью метода конечных элементов, объясняются погрешностью конечно-элементного моделирования процесса расслоения. Данный вопрос подробно рассматривается в работе [18].

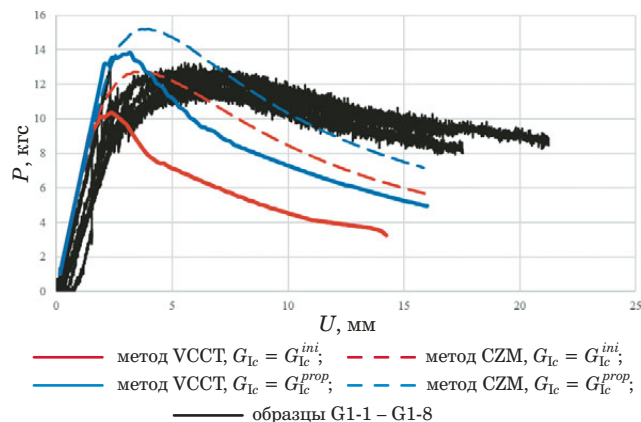


Рис. 5. Зависимости нагрузки P от перемещений U для двойной консольной балки

Fig. 5. Load P versus displacements U for DCB specimen

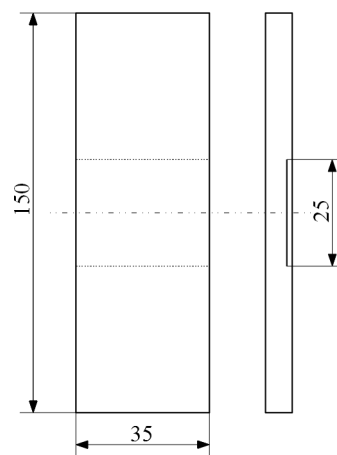


Рис. 6. Образец в виде полосы со сквозным дефектом

Fig. 6. Strut specimen with embedded delamination

Моделирование процесса расслоения в образце типа полоса с дефектом в виде сквозного непрочлея

В качестве объекта моделирования рассмотрен образец в виде полосы из композиционного материала со сквозным дефектом, который формировали путем добавления между слоями препрега фторопластовой пленки с заданными размерами и формой. Эскиз образца с дефектом представлен на рис. 6. На машине Instron 8801 проведены испытания шести подобных образцов (С1 – С6) на сжатие. Образцы зажимали штатными гидрозавхватами машины таким образом, чтобы свободная длина образца составляла 50 мм, при этом зона расслоения находилась посередине рабочей зоны. Материал образцов — препрег Торауса Т800, механические характеристики монослоя вдоль направления волокон представлены в табл. 2. Углы армирования однонаправлен-

Таблица 3. Обобщенные механические характеристики областей моделируемого образца

Table 3. Generalized mechanical characteristics of the modeled specimen zones

Область	E_x , кгс/мм ²	E_y , кгс/мм ²	E_z , кгс/мм ²	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} , кгс/мм ²	G_{yz} , кгс/мм ²	G_{xz} , кгс/мм ²
Неповрежденная часть	9692	3231	3231	0,53	0,53	0,53	1325	1325	1325
Нижняя часть зоны расслоения	9949	3044	3044	0,36	0,36	0,36	1283	1283	1283
Верхняя часть зоны расслоения	8386	4120	4120	0,32	0,32	0,32	1517	1517	1517

ных слоев в градусах относительно продольной оси X: [+45, 0, -45, 90, 0, 0, 0, +45, 0, -45, 0, 0, 0, 0, +45, 90, 0, 0, 0, 0, 90, +45, 0, 0, 0, 0, -45, 0, +45, 0, пленка, 0, 0, 90, -45, 0, +45].

Для моделирования процесса расслоения в образце с дефектом в виде сквозного непрочлея в программном комплексе ANSYS построена конечно-элементная модель с применением восьми-узлового объемного конечного элемента SOLID185.

Конечно-элементная модель образца делилась на три области: неповрежденная часть; нижняя, более толстая часть зоны расслоения; верхняя, более тонкая часть зоны расслоения. Для каждой из этих частей задавали собственный ортотропный материал с обобщенными характеристиками соответствующих наборов монослоев [8] (табл. 3). Полученная таким образом конечно-элементная модель представлена на рис. 7. Подобный подход к моделированию пластин, выполненных из многослойных композитных материалов, относительно прост и позволяет получить достаточно точные результаты.

Граничные условия задавали следующим образом. Левый край образца был жестко закреплен (см. рис. 7, левый торец). С противоположного торца прикладывалась сжимающая нагрузка (см. рис. 7, правый торец). Здесь же были запрещены перемещения узлов вдоль оси Z для предотвращения выхода правого торца из плоскости нагружения. Такое закрепление соответствовало условию нагружения в испытаниях — образцы предназначены для испытаний в гидрозаватах без устройств, предотвращающих изгиб образца из плоскости.

Данную конечно-элементную модель использовали для решения нелинейной статической задачи, с учетом потери устойчивости, последующим закритическим поведением и процессом расслоения. Для моделирования процесса расслоения использовали методы как VCCT, так и CZM, а в качестве вязкости разрушения — величины страгивания G_{Ic}^{ini} и распространения G_{Ic}^{prop} . На рис. 8 представлено деформированное состояние КЭМ (процесс расслоения моделировали с помощью метода VCCT).

Сравнивая осредненные величины нагрузок начала роста расслоения у образцов в процессе

Таблица 4. Нагрузки начала роста расслоения

Table 4. Initiation of delamination growth

Номер образца	P_g^{test} , кгс	Расчетные данные		
		Метод моделирования роста дефекта	$G_c = G_{Ic}^{ini}$, кгс	$G_c = G_{Ic}^{prop}$, кгс
C1	3950	VCCT	4563	5371
C2	2200			
C3	2900			
C4	2600	CZM	3949	4132
C5	3300			
C6	3300			
Среднее	2992		4256	4752

испытаний и начала роста расслоения в конечно-элементной модели (табл. 4), получили:

$$\delta_{ini} = \frac{P_g^{ini} - P_g^{test}}{P_g^{ini}} \cdot 100 \approx 30 \%, \quad (1)$$

$$\delta_{prop} = \frac{P_g^{prop} - P_g^{test}}{P_g^{prop}} \cdot 100 \approx 37 \%. \quad (2)$$

Для понимания причин достаточно большой погрешности определения величины нагрузки начала роста дефекта проведено сопоставление экспериментальных графиков зависимости нагрузки P от перемещения торца U с графиками,

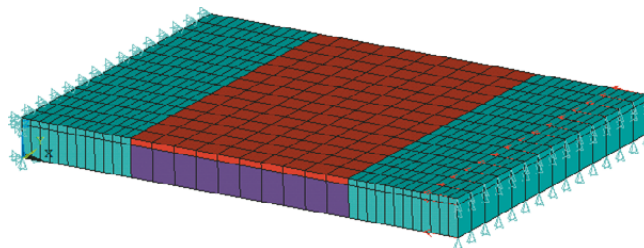


Рис. 7. Конечно-элементная модель образца в виде полосы со сквозным расслоением: \blacktriangle — закрепления; \rightarrow — нагрузка

Fig. 7. Finite element model of strut specimen with embedded delamination

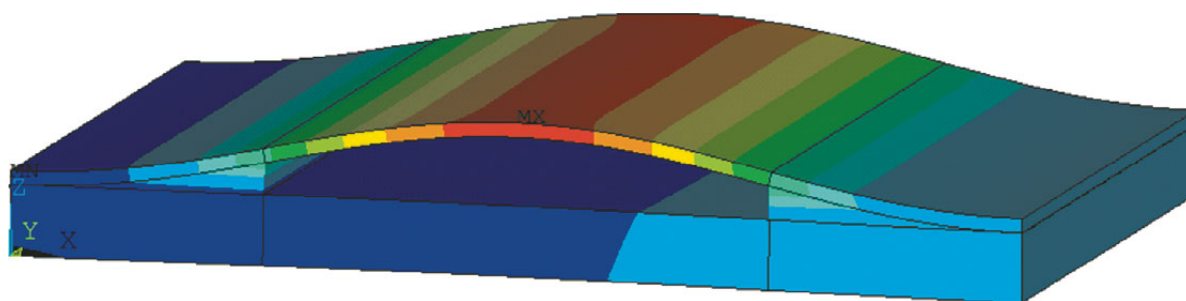


Рис. 8. Деформированная конечно-элементная модель полосы с дефектом в виде сквозного непрочья (процесс расслоения моделировали с помощью метода VCCT)

Fig. 8. Deformed finite element model of a strut specimen with embedded delamination (VCCT)

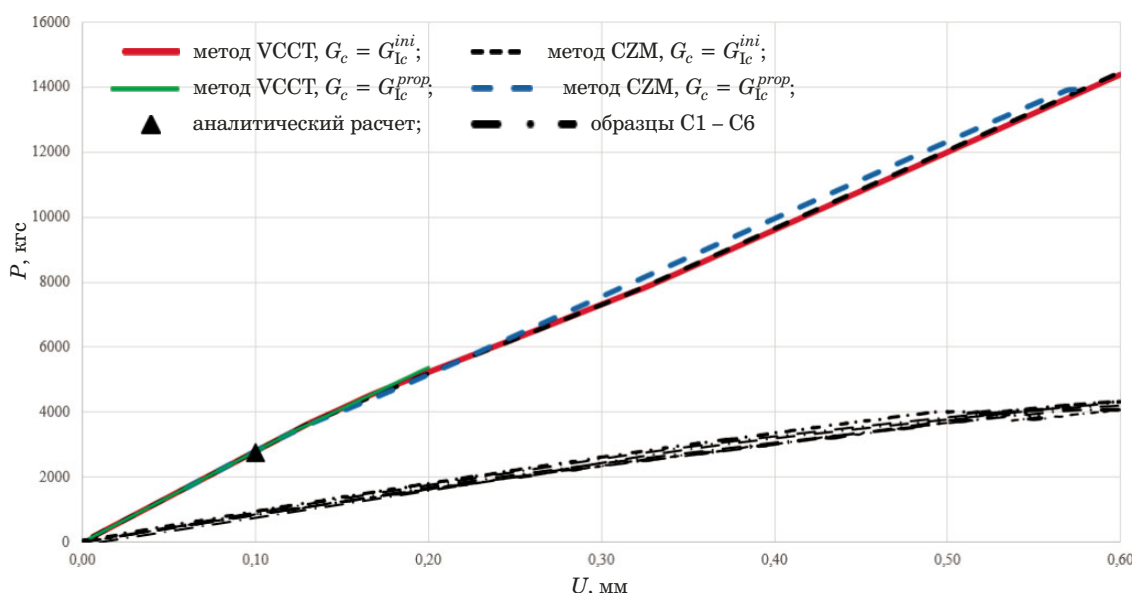


Рис. 9. Зависимость нагрузки P от перемещений U для полосы с дефектом в виде сквозного непрочья

Fig. 9. Load P versus displacements U for a strut with embedded delamination

полученными расчетами по КЭМ, а также аналитическим расчетом для линейного участка деформирования по формуле

$$P = FE\varepsilon, \quad (3)$$

где F (мм^2) — площадь поперечного сечения образца; E ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) — модуль упругости неповрежденной части образца (см. табл. 3), $\varepsilon = U/L$ — деформация образца (рис. 9).

Из графиков видно, что жесткость образцов в эксперименте оказалась меньше расчетной. Данный факт может быть связан с наличием у штока испытательной машины Instron 8801 люфта, что приводило к эксцентриситету при сжатии образцов, они теряли устойчивость и начинали расслаиваться раньше, чем это было бы при обеспечении чистого сжатия, воспроизводившегося в расчетах.

Кроме того, необходимо отметить, что при применении в моделировании вязкости разруше-

ния страгивания G_{Ic}^{ini} погрешность определения нагрузки начала роста расслоения меньше, чем при использовании вязкости разрушения распространения G_{Ic}^{prop} , что соответствует физическому смыслу данных величин.

Заключение

На образцах двухконсольной балки экспериментально согласно ГОСТ Р 56815–2015 получены характеристики вязкости расслоения в условиях нормального отрыва при страгивании и подрастании дефекта ($G_{Ic}^{ini} = 0,031$ $\text{кгс}/\text{мм}$ и $G_{Ic}^{prop} = 0,065$ $\text{кгс}/\text{мм}$ соответственно) для многослойного композитного материала, изготовленного из препрега Torayса T800, отформованного автоклавным методом. Полученные результаты дополняют справочные данные по характеристикам прочности ПКМ Torayса T800 и будут необходимы для расчетных оценок эксплуатационной живучести воздушных судов из этого материала.

Исследована эффективность расчетных оценок нагрузки страгивания расслоения в условиях нормального отрыва для многослойного композитного материала, изготовленного из препрега Тогауса Т800, и прогнозирования дальнейшего развития расслоения. Установлено, что расчетные оценки методом CZM и VCCT дают приемлемое качественное соответствие экспериментальным данным, полученным на образцах двухконсольной балки и на образцах в виде полосы при нагрузках сжатия. Однако количественно расчеты методом CZM лучше соответствуют эксперименту.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. **Sridharan S.** (ed.). *Delamination behaviour of composites*. 1st ed. — NW: Woodhead Publishing, 2008. — 788 p.
2. **Chermoshentseva A. S.** Development of a technique for increasing the strength of thin-walled structural elements made of composite materials with delamination-type defects: dis. phd. — Moscow, 2018. — 168 p. [in Russian].
3. **Zhiharev M. V.** Estimation of the strength of high-loaded plates made of composite materials under local impact. Candidate's Thesis — Chelyabinsk, 2019. — 125 p. [in Russian].
4. **Mortell D. J., Tanner D. A., McCarthy C. T.** In-situ SEM study of transverse cracking and delamination in laminated composite materials / *Composites Science and Technology*. 2014. Vol. 105. P. 118 – 126. DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.10.012
5. **Urnev A. S., Chernyatin A. S., Matvienko Y. G., Razumovskii I. A.** Experimental and numerical sizing of a delamination defect in layered composite material / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2018. Vol. 84. N 10. P. 59 – 66 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-59-66
6. **Bokhoeva L. A.** Peculiarities of strength calculation of structural elements made of isotropic and composite materials with permissible defects. — Ulan-Ude: VSGTU, 2007. — 192 p. [in Russian].
7. **Refahi Oskouei A., Zucchelli A., Ahmadi M., Minak G.** An integrated approach based on acoustic emission and mechanical information to evaluate the delamination fracture toughness at mode I in composite laminate / *Materials & Design*. 2010. Vol. 32. P. 1444 – 1455. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.08.048
8. **Heidari-Rarani M., Sayedain M.** Finite element modeling strategies for 2D and 3D delamination propagation in composite DCB specimens using VCCT, CZM and XFEM approaches / *Theor. Appl. Fracture Mech.* 2019. Vol. 103. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.102246
9. **Ekhtiyari A., Alderliesten R., Shokrieh M. M.** Loading rate dependency of strain energy release rate in mode I delamination of composite laminates / *Theor. Appl. Fracture Mech.* 2021. Vol. 112. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.102894
10. **Krueger R.** Virtual crack closure technique: History, approach, and applications / *Appl. Mech. Rev.* Vol. 57(2). P. 109 – 143. DOI: 10.1115/1.1595677
11. **Irwin G.** Analysis of stresses and strains near the end of the crack traversing a plate / *J. Appl. Mech.* 1957. Vol. 24. P. 361 – 364.
12. **Dugdale D. S.** Yielding of steel sheets containing slits / *J. Mech. Phys. Solids*. 1960. Vol. 8. P. 100 – 104. DOI: 10.1016/0022-5096(60)90013-2
13. **Barenblatt G. I.** The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture / *Adv. Appl. Mech.* 1962. Vol. 7. P. 55 – 129. DOI: 10.1016/S0065-2156(08)70121-2
14. **Tamuzs V., Tarasovs S., Viks U.** Progressive delamination and fiber bridging modeling in double cantilever beam composite specimens / *Eng. Fracture Mech.* 2001. Vol. 68. P. 513 – 525. DOI: 10.1016/S0013-7944(00)00131-4
15. **Liaojun Yao, Jurui Liu, Zhangming Lyu, Alderliesten R. C., Cui Hao, Chuanxi Ren, Licheng Guo.** In-situ damage mechanism investigation and a prediction model for delamination with fibre bridging in composites / *Eng. Fracture Mech.* 2023. Vol. 281. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109079
16. **Shokrieh M. M., Salamat-talab M., Heidari-Rarani M.** Dependency of bridging traction of DCB composite specimen on interface fiber angle / *Theor. Appl. Fracture Mech.* 2017. Vol. 90. P. 22 – 32. DOI: 10.1016/j.tafmec.2017.02.009
17. **Maksimenko V. N., Olegin I. P., Pustovoi N. V.** Methods for calculating the strength and stiffness of structural elements made of composites: textbook. — Novosibirsk: NSTU, 2015. — 424 p. [in Russian].
18. **Shokrieh M. M., Rajabpour-Shirazi H., Heidari-Rarani M., Haghpanahi M.** Simulation of mode I delamination propagation in multidirectional composites with R-curve effects using VCCT method / *Computational Materials Science*. 2012. Vol. 65. P. 66 – 73.