

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТВЕРЖДЕНИЯ КОМПОЗИТОВ И АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Д. А. Бондарчук, Б. Н. Федулов

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), Москва

В последние десятилетия повышенное внимание уделяется глубокому пониманию процессов, вызванных остаточными напряжениями в многослойных композитах, а именно искажению формы и возможному повреждению изделия. Наличие остаточных напряжений в композиционном материале оказывает влияние на возникновение таких дефектов, как деламинация, коробление, а также появление микротрещин в матрице материала [1, 2], что в свою очередь оказывает существенное влияние на статическую и усталостную прочность изделия из композиционных материалов.

В настоящей работе рассмотрено изменение распределения поля остаточных напряжений в образце из известного материала AS4/8552-1 с укладкой слоев $[0^\circ/90^\circ]_n$ в процессе отверждения и изменения степени полимеризации. Также исследовано распределение напряжений на свободном крае [2, 3] после разрезки образца на две части вдоль направления армирования. Показано существенное изменение остаточных напряжений на свободном крае до и после механического среза. Исследование проведено с помощью пакета конечно-элементного моделирования ABAQUS и разработанной модели материала, которая была реализована в специальной пользовательской подпрограмме. В процессе моделирования решалась связанная тепловая и прочностная задача в условиях плоской деформации.

Ключевые слова: остаточные напряжения, композит, релаксация напряжений свободный край.

Введение

Широко известная проблема концентрации напряжений – так называемый эффект на свободном крае исследовался большим количеством ученых [1 – 7]. Эффекты, связанные с остаточными напряжениями в ПКМ, в основном объясняются несоответствием свойств материала двух смежных разнонаправленных слоев ламината, которое в свою очередь, вызывает возникновение трехмерных нормальных компонентов тензора напряжений. В работе [3] Shoufeng Hu и др. провели детальное исследование влияния свободного края на перераспределение остаточных напряжений, деламинацию в образцах посредством теоретического моделирования, численного анализа и экспериментальных исследований для композитов с металлической матрицей (КММ). Влияние внутренних напряжений на свободном крае в углерод-эпоксидных композитах в отличие от КММ недостаточно изучено и до настоящего времени широко не освещалось в научных статьях. Однако статьи, посвященные анализу дефектов в зоне свободного края под нагрузкой (включая термомеханическое нагружение), ежегодно появляются в научных журналах [4 – 7]. В большинстве исследований остаточные напряжения в композитах не учитываются при построении математических моделей.

Остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления, оказывают непосредственное влияние на качество продукции [8, 9] и могут вызвать проблемы со сборкой конструкции в виду коробления. Кроме того, остаточные напряжения могут достигать значений, близких к предельным и значительно снижать прочность конечной композитной структуры. Наличие остаточных напряжений в сочетании с механическими нагрузками может привести к таким дефектам в композитных

структурах, как поперечное растрескивание (известное как микротрещины), расслоение и коробление. Все эти производственные эффекты сподвигают исследователей на изучение физико-химических изменений, сопровождающих процессы производства ПКМ.

Существующие подходы к анализу изменений механических свойств, напряжений и деформаций термореактивных композитов систематизированы в работах [10, 11 – 15].

Целью данного исследования является:

– определение величины остаточных напряжений в композитном образце в процессе полимеризации;

– определение изменения НДС в отвержденном образце после разрезания на две части.

Проблема формирования остаточных напряжений в ПКМ является сложной, поскольку она зависит от многих факторов и включает в себя несколько подзадач. В виду простоты и в качестве первого шага исследования в работе рассмотрен образец с укладкой $[0^\circ/90^\circ]_n$. Поскольку существует симметрия, моделирование может быть осуществлено в двумерной постановке для случая плоских деформаций. Следует отметить, что эффекты искажения формы и разрушения становятся более очевидными для композитов с укладкой $[0^\circ/90^\circ]_n$ из-за максимальной разницы в анизотропных свойствах каждого отдельного слоя.

В настоящей работе рассматривается пример углеродно-эпоксидного композита AS4/8552-1 в виду его популярности в инженерной практике и наличию данных в литературе [10, 16, 17]. Исследование проводилось с помощью универсального конечно-элементного пакета и разработанной модели материала, которая была реализована в пользовательской подпрограмме.

1. Описание задачи

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

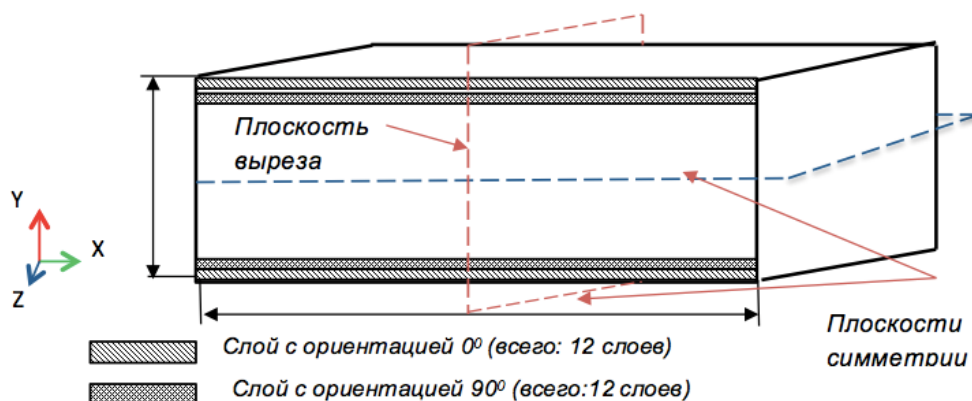


Рис.1. Образец углеродно-эпоксидного композита AS4/8552-1 с укладкой $[0^\circ/90^\circ]_{12}$

Задача анализа напряжений на свободном крае состояла из двух этапов. На первом этапе происходило моделирование процесса отверждения и формирования остаточных напряжений. На втором этапе – анализ НДС на свободном крае в зоне поперечного выреза.

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 [10, 11, 18, 19].

Для температурных начальных и граничных условий использовался цикл отверждения, рекомендованный производителем (рис. 2). Параметры материала, используемые при моделировании, были взяты из технического описания, предоставленного производителем материала [16].

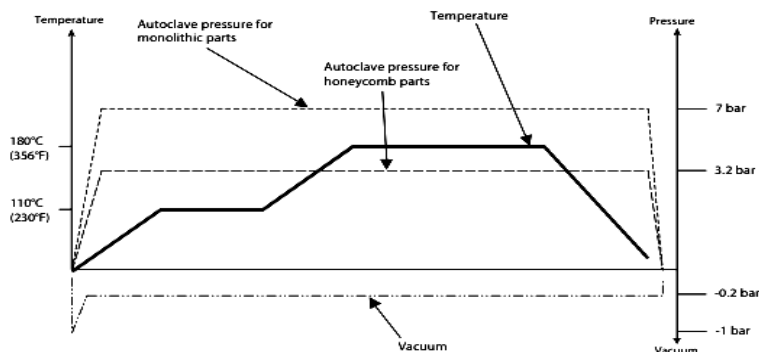


Рис.2. Температурный цикл отверждения

2. Модель материала

Одним из ключевых процессов при изготовлении композитной детали и одновременно «узким местом» моделирования технологического процесса является фазовый переход и затвердевание смолы. Для описания поведения композита в процессе отверждения необходимо учитывать кинетику полимеризации смолы и изменения физико-механических свойств композита.

В настоящее время широко используются следующие модели материалов - упругая, псевдо вязкоупругая (модель CHILE [20]) и вязкоупругая для прогнозирования остаточных напряжений для термореактивных полимерных композитов, вызванных процессом отверждения. В работах [20, 21] было показано, что модель CHILE и вязкоупругая модель достаточно точно описывают поведение материала и могут быть надежно применены при моделировании поведения термореактивных полимерных композитов в процессе отверждения. В настоящей работе для описания поведения углерод-эпоксидного композита (AS4/8552-1) во время затвердевания использовалась модель CHILE в виду ее простоты. Эффективные механические свойства, а также деформации, образующиеся вследствие термической и химической усадки, рассчитываются с использованием микромеханических подходов [22] на основе данных, представленных в [16]. Модель материала CHILE была встроена в программное обеспечение для конечно-элементного моделирования ABAQUS посредством разработанной пользовательской подпрограммы UMAT. Встроенная пользовательская подпрограмма UEXPAN использовалась для определения объемных деформаций, заданных как функция от температуры и степени отверждения. Подпрограммы HETVAL и USDFLD использовались для учета внутреннего тепловыделения при анализе теплопередачи и для переопределения переменных поля в каждой точке материала соответственно. Верификация разработанной подпрограммы приведена в работе [23].

3. Результаты моделирования

В настоящей работе задача решалась в двумерной постановке (для случая плоских деформаций) в виду наличия симметрии укладки. В процессе моделирования влиянием оснастки на образец в процессе отверждения было пренебрежено в силу минимального сопротивления формы усадке. Образец считался свободным для перемещений на всех этапах расчета. Процесс резки был реализован с помощью специальной методики моделирования, которая деактивирует взаимодействие между двумя частями разрезанного образца после моделирования цикла отверждения с использованием дополнительного шага анализа. Для решения задачи отверждения производился связанный теплопрочностной анализ в конечно-элементном пакете ABAQUS. Модель была построена с использованием элементов CPE3T, CPE4RT таким образом, что элементы в зоне выреза имеют квадратную форму. Сетка около зоны свободного края (зоны выреза) измельчена с целью возможности фиксации возникающих эффектов в данной области. Конечно-элементная модель с локальной (123) и глобальной (XYZ) системами координат представлена на рис. 3.

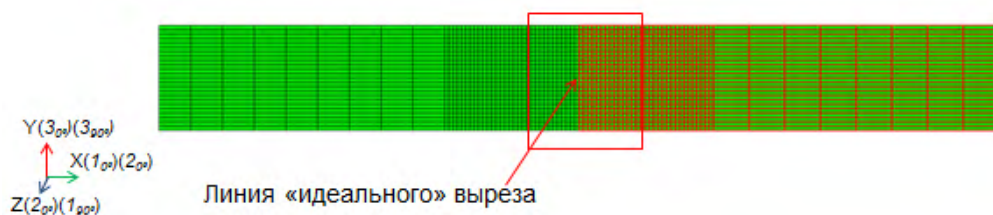


Рис. 3. КЭМ образца толщиной 3,12 мм, ориентацией $[0^\circ/90^\circ]_{12}$ и плотностью сетки в зоне свободного края- 1 элемент на 1 композитный слой

Сопоставление компонентов напряжений в локальной и глобальной системах координат для слоев с ориентацией 0° и 90° показано в табл. 1.

Таблица 1

Сопоставление компонентов напряжений в локальной и глобальной системах координат

Глобальная система координат	Локальная система координат для слоев с ориентацией 0°	Локальная система координат для слоев с ориентацией 90°
σ_x	σ_{22}	σ_{11}
σ_y	σ_{33}	σ_{33}
σ_z	σ_{11}	σ_{22}
σ_{xy}	σ_{23}	σ_{13}

В виду того, что результат моделирования может зависеть от качества сетки, был проведен анализ чувствительности к размеру элемента, были рассмотрены модели – 1, 2, 4, 8, 16 и 32 элемента на один слой в зоне свободного края (рис. 3).

Результаты конечно-элементного моделирования – распределение остаточных напряжений для отвержденного образца до разреза и их перераспределение после разреза – представлены на рис. 4. При моделировании выреза возникает эффект концентрации максимальных напряжений в локальных зонах области свободного края.

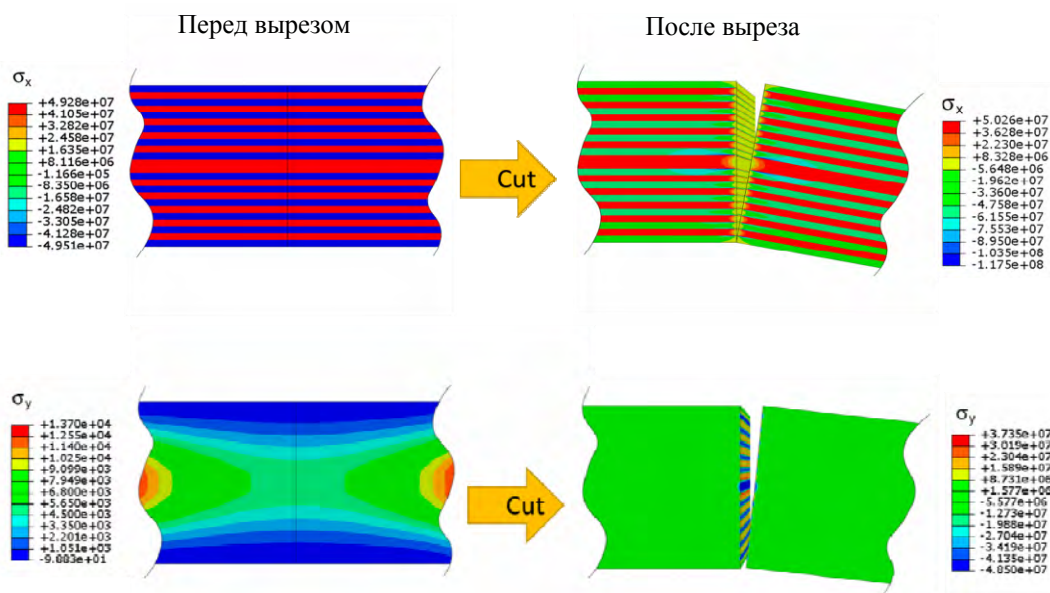


Рис. 4. Распределение напряжений в образце после полимеризации и после разреза (32 элемента на 1 слой)

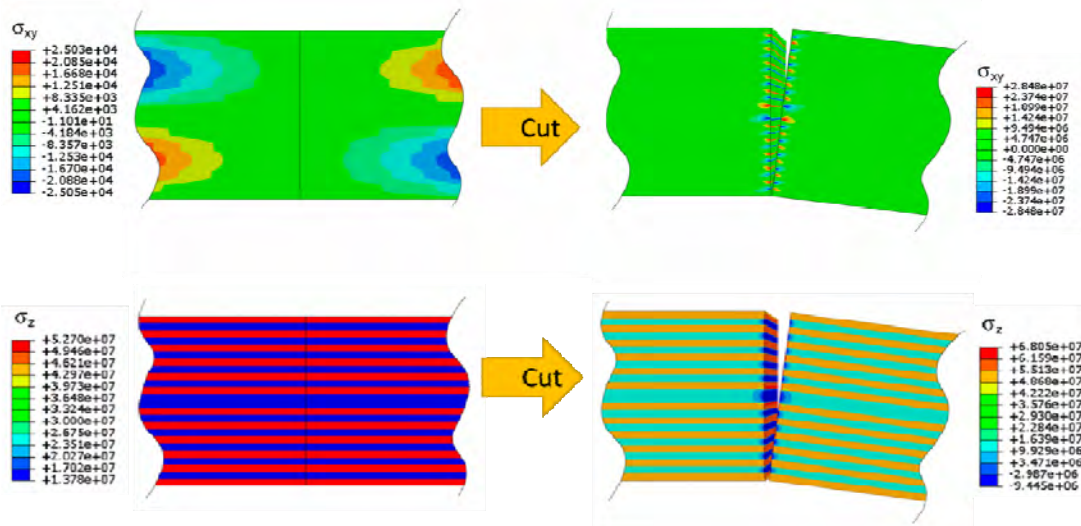


Рис. 4. Окончание

Результаты моделирования – максимальное и минимальное напряжение в композите (σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , σ_{13} вдоль толщины свободного края) в глобальной системе координат до разрезания показаны на рис. 5 для различных конечно-элементных сеток. Следует отметить, что компоненты напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , возникающие в образце во время полимеризации (до разрезания), не так чувствительны к размеру сетки, как напряжения после выреза (см. рис.6). Единственное исключение составляет максимальное напряжение σ_{22} по толщине образца. При увеличении плотности сетки (количества элементов на слой) на рис. 5 (а) наблюдается незначительное монотонное увеличение максимального напряжения по толщине образца до разрезания. Напротив, при увеличении количества элементов на слой, на рис. 5 (е, ф) наблюдается монотонное уменьшение максимального напряжения по толщине до разрезания образца. Разница в максимальном абсолютном напряжении σ_{13} перед разрезанием образца составляет около 35 % для сеток с 32 элементами на композитный слой и 1 элементом на слой.

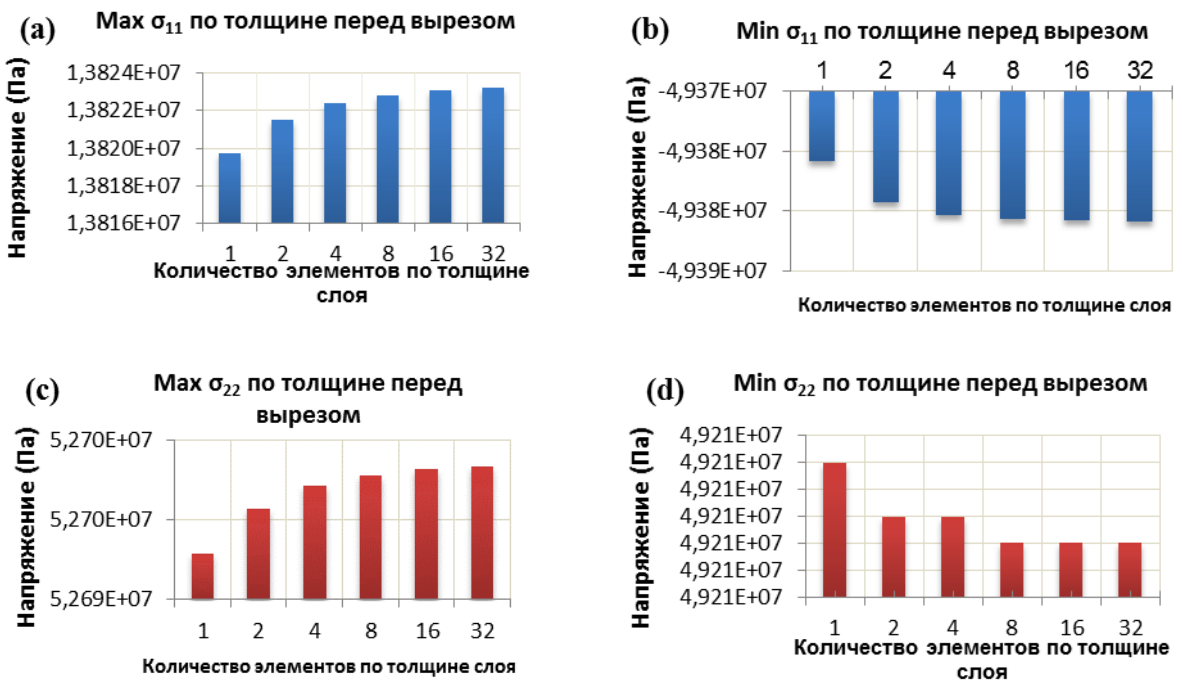


Рис. 5. Анализ чувствительности к размеру сетки

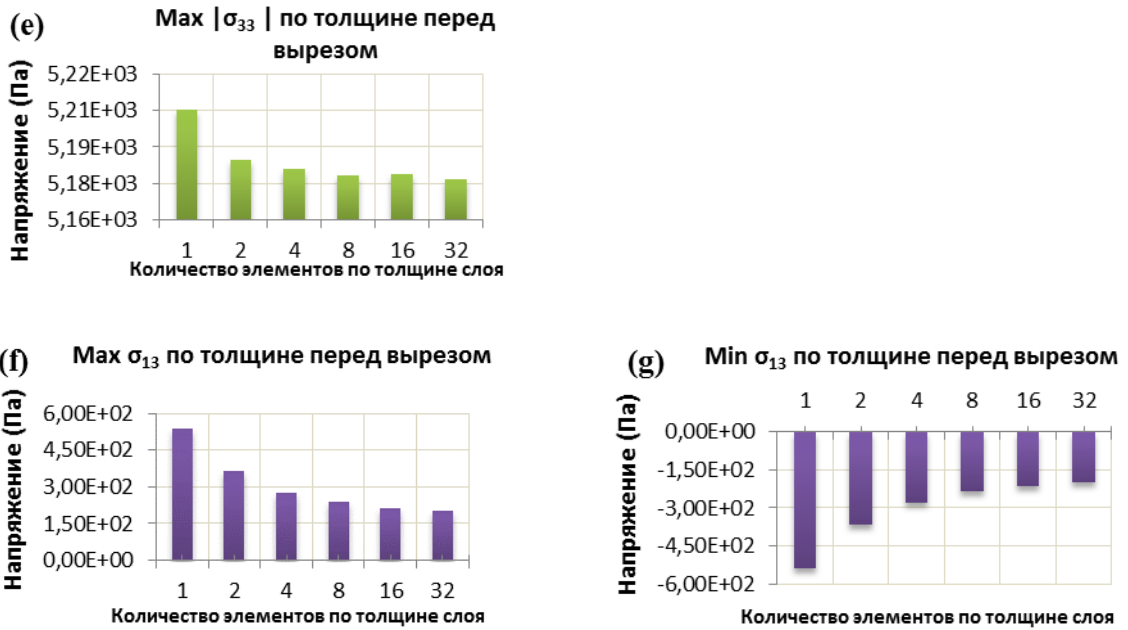


Рис. 5. Окончание

Отношение максимального (минимального) напряжения в композите до разреза к напряжению после разреза представлено на рис.6 для различных вариантов сеток. Напряжение σ_{22} до разреза и после разреза изменяется незначительно (см. рис. 6 (с)). В то же время существенное увеличение максимальных напряжений σ_{33} и особенно максимальных напряжений σ_{13} по толщине после разрезания образца можно наблюдать на рис.6 (e, g). Полученные результаты подтверждают существование зависимости напряжений в образце после разреза от размера сетки. В связи с тем, что величина напряжения значительно меняется с увеличением количества элементов на слой, существует вероятность ошибки при численном анализе при использовании более грубой сетки.

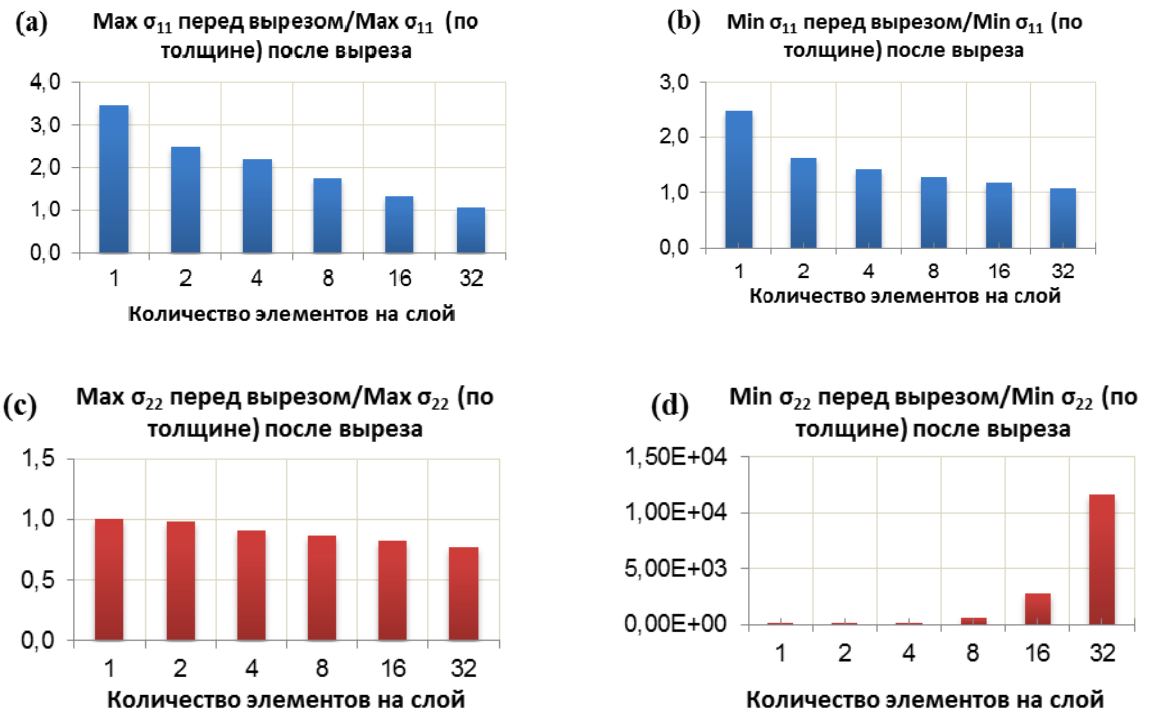


Рис. 6. Отношение максимального (минимального) напряжения в композите до разреза к напряжению после разреза для различных сеток

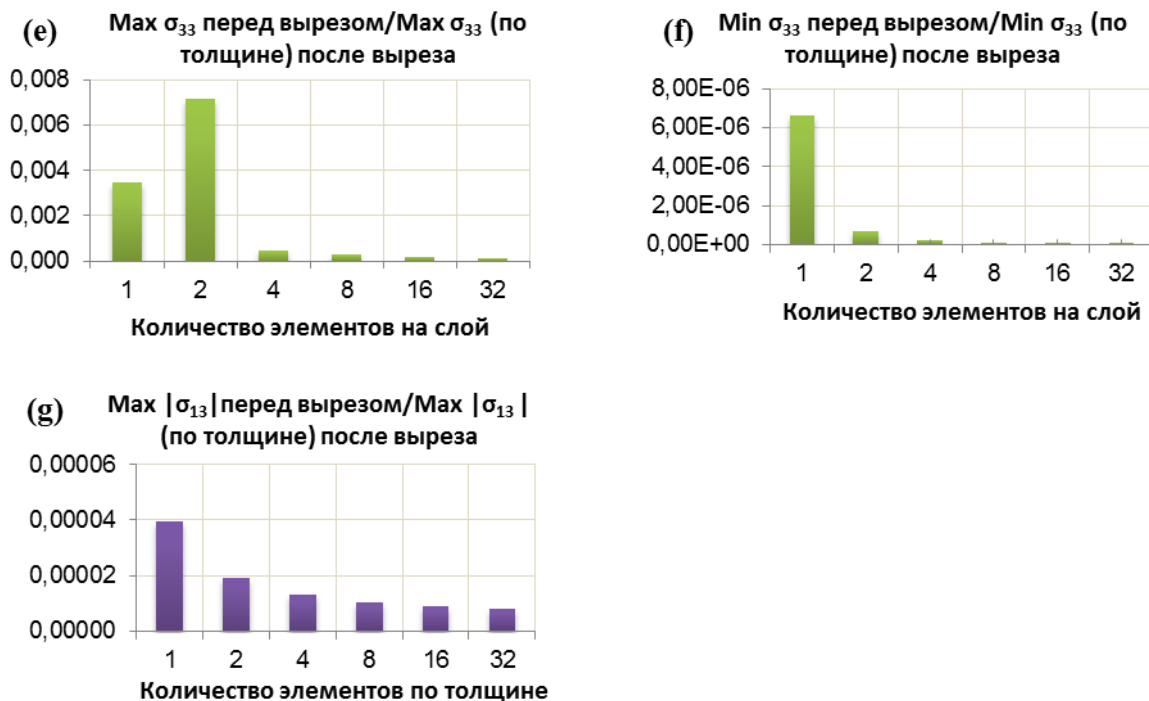


Рис. 6. Окончание

На рис. 6 и на рис. 7 показано, что абсолютное максимальное напряжение в поперечном направлении (σ_y), в основном, сосредоточено в довольно небольшой области и близко к предельному напряжению композитного материала [16]. Таким образом, существует вероятность зарождения микротрещин в образце в процессе изготовления или при сравнительно небольшой нагрузке при эксплуатации. Результаты моделирования согласуются с выводами, указанными в [21], которая продемонстрировала инициирование трещин матрицы в композитном образце $[0^\circ/90^\circ]$ в результате остаточных напряжений, полученных во время цикла отверждения.

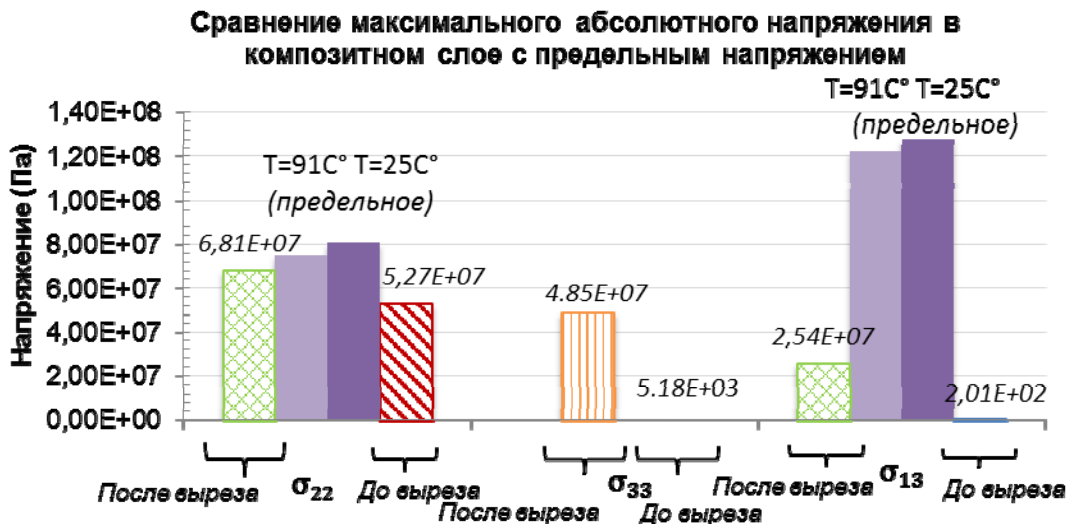


Рис. 7. Напряжение сравнения в композите до, после резки с предельным напряжением при T = 25 °C, T = 91 °C

Выводы

В настоящей работе было проведено исследование распределения напряжений вблизи свободного края углеродно-эпоксидного многослойного композита AS4 / 8552 посредством конечно-элементного моделирования, проведен анализ чувствительности НДС к качеству сетки в зоне выреза. Задача была решена для случая плоской деформации для композитного образца с укладкой $[0^\circ/90^\circ]$ и идеальным прямым разрезом после отверждения. Поведение материала в процессе отверждения и распределение остаточных напряжений изучалось с использованием разработанной пользовательской программы, которая была реализована в программе ABAQUS. На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что максимальные напряжения в образце близки к предельным. Максимальные напряжения после разрезания образца сосредоточены в небольшой области (не превышающей 10 микрон) возле свободного края.

Согласно данным, приведенным в техническом паспорте продукта, предел прочности при поперечном растяжении для препрега AS4/8552 составляет 81 МПа. Максимальное напряжение, полученное при моделировании, для образцов после полимеризации перед вырезом составляет 52,7 МПа, а для образцов после разреза значения напряжения достигают 68 МПа. Напряжение вне плоскости (σ_{33}) после разреза составляет 48 МПа. Таким образом, значения для напряжений являются существенными и не могут быть проигнорированы в последующем прочностном анализе. Деламинация в композите наиболее вероятно происходит по механизму нормального отрыва и не связано со смещением слоев. Наблюдаемые эффекты невозможно увидеть, используя при моделировании оболочечные элементы, основанные на плоском напряженном состоянии.

Результаты в распределении напряжений существенно зависят от размера элемента сетки. Таким образом, существует вероятность ошибки. Чтобы избежать данной ошибки, необходимо использовать не менее 4-х элементов по толщине слоя.

Разработанная модель (полимеризации) является универсальной и может быть использована для определения остаточных напряжений и деформаций в изделиях из ПКМ с терморепактивным связующим.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-31-20026).

Литература

1. Mittelstedt Ch., Becker W. Free-edge effects in composite laminates // Applied Mechanics Reviews. – 2007. – 60. 10.1115/1.2777169.
2. Rasuo B., Dinulovic M. Free-edge stresses in composite laminates under mechanical loading // ICCM International Conferences on Composite Materials. 2011.
3. Hu Shoufeng, Karpur P., Matikas Th. E., Shaw L., Pagano N. J. Free edge effect on residual stresses and debond of a composite fibre/matrix interface // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 1995. – 2:3. – 215 – 225.
4. Domb M. M., Hanse, J. S. The effect of cooling rate on free-edge stress development in semi-crystalline thermoplastic laminates // Journal of composite Materials. – 1998. – 32 (4), – 361 – 386, <https://doi.org/10.1177/002199839803200403>.
5. Amrutharaj G. S., Khin Yong Lam, Cotterell B. Delaminations at the free edge of a composite laminate // Composites. Part B: Engineering. – 1996. – V. 27. – Is. 5, – P. 475 – 483, [https://doi.org/10.1016/1359-8368\(96\)00015-7](https://doi.org/10.1016/1359-8368(96)00015-7).
6. Islam M. S., Prabhakar P. Modeling framework for free edge effects in laminates under thermo-mechanical loading // Composites. Part B: Engineering. – 2017. – V. 116. – P. 89 – 98, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.072>.
7. Yin W.-L. Simple solutions of the free-edge stresses in composite laminates under thermal and mechanical loads // Journal of Composite Materials. – 1994. – 28 (6). – 573 – 586, <https://doi.org/10.1177/002199839402800605>.
8. Fedulov B. N., Safonov A. A., Sergeichev I. V., Ushakov A. E., Klenin Y. G., Makarenko I. V. Strength analysis and process simulation of subway contact rail support bracket of composite materials // Applied Composite Materials. – 2016. – 23(5). – 999 – 1013.

9. Ushakov A. E., Safonov A. A., Sergeichev I. V., Fedulov B. N., Kornienko E. I., Timofeev M. A., et al. Design and optimization of a vacuum infusion technological process for hopper car fabrication using polymeric composite materials // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2015. – 44(3). – 276 – 282.
10. Baran I., Çınar K., Ersoy N., Akkerman R., Hattel J. H. A review on the mechanical modeling of composite manufacturing processes // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2016. – 10.1007/s11831-016-9167-2.
11. Johnston A. An integrated model of the development of process-induced deformation in autoclave processing of composite structures: Ph. D. thesis. The University of British Columbia, 1997.
12. White SR, Hahn HT Process modelling of composite materials: residual stress development during cure. Part II. Experimental validation // *J. Compos. Mater.* – 1992. – 26(16). – 2423 – 2453.
13. Johnston A, Vaziri R, Poursartip A. A plane strain model for process-induced deformation of laminated composite structures // *J. Compos. Mater.* – 2001. – 35(16). – 1435-1469.
14. Chachad Y. R., Roux J. A., Vaughan J. G., Arafat E. Three-dimensional characterization of pultruded fiberglass-epoxy composite materials // *J. Reinf. Plast. Comp.* – 1995. – 14. – 495 – 512
15. Valliappan M., Roux J. A., Vaughan J. G., Arafat E. S. Die and post-die temperature and cure in graphite-epoxy composites // *Composites. Part B. Engineering*. – 1996. – 27. – 1 – 9.
16. Hexply 8552, Epoxy Matrix Product Datasheet.[Electronic resource]. Mode of Access: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_8552_eu_DataSheet.pdf. (Last viewed:12/04/18).
17. Paramentier A., Wucher B., Dumas D. Determination of the model complexity level required to predict the cure-induced deformations in thermoset-based composites // 16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014.
18. Johnston A. An integrated model of the development of process-induced deformation in autoclave processing of composite structures: Ph. D. thesis, the University of British Columbia. 1997.
19. Bogetti T. A., Gillespie J. W. Jr. Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates // *J. Compos. Mater.* – 1992. – 26 (5). – 626 – 660.
20. Dongna Li, Xudong Li, Jianfeng Dai, Shangbin Xi. A comparison of curing process-induced residual stresses and cure shrinkage in micro-scale composite structures with different constitutive laws // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, February 2016, SAGE Publishing DOI: 10.1177/0731684416629764 (2017).
21. Zobeiry N., Forghani A., Li Chao, Gordnian K., Thorpe R., Vaziri R., Fernlund G., Poursartip A. Multiscale characterization and representation of composite materials during processing. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical // Physical and Engineering Sciences* – 2016. – 374. 20150278. 10. 1098/rsta.2015.0278.
22. Wijskamp S., Akkerman R., Lamers E. A. D. Residual stresses in non-symmetrical carbon-epoxy laminates / ed. by M. J. Martin, H. T. Hahn // *Proceedings of the 14th International conference on Composite Materials, ICCM14. San Diego, USA. 2003.*
23. Бондарчук Д. А., Федулов Б. Н. Анализ напряжений в ПКМ с концентратором // *Международный форум «Инженерные системы-2018»: сб. докл.* – С. 7 – 20.

SIMULATION OF POLYMERIZATION PROCESS OF COMPOSITE AND ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES

D. A. Bondarchuk, B. N. Fedulov

Department of Aircraft Design Moscow Aviation Institute
(National Research University), Moscow

Last decades, increased attention is paid to the deep understanding of the process induced residual stresses (locked-in) and their effect on shape distortion and fracture of industrial construction products. Residual stresses evaluation is particularly important in multilayered composites with anisotropic thermo-mechanical properties, where the ply orientations and stacking sequences highly influence the appearing of manufacturing stresses.

In the present study, the effect of free edge on residual stresses inherited during manufacturing of thermoset multilayered composites was investigated. The behavior during the manufacturing cycle of well-known AS4/8552-1 carbon-epoxy composite was studied by means of finite element modeling in ABAQUS software. Constitutive relations of the composite material characterizing the manufacturing process – including processes of formation, polymerization, and development of residual strains and stresses was performed by developed user subroutine-UMAT, which describes the visco-elastic behavior and composite material characteristics changes due to matrix solidification. The program was implemented in ABAQUS and validated based on experiments of specimens curing. Related thermal and strength problem under plane strain conditions was solved during the simulation.

Keywords: residual stress, composite, stress relaxation, free edge.

УДК 519.6

ПРОГРАММА ДЛЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЧЕЙСТЫХ (РЕШЁТЧАТЫХ) СТРУКТУР

А. Н. Быков, В. В. Попов, Е. А. Сеницын, Д. Ю. Дьянов, М. В. Медведкина

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В рамках проекта «Разработка атласа типовых форм для топологической оптимизации конструкций, формируемых методом селективного лазерного плавления, и их производственная верификация», участниками которого являются НИТУ «МИСиС», АО «НПО «ЦНИИТМАШ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ведется разработка программного обеспечения для подготовки компьютерных моделей деталей в аддитивном производстве, позволяющего проводить топологическую оптимизацию деталей (на основе решения линейных задач статической прочности с различными ограничениями целевой функции), генерировать и использовать различные типы ячеистых (решётчатых) структур для заполнения объёма деталей. В статье приведено краткое описание базовой версии создаваемого программного обеспечения.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, топологическая оптимизация, ячеистые структуры, решётчатые структуры, генеративный дизайн, неявное представление геометрии, TPMS структуры.

Введение

Огромный практический интерес в области аддитивных технологий представляет создание деталей сложных форм посредством генеративного дизайна с использованием топологической оптимизации и решётчатых структур, что позволяет более эффективно использовать материал (за счёт этого достигается его экономия), создавать облегченные конструкции, уменьшать время изготовления деталей. Функциональность для выполнения топологической оптимизации деталей, а также для создания и использования ячеистых (решётчатых) структур отсутствует в современных САД пакетах, что существенно затрудняет подготовку деталей генеративного дизайна в них. Существует необходимость создавать специальное программное обеспечение (ПО), поскольку для реализации