

Д. А. Бондарчук<sup>1</sup>, Б. Н. Федулов<sup>1</sup>, Е. В. Ломакин<sup>1,2</sup>

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВОЗМОЖНЫЕ ДЕФЕКТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ УГЛЕРОДНО-ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

**Аннотация.** В настоящей работе изучено влияние наличия остаточных напряжений в образце углерод-эпоксидного композита, сформировавшихся в процессе его производства, на такие возможные дефекты как межслоевое расслоение. Исследование посвящено анализу НДС в регулярных образцах вблизи зоны дефекта в течение цикла отверждения, а также при образовании свободного края в материале после разреза в зависимости от длины трещины. Для моделирования процесса отверждения решалась связанная тепловая и прочностная задача в условиях плоской деформации. Для описания поведения композитного материала в процессе производства, включая процессы формования, полимеризации, развития остаточных напряжений и деформаций, была разработана и реализована специальная пользовательская подпрограмма для ПО ABAQUS. В частности, в данной работе была проанализирована история величин скоростей энерговыделения в режимах раскрытия трещины по механизму нормального отрыва и поперечного сдвига в процессе полимеризации и последующего разрезания с образованием свободного края.

Обнаружен незначительный рост значений  $G_I$ ,  $G_{II}$  в вершине трещины в процессе полимеризации и многократное превышение этих значений после механического среза. В результате численного моделирования выявлено, что остаточные напряжения не оказывают существенного влияния на рост дефекта в композите на этапе его изготовления, но при приложении дальнейшей нагрузки на образец могут способствовать интенсивному росту расслоения.

**Ключевые слова:** композит, остаточные напряжения, дефект, разрушение, интенсивность освобождения энергии.

DOI: 10.37972/chgpu.2020.44.2.006

УДК: 539.3

### Введение

В последние десятилетия повышенное внимание уделяется глубокому пониманию процессов, вызванных остаточными напряжениями в слоистых композитах, а именно искажению формы и возможному повреждению изделия еще на стадии его изготовления. Наличие остаточных напряжений в композиционных материалах вызывает появление таких дефектов, как деламинация, коробление, а также повреждение связующего, что в свою очередь оказывает существенное влияние на статическую и

---

Поступила 20.03.2020

усталостную прочность созданного на их основе изделия. Несмотря на то, что возможности методов моделирования процессов были улучшены за последние десятилетия, задача предсказания возникновения локализованных производственных дефектов и остаточных напряжений на этапе проектирования изделия по-прежнему не полностью решена из-за недостаточной разработки теоретической базы, большого количества входных параметров (технологического процесса и материала) и отсутствия надежной масштабируемой методики. В результате процесс изготовления крупных композитных конструкций все еще требует значительных трудозатрат, связанных с эмпирической оптимизацией. В работе [1] показано, что при моделировании характер разрушения для образца полимерного композитного материала (ПКМ) существенно изменяется при учете влияния технологических напряжений в композите. В частности, некоторый тип трещин, а именно ориентированных в продольном направлении вдоль приложения нагрузки, может быть реализован только в моделях, где учтены остаточные напряжения. Максимальное напряжение, полученное при моделировании, для образцов AS4/8552-1 после полимеризации могут быть близки к предельным и не должны быть проигнорированы в последующем прочностном анализе. Существует предположение, что остаточные напряжения вблизи свободного края оказывают существенное влияние на дальнейшее распространение и рост трещин. В настоящем исследовании проведен анализ влияния присутствия остаточных напряжений, образовавшихся в процессе производства, на дефект расслаивания в углеродно-эпоксидном композитном образце в процессе отверждения и после приложения нагрузки. Таким образом, была предпринята попытка изучить природу поля напряжений в процессе изготовления и возможного роста трещины вблизи свободного края. В настоящей работе рассматривается пример углеродно-эпоксидного композита AS4/8552-1 ввиду его популярности в инженерной практике и наличия большого количества экспериментальных данных в литературе [2-4].

#### **Описание задачи**

Для анализа был рассмотрен углеродно-эпоксидный композит AS4/8552-1 с укладкой  $[0^0/90^0]_{12}$ . Геометрия образца и укладка схематически показаны на Рис. 1.

Задача оценки влияния присутствия остаточных напряжений в образце углеродно-эпоксидного композита, сформировавшихся в процессе его производства, на такие возможные дефекты как межслоевое расслоение состояла из двух этапов. Первая часть исследования посвящена анализу напряженно-деформированного состояния в регулярных образцах вблизи зоны дефекта (расслоения) в течение цикла отверждения, вторая часть посвящена изучению изменения поля остаточных напряжений после разрезания и образования свободного края в материале в зависимости от длины трещины. Для моделирования отверждения решалась связанная тепловая и прочностная

---

© Бондарчук Д. А., Федулов Б. Н., Ломакин Е. В., 2020

*Бондарчук Дарья Александровна*

**e-mail:** bondarchuk.da@gmail.com, аспирант, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия.

*Федулов Борис Никитович*

**e-mail:** fedulov.b@mail.ru, д.ф.-м.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия.

*Ломакин Евгений Викторович*

**e-mail:** evlomakin@yandex.ru, д.ф.-м.н., чл.-к. РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия.

Работа выполнена при финансовой поддержке исследований РФФИ (гранты №№ 20-01-00356, 18-31-20026).

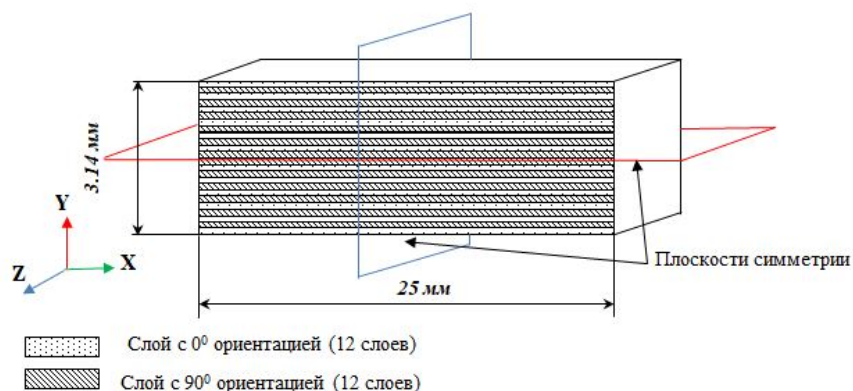


Рис. 1 Образец углеродно-эпоксидного композита AS4/8552-1 с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]_{12}$

задача в условиях плоской деформации. Для описания поведения материала во время полимеризации была использована специальная модель материала, которая учитывает изменения физико-механических свойств связующего и наполнителя (волокон) во времени и в зависимости от температуры [5-6]. Для температурных начальных и граничных условий использовался цикл отверждения, рекомендованный производителем [3]. Параметры материала, используемые при моделировании, соответствуют техническому описанию, предоставленного производителем материала [3]. На втором этапе исследования изготовленный образец с расслоением был разрезан на две части. Была проанализирована история изменения интенсивности энерговыделения в режимах I, II ( $G_I$ ,  $G_{II}$ ) с течением времени в процессе полимеризации и разрезания образца с образованием свободного края.

#### Описание КЭМ и методики

В настоящей работе задача решалась в двумерной постановке (для случая плоских деформаций) ввиду наличия симметрии укладки. Для решения задачи отверждения производился связанный тепло-прочностной анализ в конечно-элементном пакете ABAQUS с применением разработанной пользовательской подпрограммы модели материала. Для учета кинетики полимеризации смолы и описания микромеханики ПКМ в процессе производства была применена доработанная псевдо-вязкоупругая модель (CHILE). В разработанной модели материала деформация матрицы для каждого инкремента времени рассчитывалась отдельно для слоев с направлением укладки  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . Описание модели и ее верификация приведена в работе [6].

С целью правильного расчета деформаций и напряжений в образце был осуществлен переход из локальных систем координат слоев в глобальную систему координат [1]. В процессе моделирования влиянием оснастки на образец в процессе отверждения пренебрегли ввиду минимального сопротивления формы усадке. Образец считался свободным для перемещений на всех этапах расчета. Трещина моделировалась посредством seam crack technique с учетом контактного взаимодействия surface-to-surface в виду невозможности применения типовых техник виртуального закрытия трещины (VCST) и расширенного метода конечных элементов (XFEM) [7] для моделирования трещин при решении связанной тепло-прочностной задачи. Трещина длиной 0,5, 1, 2 и 6 мм располагалась между  $0^\circ$  и  $90^\circ$  слоем, как показано на Рис.2.

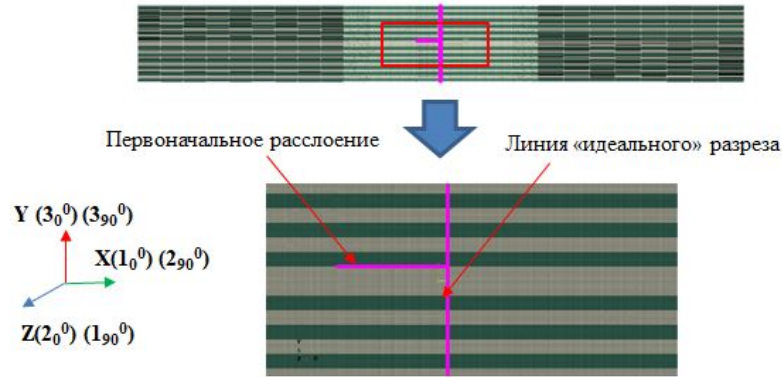


Рис. 2 КЭ модель образца AS4/8552-1 с укладкой  $[0^0/90^0]_{12}$ , плотностью сетки 8 элементов на слой в зоне дефекта и длиной трещины 2 мм

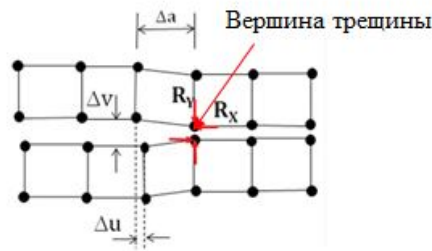


Рис. 3 Схема вычисления  $G_I$  и  $G_{II}$  (MCCI process) для 4-х узловых прямоугольных элементов

Для каждой длины трещины были рассчитаны интенсивности выделения энергии  $G_I$  и  $G_{II}$  для проверки выполнения критериев разрушения  $f_I$  и  $f_{II}$  по формулам (1) и (2) [8] во время отверждения образца и после разрезания.

$$f_I = \frac{G_I}{G_{Ic}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta v \cdot R_y}{\Delta a \cdot b} \right) \frac{1}{G_{Ic}} \quad (1)$$

$$f_{II} = \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta u \cdot R_x}{\Delta a \cdot b} \right) \frac{1}{G_{IIc}} \quad (2)$$

Схема вычисления  $G_I$  и  $G_{II}$  приведена на Рис.3.

Процесс резки был реализован с помощью специальной методики моделирования, которая деактивирует взаимодействие (контакт) между двумя частями разрезанного образца после моделирования цикла отверждения с использованием дополнительного шага анализа. Поскольку сингулярность ожидается на фронте расслаивания, более мелкая сетка была сделана только в этой зоне, а более крупные элементы используются поблизости. На каждый слой приходится 8 элементов по толщине. Модель была построена с использованием элементов CPE3T, CPE4RT таким образом, что элементы в зоне дефекта имели идеальную квадратную форму.

**Результаты моделирования**

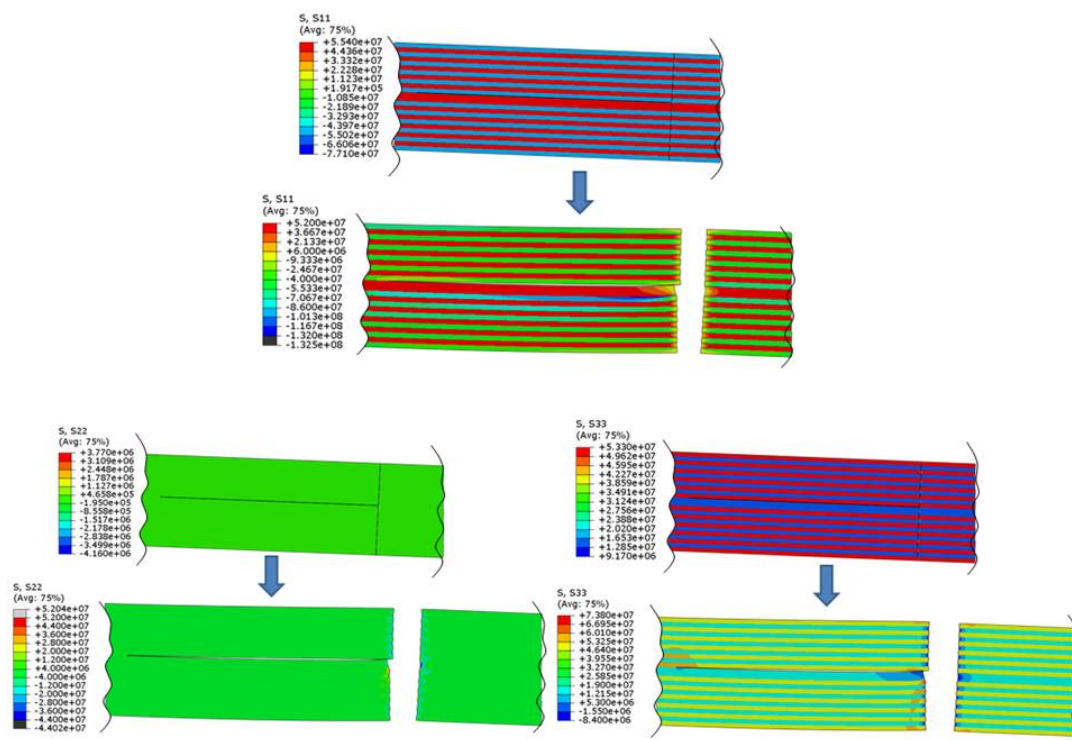


Рис. 4 Распределение напряжений в образце с укладкой  $[0^0/90^0]_{12}$  и длиной трещины 6 мм после полимеризации и после резки(в масштабе перемещений x20)

Результаты конечно-элементного моделирования – распределение остаточных напряжений для отвержденного образца с имеющимся расслоением длиной 6 мм до разреза образца и их перераспределение после разреза представлены на Рис. 4.

При моделировании разреза возникает эффект концентрации максимальных напряжений в локальных зонах области свободного края. На Рис. 4 показано, что абсолютное максимальное напряжение в продольном направлении в основном сосредоточено в довольно небольшой области на свободном крае и близко к предельному напряжению композитного материала [3]. Стоит отметить, что после механического выреза в небольшой области у вершины трещины напряжение в продольном направлении ( $\sigma_{33}$ ) по своему значению также близко к предельному. Таким образом, существует вероятность зарождения микротрещин в образце в процессе изготовления, а также при сравнительно небольшой нагрузке во время эксплуатации. Для оценки влияния длины имеющегося дефекта (трещины) в композите на вероятность дальнейшего роста в процессе полимеризации образца и дальнейшей механической обработки была проанализирована история изменения интенсивности энерговыделения в режимах I, II ( $G_I, G_{II}$ ). Значения параметров  $G_I$  и  $G_{II}$  в зависимости от длины трещины после полимеризации образца и после идеального разреза, имитирующего механическую обработку, приведены на Рис.5 и Рис.6.

Длина изначального дефекта в образце не существенно и не совсем явно влияет на значение интенсивности энерговыделения  $G_I$  и  $G_{II}$  за исключением интенсивности

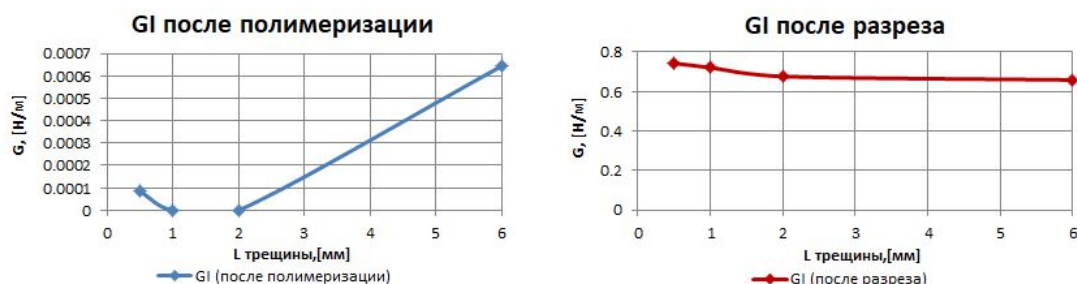


Рис. 5 Значение  $G_I$  в зависимости от длины трещины после полимеризации и после выреза

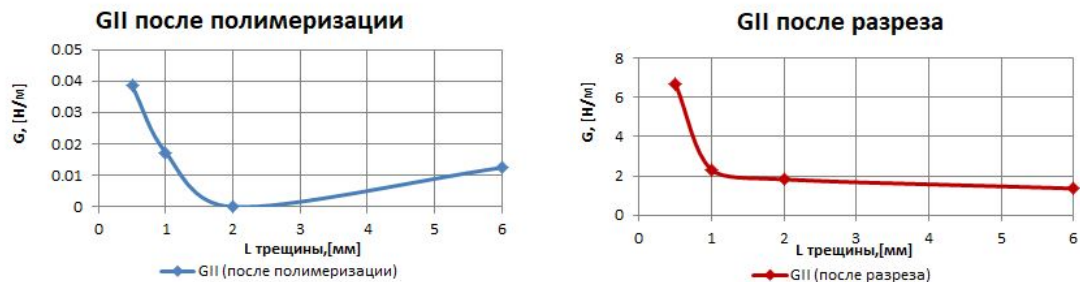


Рис. 6 Значение  $G_{II}$  в зависимости от длины трещины после полимеризации и после выреза

$G_{IC}$ Н/м	$G_{IIC}$ Н/м	$G_{IIIC}$ Н/м
280...293.4	790...2590	790...2590

Таблица 1. Мода I, Мода II и Мода III скорости выделения критической энергии

энерговыведения в режиме I в процессе изготовления образца. Для оценки характера изменения значений  $G_I$  и  $G_{II}$  с течением времени и оценки возможного дальнейшего роста трещин проведен анализ изменения  $f_I$  и  $f_{II}$  с течением времени для образца с трещиной 6 мм. Значения интенсивностей освобождения критических энергий приведено в Таблице 1 на основании экспериментов, описанных в источниках [9,10].

Как видно из Рис.8, резкий рост значений скоростей происходит в момент создания идеального выреза, при этом абсолютное значение критериев разрушения много меньше 1, что свидетельствует об отсутствии дополнительного роста трещины.

Реальные конструкции из ПКМ могут работать под действием многократных нагрузок, в том числе циклических. При циклических нагрузках критические значения

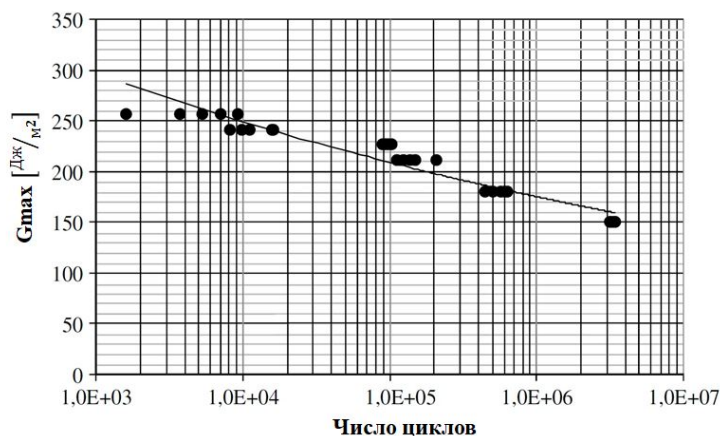


Рис. 8 Кривая усталости для материалов AS4/8552 и AS4/3501-6

интенсивностей освобождения энергии имеют тенденцию к уменьшению с увеличением числа циклов. На Рис.9 для образца AS4/8552 показано изменение значения нормализованной энергии разрушения  $G_{max}$  в зависимости от числа циклов, полученных в ходе экспериментального исследования [11]. Предел усталости, полученный для 3 миллионов циклов нагрузки составляет 50% от статической критической энергии для материала AS4/8552. С последующим увеличением числа циклов существует вероятность дальнейшего снижения критического значения энергии, что, как следствие, может привести к раскрытию и росту трещины. Эти результаты свидетельствуют о том, что предельные значения трещиностойкости при типовом усталостном нагружении на порядки превышают значения, реализуемые в образце под действием остаточных напряжений. Таким образом, усталостные характеристики ПКМ не изменятся от наличия начальных дефектов-расслоений.

### Выводы

В настоящей работе было изучено влияние наличия остаточных напряжений в образце углерод-эпоксидного композита, образовавшихся в процессе производства, на такие возможные дефекты как расслоение. Было проведено исследование распределения напряжений вблизи вершины трещины и свободного края углеродно-эпоксидного многослойного композита AS4/8552 посредством численного моделирования. Задача была решена для случая плоской деформации для композитного образца с укладкой  $[0^0/90^0]_{12}$  и идеальным прямым перпендикулярным разрезом после отверждения. Поведение материала в процессе отверждения и распределение остаточных напряжений изучалось с использованием разработанной пользовательской подпрограммы, которая была реализована в системе ABAQUS. На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что максимальные напряжения в образце в продольном направлении близки к предельным. Максимальные напряжения после разрезания образца сосредоточены в небольшой области возле свободного края. Таким образом, существует вероятность зарождения микротрещин в образце в процессе изготовления, а также при сравнительно небольшой нагрузке во время эксплуатации. При этом в процессе изготовления материала и механического разрезания готовой композитной пластины рост значений характеристик трещиностойкости достаточно мал по сравнению со статическими показателями, что позволяет сделать заключение об отсутствии дополнительного роста дефектов. Более того, полученные значения характеристик

малы и в сравнении с усталостными показателями трещиностойкости, что означает, что присутствие сравнительно небольших дефектов в материале или их появление в процессе изготовления не внесет существенного изменения в усталостные показатели прочности изделия.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Анализ остаточных напряжений в слоистых композитах на примере симметричной схемы армирования  $[0^\circ/90^\circ]$  / Д.А. Бондарчук, Б.Н. Федулов, А.Н. Федоренко [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. Пермь, 2019. № 3. С. 17–26.
- [2] Hexply AS4/8552 data sheet. <http://www.lookpolymers.com/pdf/Hexcel-HexPly-8552-Epoxy-Matrix-AS4-Fiber.pdf>. Accessed: 2020-04-17.
- [3] Van Ee David, Poursartip Anoush. HexPly 8552 Material properties database for use with COMPRO CCA and Raven. <https://www.wichita.edu/research/NIAR/Research/hexcel-8552/Additional-Documents-2.pdf>. Accessed: 2020-04-17.
- [4] Parmentier A., Wucher B., Dumas David. Determination of the model complexity level required to predict the cure-induced deformations in thermoset-based composite parts. 2014. 01.
- [5] Optimal process design for large-scale pultrusion structures / A. Safonov, D. Bondarchuk, A. Saratov et al. Beijing: Chinese Society for Composite Materials, 2017. 08.
- [6] Bondarchuk D., Fedulov B. Process modeling of carbon-epoxy composites: residual stress development during cure and analysis of free edge effects // Aviation. United States, 2019. Vol. 23, no. 1. P. 15–22.
- [7] Abaqus 6.14 Documentation. <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/v6.14/books/usb/default.htm>. Accessed: 2020-04-17.
- [8] Mabson G. Fracture Interface Elements. Charleston: 46th PMC General Session of Mil-17 (Composites Materials Handbook) Organization, 2003.
- [9] Soroush M., Malekzadeh Fard K., Shahravi M. Finite Element Simulation of Interlaminar and Intralaminar Damage in Laminated Composite Plates Subjected to Impact // Latin American Journal of Solids and Structures. 2018. T. 15, № 6.
- [10] Coronado P., Camanho P., et al.. Low Temperature and Resin Effects on the Mode I Interlaminar Fracture Toughness in Aeronautical Quality Polymer Composites // Proceedings. 2018. 11. T. 2. c. 1478.
- [11] Argüelles A., Viña J., et al.. Influence of the Matrix Type on the Mode I Fracture of Carbon-Epoxy Composites Under Dynamic Delamination // Experimental Mechanics. 2011. 03. T. 51. C. 293–301.



*D.A.Bondarchuk<sup>1</sup>, B.N.Fedulov<sup>1</sup>, E.V.Lomakin<sup>2</sup>*

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES ON POSSIBLE DEFECTS FORMED DURING PRODUCTION OF CARBON-EPOXY COMPOSITES

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,*

<sup>2</sup>*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation.*

**Abstract.** In the present study, the effect of presence of residual stresses inherited during manufacturing on delamination defect in carbon-epoxy composite specimen is investigated. The research is devoted to understanding of strain-stress state in regular specimens near defect zone during cure cycle and after free edge cut depending on crack length. To describe the behavior of the composite material during manufacturing process- including processes of formation, polymerization, development of residual stresses and strains, the special user subroutine was developed and implemented in ABAQUS FEM software. The history of energy release rates under mode I, II ( $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$ ) were analyzed over time during process of polymerization and free edge cut.

A slight increase in the  $G_I$  and  $G_{II}$  values at the crack tip during polymerization and a multiple excess of these values after a mechanical cut is shown. Obtained by modelling values for stress components are essential and cannot be ignored in consequent structural analysis. The results of the study can be applied for prediction of residual stresses in composite structure by means of simulation and further understanding the nature of fracture of composites.

**Keywords:** composite, residual stress, defect, energy release rate.

### REFERENCES

- [1] The analysis of residual stresses in layered composites with  $[0^\circ/90^\circ]$  layup / D. Bondarchuk, B. Fedulov, A. Fedorenko et al. // PNRPU Mechanics Bulletin. Perm, 2019. no. 3. P. 17–26.
- [2] Hexply AS4/8552 data sheet. <http://www.lookpolymers.com/pdf/Hexcel-HexPly-8552-Epoxy-Matrix-AS4-Fiber.pdf>. Accessed: 2020-04-17.
- [3] Van Ee David, Poursartip Anoush. HexPly 8552 Material properties database for use with COMPRO CCA and Raven. <https://www.wichita.edu/research/NIAR/Research/hexcel-8552/Additional-Documents-2.pdf>. Accessed: 2020-04-17.
- [4] Parmentier A., Wucher B., Dumas David. Determination of the model complexity level required to predict the cure-induced deformations in thermoset-based composite parts. 2014. 01.
- [5] Optimal process design for large-scale pultrusion structures / A. Safonov, D. Bondarchuk, A. Saratov et al. Beijing: Chinese Society for Composite Materials, 2017. 08.
- [6] Bondarchuk D., Fedulov B. Process modeling of carbon-epoxy composites: residual stress development during cure and analysis of free edge effects // Aviation. United States, 2019. Vol. 23, no. 1. P. 15–22.
- [7] Abaqus 6.14 Documentation. <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/v6.14/books/usb/default.htm>. Accessed: 2020-04-17.

---

*Bondarchuk Daria Alexandrovna*, PhD student, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation.

*Fedulov Boris Nikitovich*, D.Sc. in Physical and Mathematical Sciences, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation.

*Lomakin Evgenii Viktorovich*, D.Sc. in Physical and Mathematical Sciences, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation.

- [8] Mabson G. Fracture Interface Elements. Charleston: 46th PMC General Session of Mil-17 (Composites Materials Handbook) Organization, 2003.
- [9] Soroush M., Malekzadeh Fard K., Shahravi M. Finite Element Simulation of Interlaminar and Intralaminar Damage in Laminated Composite Plates Subjected to Impact // Latin American Journal of Solids and Structures. 2018. Т. 15, № 6.
- [10] Coronado P., Camanho P., et al.. Low Temperature and Resin Effects on the Mode I Interlaminar Fracture Toughness in Aeronautical Quality Polymer Composites // Proceedings. 2018. 11. Т. 2. с. 1478.
- [11] Argüelles A., Viña J., et al.. Influence of the Matrix Type on the Mode I Fracture of Carbon-Epoxy Composites Under Dynamic Delamination // Experimental Mechanics. 2011. 03. Т. 51. С. 293–301.