

УДК 621.9.015+019

Разработка расчетной модели полимерного композиционного материала, учитывающей внутренние повреждения кромок, образующихся при механической обработке

Захаржевский Павел Александрович

pavel.zakharzhevskiy@inbox.ru

SPIN-код: 4370-4757

Титов Сергей Анатольевич

s_titov@inbox.ru

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена технология низкоповреждающей механической обработки с применением лезвийного инструмента в деталях из ПКМ. Выполнено исследование с применением метода неразрушающего контроля (рентгеновская томография) структуры внешних и внутренних повреждений в слоистом ПКМ, образующихся в процессе механической обработки. На основе полученных данных представлена расчетная модель ПКМ, учитывающая образующиеся в процессе механической обработки межслоевые расслоения микро- и макро-масштаба. Показана сходимость результатов расчета с экспериментальными данными на примере диаграммы напряжение-деформация.

Ключевые слова: композиционный материал, лезвийный инструмент, межслоевые расслоения, метод конечного-элемента, механическая обработка, неразрушающий контроль

Development of a calculation model of a polymer composite material taking into account internal damage to edges formed during mechanical processing

Zakharzhevskiy Pavel Alexandrovich

pavel.zakharzhevskiy@inbox.ru

SPIN-code: 4370-4757

Titov Sergey Anatolievich

s_titov@inbox.ru

Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky, Moscow, Russia

Abstract. The technology of low-damaging mechanical processing using a blade tool in CFRP parts is considered. A study was performed using the method of non-destructive testing (X-ray tomography) the structures of external and internal damages in layered CFRP formed during mechanical processing. Based on the data obtained, a computational model of CFRP is presented, which takes into account interlayer stratifications of micro- and macro-scale formed during mechanical processing. The convergence of the calculation results with experimental data is shown using the stress-strain diagram as an example.

Keywords: composite material, blade tool, interlayer stratification, finite element method, mechanical processing, non-destructive testing

Введение. Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в изделиях авиационной промышленности имеет ряд преимуществ, которые позволяют обеспечить массовую эффективность силовой конструкции летательного аппарата (ЛА), а также ее высокий ресурс. В процессе изготовления таких изделий требуется проведение механической обработки, целью которой является придание детали заданных размеров, изготовление проемов, сверление отверстий под крепеж для последующего соединения и сборки элементов конструкции. Именно зона соединений, как правило, является критическим элементом конструкций [1].

В результате механической обработки (сверления, резки, фрезерования) на кромках ПКМ могут образовываться технологические дефекты (сколы, задиры, заусенцы, расслоения, др.) [2], которые приводят к снижению как прочности, так и долговечности конструкций [3]. Причинами образования дефектов могут быть неоптимальные режимы обработки, качество режущего инструмента, хрупкость связующего и др.

Расслоение является наиболее опасным дефектом при изготовлении отверстий в структурах из ПКМ, так как они могут критически влиять на механические характеристики изделия [4]. Поэтому для обеспечения безопасности и требуемых прочностных характеристик конструкций из ПКМ вводят значительные коэффициенты надежности, которые не позволяют получить массовую эффективность конструкции. В связи с этим, в настоящее время становятся важными и актуальными исследования, направленные на повышение качества отверстий, которые впоследствии позволят снизить введенные коэффициенты запаса.

При сверлении необходимо контролировать полученные повреждения, температуры в зоне обработки, а также возникающие осевые усилия. При этом наибольшее разрушающее воздействие на слоистый материал оказывает вертикальная составляющая силы резания [5].

Исследование структуры микроповреждений ПКМ после механической обработки. Для исследования структуры внутренних микроповреждений, возникающих вследствие механической обработки лезвийным инструментом, проведены исследования образцов с изготовленными отверстиями с применением компьютерной томографии.

Методом компьютерной микротомографии были изучены образцы отверстий в углепластике после механической обработки режимами двух типов — заводском «З» и низкоповреждающей технологии ЦАГИ «К».

Полученные результаты неразрушающего контроля показывают целесообразность применения низкоповреждающей механической обработки при изготовлении методических образцов для определения расчетных характеристик материала. В результате это позволит получить близкие к действительным характеристики материала.

Характерная поверхность отверстия и зона расслоений в образцах серии «З» представлена на рис. 1. На рис. 2 показаны межслоевые расслоения и поверхность образца серии «К».

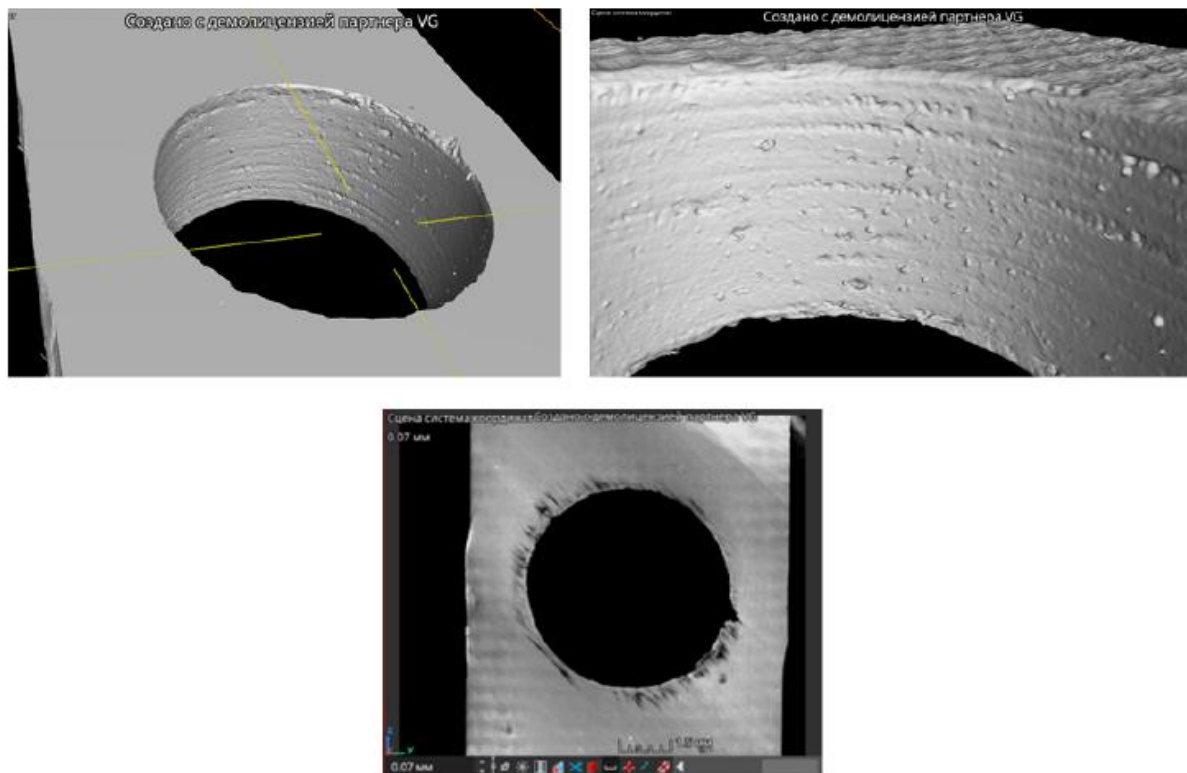


Рис. 1. Поверхность и межслоевые расслоения образца серии «3», результат компьютерной томографии

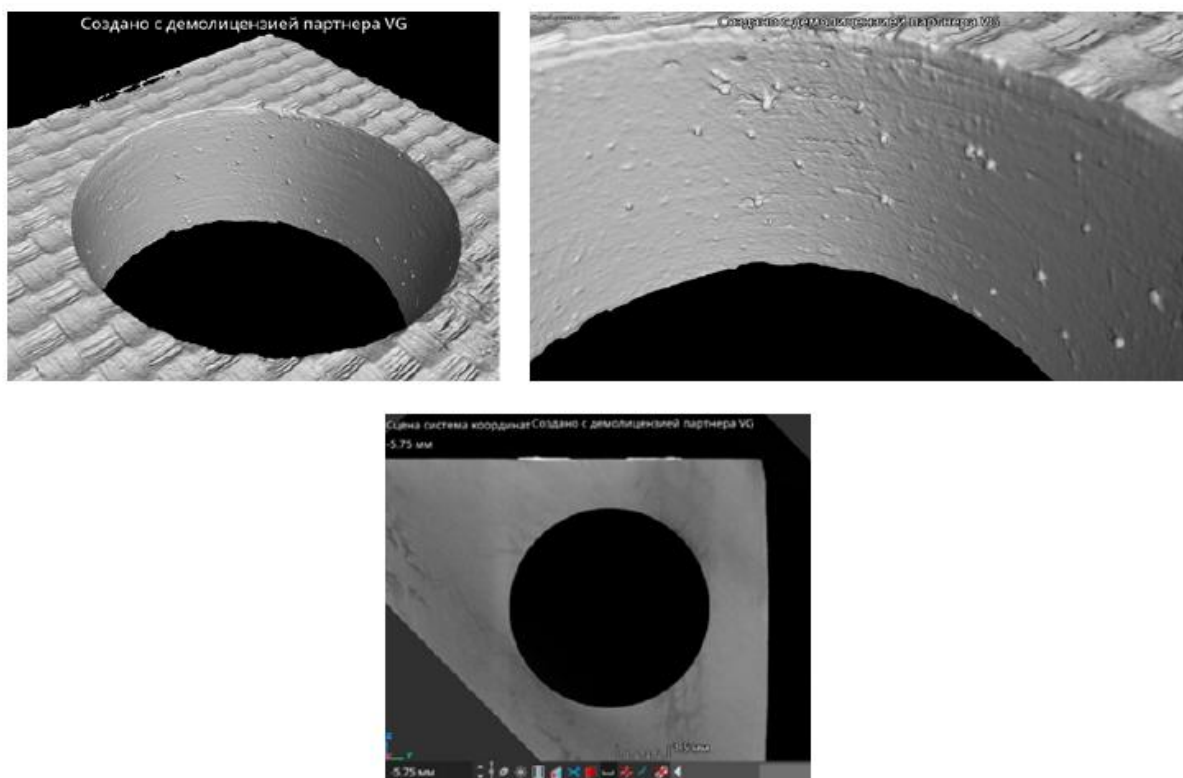


Рис. 2. Поверхность и межслоевые расслоения образца серии «К», результат компьютерной томографии

Результаты послойной компьютерной томографии показали, что в заводской технологии сверления в 79 % слоев пакета присутствуют зоны расслоения, которые отличны от номинального диаметра отверстия, в то время как в технологии механической обработки, разработанной ЦАГИ, данный показатель составляет 31 %.

При анализе данных было отмечено, что в образцах «З» разброс значений максимальных диаметров зоны расслоения в слоях хаотичен. В образцах «К» данные значения отличны от номинального диаметра только в первых, средних и последних двух слоях пакета.

Разработка расчетной модели ПКМ с применением МКЭ. С целью оценки влияния повреждаемости материала после механической обработки на получаемые прочностные характеристики образцов и деталей из ПКМ предлагается разработка математической модели слоистого ПКМ, учитывающей повреждения по всей толщине пакета, нанесенных при инструментальном воздействии.

В расчетной модели учитываются характерные размеры, формы и глубины образующихся повреждений. При этом вводится коэффициент расслоения, описанный в работе [6], определяющийся отношением максимального диаметра зоны повреждения к диаметру отверстия, графически представленные на рис. 4.

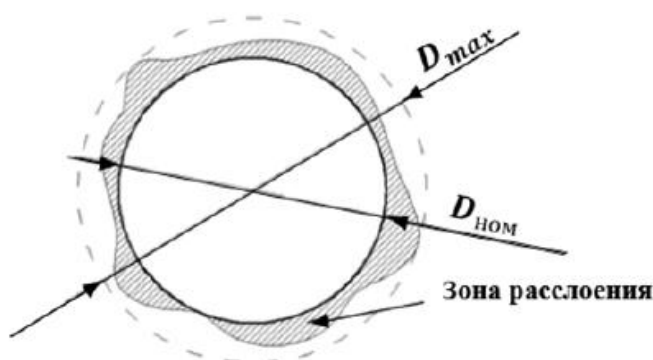


Рис. 4. Размеры зоны повреждений [6]

Сформирована математическая модель слоистого ПКМ в системе Abaqus, представленная на рис. 5.

Проведена сортировка значений размера сетки для получения качественной картины поведения материала с выходом на «полку» значений времени сходимости модели. Размер сетки подбирался таким образом, чтобы зона вокруг отверстия была детализирована для снятия напряжений и визуализации разрушений, а также коррелировалась с полученными в результате компьютерной микротомографии зонами расслоений.

В качестве основного механизма верификации математической модели с результатами экспериментальных данных, положен критерий Нуизмера [7].

Форма повреждений, образующихся после механической обработки и заложенных в расчетную модель, определяется максимальным диаметром зоны

расслоения, размер которой получен из анализа результатов послойной томографии и эквивалентна характеристическому расстоянию $d_0 = 1$ мм от контура отверстия по критерию Нуизмера.

Математическая модель повреждений включает в себя возникновение и эволюцию повреждений. Для инициирования повреждений наиболее применимым в МКЭ является критерий прочности Хашина, согласно которому разрушение слоистого композиционного материала наступает в случае, когда максимальное из соотношений критериев прочности волокна или матрицы достигает значения, равному 1.

После формирования математической модели произведена ее верификация с результатами статических испытаний методических образцов для подтверждения работоспособности и точности моделирования. Визуализация начала разрушения математической модели представлена на рис. 6.

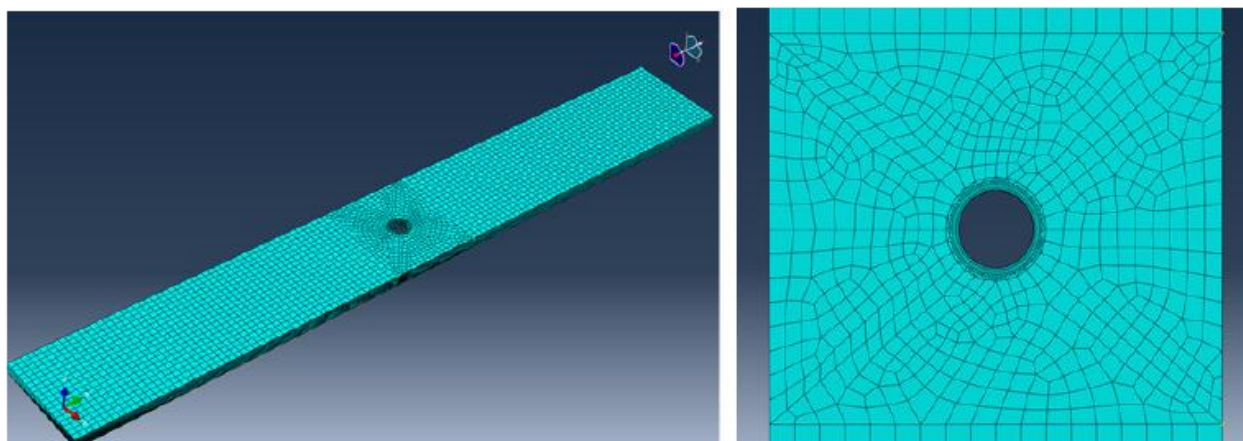


Рис. 5. Математическая модель ПКМ

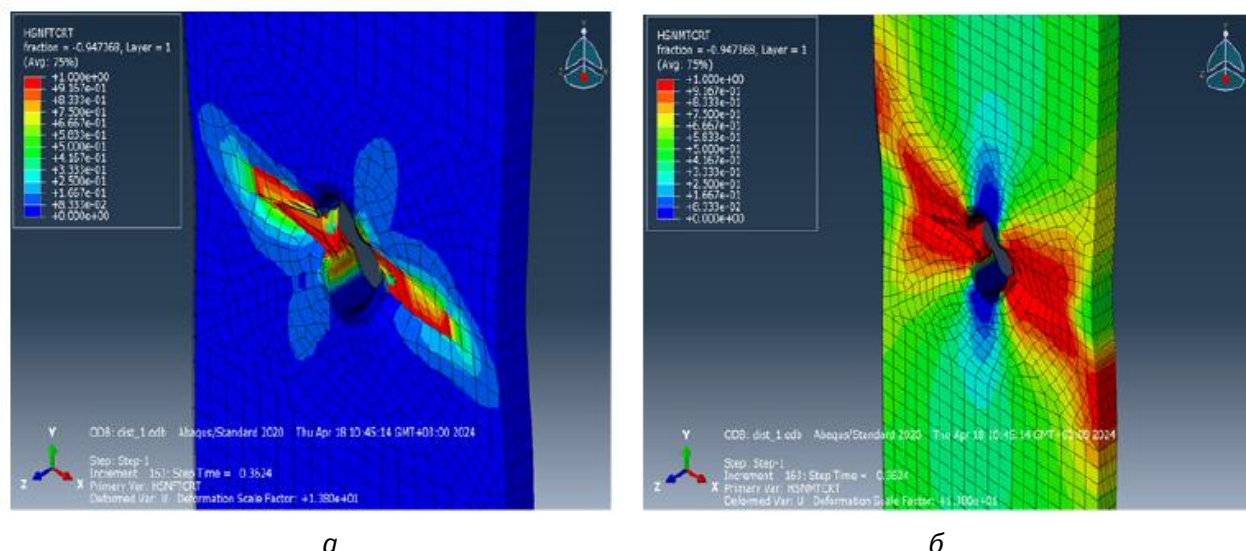


Рис. 6. Визуализация начала разрушения математической модели с учетом эволюции разрушения материала:

а — по критерию прочности волокон; *б* — по критерию прочности матрицы

На рис. 7 представлен сравнительные зависимости нагрузка-деформация для расчетной модели и результатами испытаний при сжатии образцов в виде полосы с отверстием. Экспериментальные данные приведены для образцов серии «К», имеющие минимальные размеры межслоевых расслоений. Отклонение значений расчетной разрушающей нагрузки от полученной в эксперименте составило 3,7 %, что демонстрирует ее корректность.

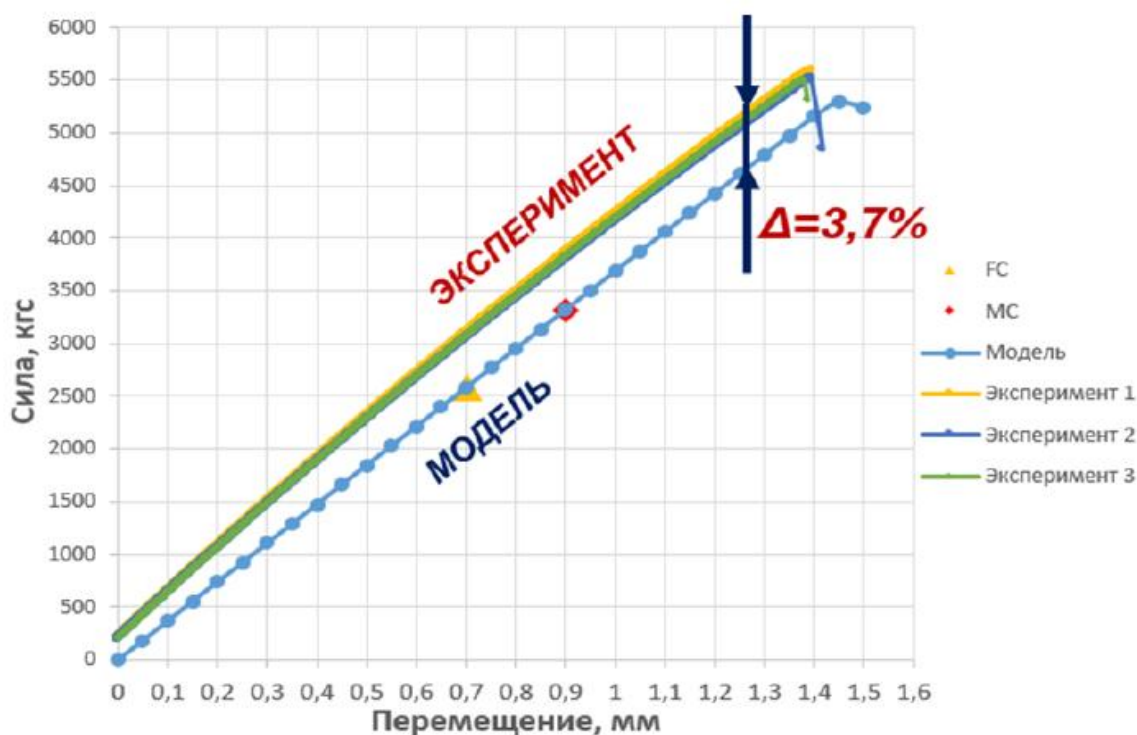


Рис. 7. Сравнительные зависимости нагрузка-деформация

Закключение. Проведено исследование структуры микрповреждений в слоистом ПКМ, образующихся в процессе механической обработки с применением рентгеновской томографии. На основе результатов послойной микротомографии представлена расчетная модель полимерного композиционного материала, учитывающая образующиеся в процессе механической обработки межслоевые расслоения микро- и макромасштаба. Проведен анализ разрушения образца типа полоса с отверстием методом конечного элемента (FEA) с целью прогнозирования возникновения и распространения повреждений в материале при нагружении. Показана сходимость результатов расчетной модели с экспериментальными данными при сжатии образцов в виде полосы с отверстием на примере диаграммы напряжение-деформация. На следующем этапе работы планируется продолжение исследований качества отверстий и повышения сходимости расчетной модели за счет получения большего количества экспериментальных данных о прочности образцов с целью реализации низкой повреждаемости ПКМ и снижающих рассеяние оцениваемых прочностных характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Сироткина О.С., Гришина В.И., Литвинова В.Б. *Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники*. Москва, Машиностроение, 2006.
- [2] Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2012, т. 14, № 4 (2), с. 686–693.
- [3] Вермель В.Д., Евдокимов Ю.Ю., Калинин А.Г., Титов С.А. Контроль целостности образцов слоистого композита при исследовании влияния механической обработки на усталостную долговечность. *Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов. IV Науч.-техн. конф.* Санкт-Петербург, 25–27 ноября 2020, с. 67–72.
- [4] Дударьков Ю.И., Левченко Е.А., Лимонин М.В., Шевченко А.В. Расчетные исследования влияния некоторых видов эксплуатационно-технологических повреждений на несущую способность стрингерных панелей из ПКМ. *Труды МАИ*, 2019, вып. № 106, с. 1–24. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/93a/Dudarkov_Levchenko_Limonin_Shevchenko_rus.pdf?lang=ru&issue=106 (дата обращения 12.06.2025).
- [5] Ninh H., Zheng H., Ma X., Yuan X. Finite analysis of carbon fiberreinforced polymer delamination damage during multi-pass milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 119 (7–8), pp. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08628-5>
- [6] Geier N., Xu J., Pereszlai C., Poór D.I., Paulo J.D. Drilling of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites: Difficulties, challenges and expectations. *Procedia Manufacturing*, 2021, vol. 54, pp. 284–289. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.07.045>
- [7] Голован В.И., Гришин В.И., Дзюба А.С., Замула Г.Н., Лимонин М.В., Дударьков Ю.И., Писарев В.С., Балунов К.А. *Проектирование, расчеты и статические испытания металлокомпозитных конструкций*. Москва, ТЕХНОСФЕРА, 2022, 408 с.