

ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАССЛОЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

И. С. Белоусов✉

ФГБОУ «Новосибирский государственный
технический университет»

г. Новосибирск, Российская Федерация

ФАУ «Сибирский научно-исследовательский
институт авиации им. С. А. Чаплыгина»

г. Новосибирск, Российская Федерация

Как при изготовлении, так и при эксплуатации элементов конструкций, выполненных из многослойных композитных материалов, возможно появление межслойных дефектов при ударе в результате эксплуатации или при нарушении технологии изготовления, что существенно снижает прочностные характеристики таких конструкций. Поэтому учет влияния таких дефектов на прочность является актуальной задачей. Основная цель данной работы – представление результатов валидации расчетных конечно-элементных моделей процесса деформирования элементов конструкций из многослойных композитов с межслойными дефектами. В работе рассматриваются два типа образцов: образцы в виде полосы с предварительным сквозным непроклеем и пластины с предварительным круглым непроклеем. Предварительный дефект создавался путем добавления в композитный пакет тонкой фторопластовой пленки необходимого размера. Проведены испытания таких образцов на сжатие, получены данные о росте межслойных дефектов. Построены конечно-элементные модели с учетом роста межслойных дефектов в процессе сжатия. С использованием построенных моделей решалась нелинейная статическая задача, учитывающая местную потерю устойчивости образца в области дефекта и дальнейшее его закритическое поведение, сопровождающееся ростом межслойного дефекта. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных. Показано влияние межслойных характеристик разрушения на процесс расслоения.

Ключевые слова: многослойные композиты, межслойный дефект, процесс расслоения, метод конечных элементов, закритическое поведение.

Введение

Использование композитных материалов в самолето- и вертолетостроении, космической отрасли помогает решать ряд важных задач, включая снижение затрат на эксплуатацию, улучшение технических параметров изделий и их эксплуатационных характеристик [1–4]. К примеру, применение полимерных композитных материалов, содержащих углеродные волокна, представляет собой эффективный способ уменьшения массы конструкции. Кроме того, улучшение деформационных, прочностных и теплофизиче-

ских свойств углепластика, а также повышение его термостойкости позволяют применять этот материал не только в слабонагруженных и средненагруженных элементах изделия, но и в перспективе в высоконагруженных элементах конструкции, таких как крылья и рули управления самолета.

Межслойные дефекты, или расслоения, представляют собой один из самых серьезных типов дефектов, которые могут возникать в элементах конструкций, выполненных из многослойных композиционных материалов. Эти дефекты могут появиться как в ходе эксплуатации, так и в процессе изготовления элементов конструкций, что может привести к заметному снижению несущей способности элементов конструкции.

✉ belousov.IS.stud@gmail.com

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2024

Одной из особенностей процесса расслоения является локальная потеря устойчивости, т.е. выпучивание отслоившегося слоя, с последующим ростом зоны дефекта при действии сжимающих нагрузок [5–7]. Это может стать причиной общего разрушения элемента конструкции при нагрузке значительно меньше расчётного уровня. Таким образом, для анализа дефектов типа расслоений и их роста вследствие действия нагрузок необходимо как решать задачу устойчивости, так и оценивать закритическое поведение элементов конструкций.

Автором разработаны расчетные модели процесса деформирования тонкостенных композитных конструкций (пластин) с внутренними дефектами в среде моделирования ANSYS. При моделировании развития расслоений применялись: метод виртуального закрытия трещины (virtual crack closure technique, VCCT), описанный в работах [8–10]; модель когезионной зоны (cohesive zone model, CZM), основанием для которой послужили работы [11–12], также существует большое количество трудов, посвященных использованию метода конечных элементов совместно с CZM для моделирования роста трещины и процесса расслоения [13–20]. В статье рассматривается вопрос валидации разработанных расчетных моделей по результатам натурных испытаний.

1. Валидация моделирования процесса расслоения на примере полосы со сквозным непрочным

На базе СибНИА им. С.А. Чаплыгина были получены результаты лабораторных испытаний образцов на сжатие полосы со сквозным непрочным. Дефект формировался путем добавления между слоями препрега фторопластовой пленки с заданными размерами и формой. Эскиз образцов с дефектом представлен на рисунке 1а. Выбор подобных типов геометрии образцов объясняется следующим: образцы-полосы позволяют визуально отслеживать развитие расслоения при нагружении на свободных краях образца.

Материал образцов – препрег Torayca T800. Углы армирования однонаправленных слоев в градусах относительно продольной оси образца: [+45, 0, –45, 90, 0, 0, 0, +45, 0, –45, 0, 0, 0, +45, 90, 0, 0, 0, 90, +45, 0, 0, 0, 0, –45, 0, +45, 0, плёнка, 0, 0, 90, –45, 0, +45]. Механические характеристики монослоя на сжатие представлены в таблице 1.

Испытания проводились с использованием машины Instron 8801. Образцы зажимались штатными гидрозахватами таким образом, чтобы свободная длина образца составляла 50 мм, при этом зона расслоения находилась посередине рабочей зоны.

Образцы с дефектами не доводили до полного разрушения с целью последующей отработки методики определения границ расслоения средствами неразрушающего контроля. Рост расслоения начинался в момент локальной потери устойчивости в зоне дефекта. Образцы после снятия нагрузки восстанавливали первоначальную форму. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

В процессе испытаний фиксировалось, на сколько вырос дефект в процессе увеличения нагрузки (рисунок 1б), а также записывались графики зависимости нагрузки от перемещений торца образца.

Неравномерность роста дефектов по ширине и несимметричность по длине образца можно объяснить возможными неточностями в ходе проведения испытаний: неравномерное зажатие образцов гидрозахватами испытательной машины, возможное наличие у штока испытательной машины люфта, что приводило к эксцентриситету при сжатии образцов, и т.д.

Для конечно-элементного моделирования испытаний на сжатие с учетом расслоения использовалась конечно-элементная модель, выполненная с помощью трехмерных конечных элементов SOLID 185, где модель образца делится на две области по всей его длине: нижняя, более толстая часть расслоения, и верхняя, более тонкая часть расслоения. Областям присваиваются механические характеристики ортотропного материала, соответствующие обобщенным характеристикам композитного пакета верхней и нижней частей полосы соответственно. Граничные условия конечно-элементной модели соответствуют реализуемым в испытаниях: поперечные короткие грани – жесткое защемление, продольные грани – свободные. Данная конечно-элементная модель использовалась для решения нелинейной статической задачи, с учётом потери устойчивости, последующим закритическим поведением и процессом расслоения.

На рисунке 2 представлено деформированное состояние полосы со сквозным непрочным, процесс расслоения моделировался с помощью метода VCCT.

Таблица 1

Механические характеристики монослоя препрега Torayca T800 на сжатие

E_x , кгс/мм ²	E_y , кгс/мм ²	ν_{xy}	G_{xy} , кгс/мм ²	t_c , мм
14300	920	0,34	437	0,113

Таблица 2

Результаты испытаний образцов-полос с дефектами

№	b, мм	tф, мм	Fф, мм ²	Pкр, кгс	Pmax, кгс	σкр, кгс/мм ²	σmax, кгс/мм ²	Примечание
C-1	35,0	4,2	147,0	3950	4631	26,87	31,50	Испытан до разрушения
C-2	35,0	4,2	147,0	2200	4200	14,97	28,57	
C-3	35,0	4,2	147,0	2900	4200	19,73	28,57	
C-4	35,2	4,2	147,8	2600	4250	17,59	28,75	
C-5	35,0	4,2	147,0	3300	4250	22,45	28,91	
C-7	37,3	4,2	156,7	3000	4200	19,15	26,81	Испытан со смещением
Среднее				2991	4288	20,12	28,85	

Обозначения: b – ширина образца, tф, – фактическая толщина, Fф – фактическая площадь, Pкр, σкр – нагрузка и напряжения начала расслоения Pmax, σmax – нагрузка и напряжения, максимальные в испытаниях

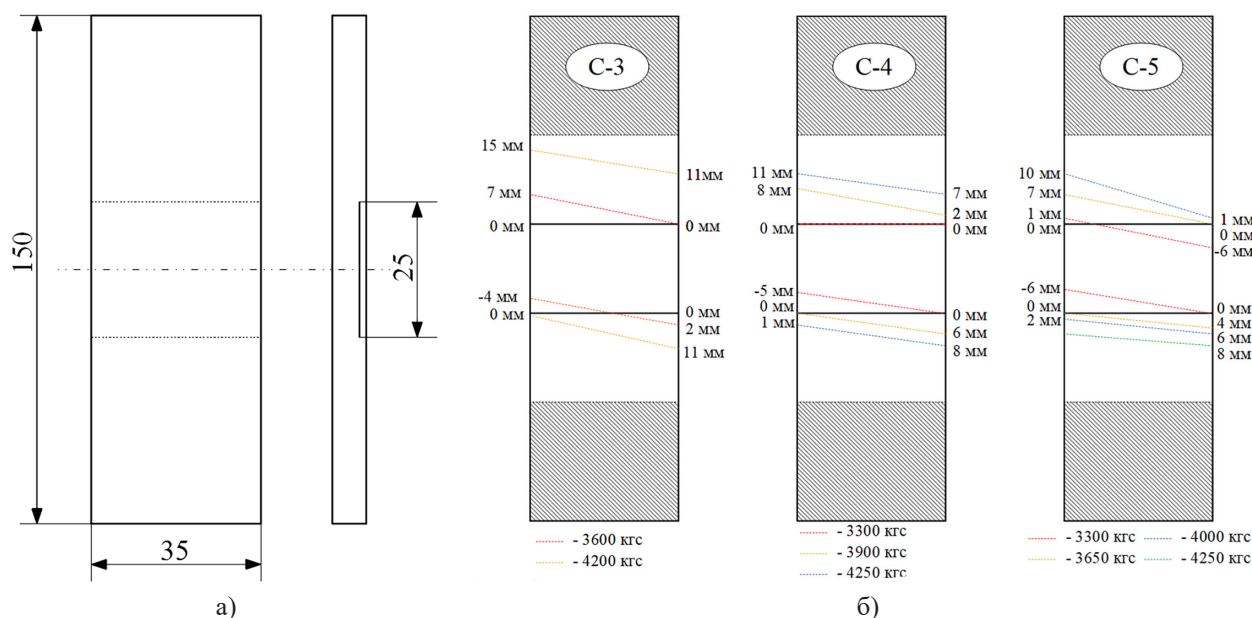


Рисунок 1. Образцы в виде полосы с предварительным дефектом:
а – эскиз образца; б – границы расслоений в образцах

В отличие от результатов испытаний рост расслоения в конечно-элементном расчете фиксировался равномерным по ширине образца и симметричным по длине.

На рисунке 3 представлено сравнение площадей расслоения в зависимости от прикладываемой нагрузки при испытаниях для образцов C-3 – C-5 с результатами, полученными с помощью конечно-элементного моделирования с использованием методов VCST и CZM. При моделировании использовались величины вязкости межслойного разрушения страгивания G_{IC}^{ini} и распространения G_{IC}^{prop} , получение которых описано в работе [21].

Из рисунка 3 можно сделать следующие выводы: нагрузки начала роста расслоения, полученные при $G_{IC} = G_{IC}^{ini}$, ближе к значениям, по-

лученным в ходе испытаний, для обоих методов моделирования процесса расслоения; при моделировании процесса расслоения методом VCST характер увеличения площади дефекта больше соответствует полученному в ходе испытаний, чем при моделировании расслоения методом CZM.

Средняя нагрузка у трех образцов, при которой величина площади межслойного дефекта достигает 1280 мм², составляет $P_{1cp} = 4133$ кгс. Для конечно-элементной модели, которая максимально близко описывает процесс расслоения (метод VCST с использованием вязкости межслойного разрушения страгивания G_{IC}^{ini}), величина площади межслойного дефекта достигает значения 1280 мм² при нагрузке $P_{1кЭМ} = 4850$ кгс. Таким образом, относительная погрешность определения величины нагрузки, необходимой для роста сквоз-

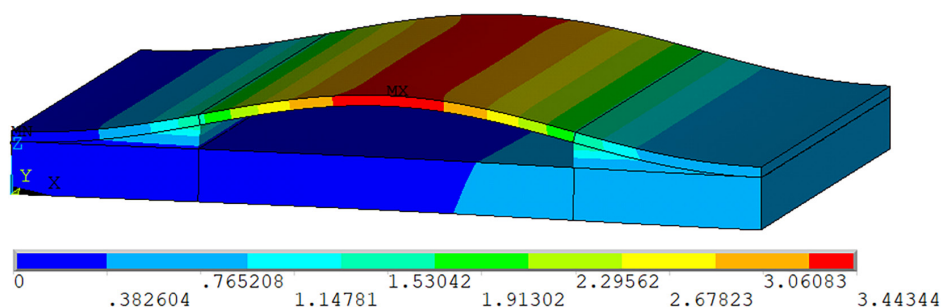


Рисунок 2. Деформированная конечно-элементная модель полосы с дефектом в виде сквозного непрочья

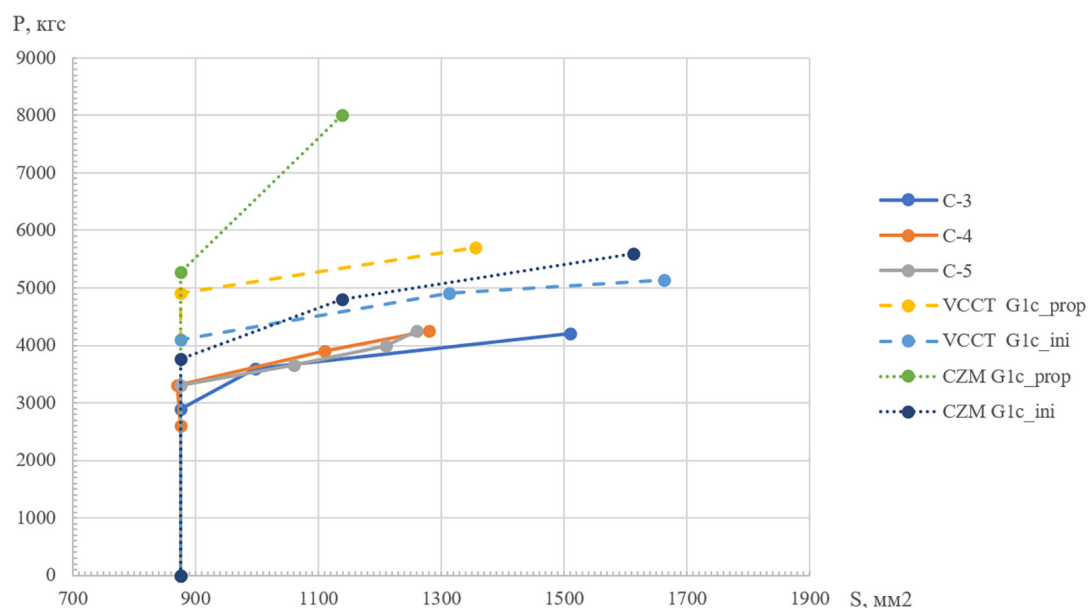


Рисунок 3. Приращение площади расслоения в образцах

ного межслойного дефекта до одной и той же величины, составила 17 %.

Нагрузка потери устойчивости, полученная в результате решения нелинейной статической задачи, в случае использования метода VCCT равна $P_{кр}^{VCCT} = 2800$ кгс; при использовании метода CZM равна $P_{кр}^{CZM} = 2100$ кгс. Таким образом, относительная погрешность определения величины нагрузки потери устойчивости составила 6 % в слу-

чае использования метода VCCT и 30 % в случае использования метода CZM.

В таблице 3 представлено сравнение нагрузок начала роста расслоения у образцов в процессе испытаний с нагрузками начала роста расслоения в конечно-элементной модели.

Необходимо отметить, что в конечно-элементном расчете рост расслоения начинался не с момента потери устойчивости, как это было

Таблица 3

Нагрузки начала роста расслоения

Экспериментальные данные		Расчётные данные		
		Метод моделирования роста дефекта	GC= GIC ini Pg ini, кгс	GC= GIC prop Pg, prop, кгс
№ обр.	Pg test, кгс			
C1	3950	VCCT	4104	4902
C2	2200			
C3	2900			
C4	2600			
C5	3300	CZM	3760	5280
C6	3300			
Среднее	2992			

в испытаниях, а позже. Это можно объяснить тем, что хоть нелинейная задача решается с достаточно маленьким шагом, потеря устойчивости и последующее выпучивание отслоения происходят не мгновенно, а постепенно с возрастанием нагрузки.

По данным таблицы 3 можно сделать вывод, что при использовании в моделировании вязкости разрушения 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.

2. Валидация способа моделирования процесса расслоения на примере пластины с круглым непроклеем

На базе СибНИА им. С. А. Чаплыгина были проведены испытания образцов в виде пластины с предварительным дефектом в виде непроклея круглой формы. Эскиз образца представлен на рисунке 4.

Материал образцов – препрег ACM-102C200UD. Углы армирования однонаправленных слоев в градусах относительно продольной оси: [+45, -45, 0, 0, 90, 0, 0, +45, -45, 0, 0, 90, 0, 0, +45, -45, 0, 0, 0, 0, -45, +45, 0, 0, 90, 0, 0, -45, +45, 0, пленка, 0, 90, 0, 0, -45, +45]. Механические характеристики монослоя препрега ACM-102 C130UD на сжатие представлены в таблице 4.

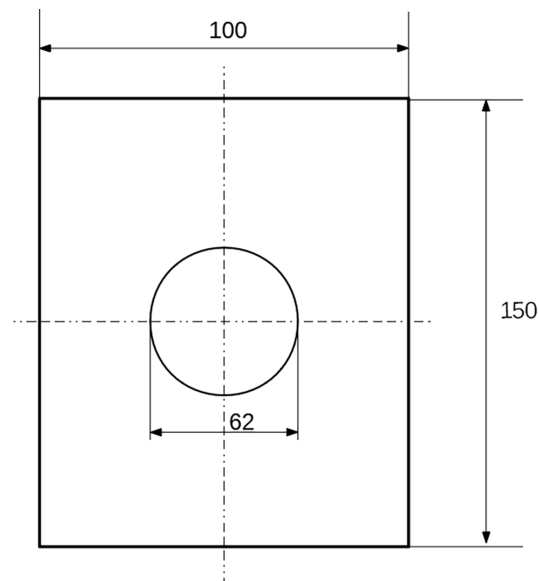


Рисунок 4. Эскиз образца в виде пластины с предварительным дефектом

изображена на рисунке 5. Образец в испытательной машине с установленными датчиками перемещений представлен на рисунке 6.

Было испытано два образца: О62.1 и О62.2. Управление нагружением проводилось «по перемещению» со скоростью 1 мм/мин с паузами ≈ 5 с для фиксации показаний измерителей. Максимальная нагрузка для обоих образцов составила 14000 кгс. У обоих образцов визуально наблюдалось выпучивание

Таблица 4

Механические характеристики монослоя препрега ACM-102C200UD на сжатие

E_x , кгс/мм ²	E_y , кгс/мм ²	ν_{xy}	G_{xy} , кгс/мм ²	t_c , мм
12882	1059	0,34	500	0,135

Испытания были проведены в электромеханической машине Instron 5985, оборудованной жёсткими параллельными платформами, предназначенными для нагружения сжимающими нагрузками. Размеры данных образцов соответствуют стандарту испытаний композитных пластин на сжатие после удара [22]. Соответственно, испытания проведены с использованием оснастки, соответствующей данному стандарту. В оснастке реализуются следующие граничные условия: поперечные края – жесткое защемление, продольные края – шарнирное опирание.

В процессе испытаний проводилось измерение перемещений из плоскости точек в середине образца (и, соответственно, в середине дефекта) с двух сторон образца (со стороны более тонкой части – отслоения, и со стороны более толстой части – основной). Измерения проведены с помощью измерителей лазерных триангуляционных РФ603–90/100. Схема измерения перемещений

в зоне дефекта, а также рост зоны дефекта. После проведения испытаний для обоих образцов был проведен неразрушающий контроль ультразвуковым методом с помощью прибора Omniscan X3 с преобразователем Olympus NDT 5L-64-NW1 с 64-элементной антенной фазированной решеткой [23], в результате которого были установлены размеры зон межслойных дефектов. Пример полученного ультразвукового S-скана представлен на рисунке 7.

Далее было проведено конечно-элементное моделирование данных испытаний. Конечно-элементная модель с граничными условиями представлена на рисунке 8.

Решалась нелинейная статическая задача с учётом потери устойчивости, последующим критическим поведением и процессом расслоения. Процесс расслоения моделировался с помощью метода CZM. Несмотря на то что параметры межслойной вязкости разрушения G_{IC}^{ini} и G_{IC}^{prop} были получены на образцах, изготовленных из препре-

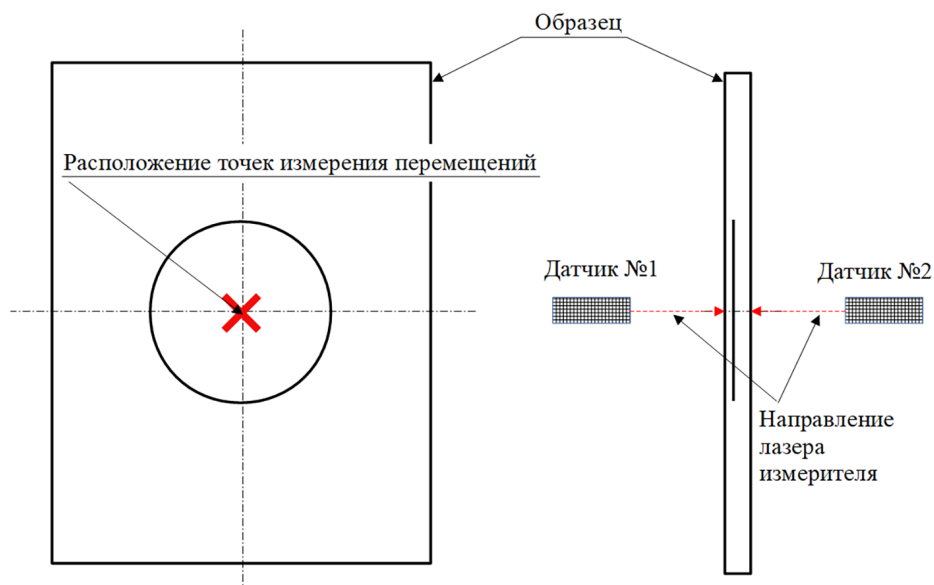


Рисунок 5. Схема измерения перемещений из плоскости точек образца

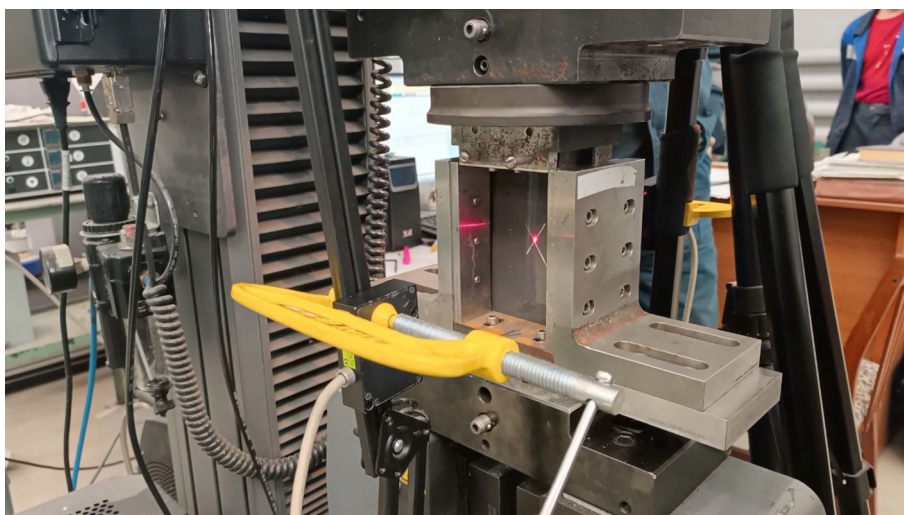


Рисунок 6. Образец-пластина с предварительным дефектом в испытательной машине

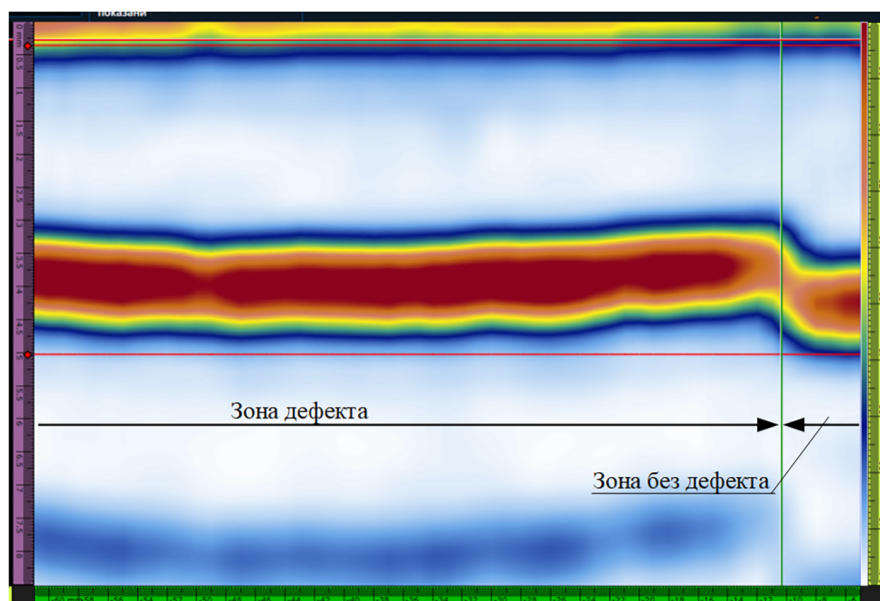


Рисунок 7. Ультразвуковой S-скан области образца О62.1

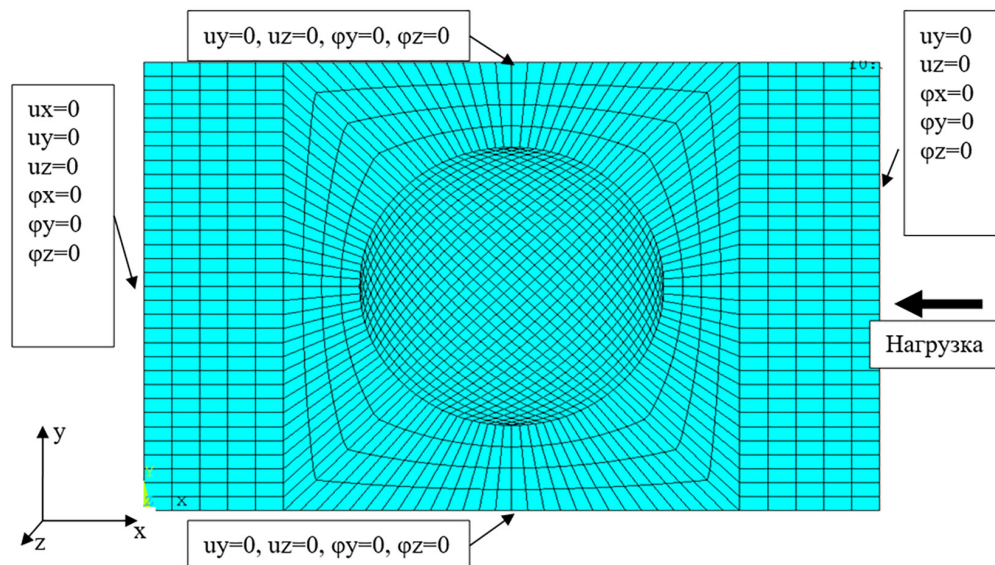


Рисунок 8. Конечно-элементная модель образца-пластины с предварительным дефектом с граничными условиями

га Torayса T800, а данные образцы изготовлены из препрега ACM-102 C130UD, в данном моделировании были использованы ранее найденные постоянные. Это допустимо вследствие того, что данные постоянные для различных препрегов отличаются друг от друга незначительно [24]. Деформированное состояние конечно-элементной модели при приложенной нагрузке 14000 кгс представлено на рисунке 9.

На рисунке 10 представлены графики перемещений из плоскости w центров отслоения (тонкой части) и основной (толстой) части образцов О62.1 и О62.2 в зависимости от нагрузки, полученные по результатам испытаний, а также аналогичные графики, полученные по результатам моделирования, с использованием G_{IC}^{ini} и G_{IC}^{prop} .

Из рисунка 10 можно сделать следующие выводы.

- Использование G_{IC}^{ini} и G_{IC}^{prop} существенно не влияет на величину нагрузки потери устойчивости и закритическое поведение конечно-элементной модели.

- Средняя нагрузка потери устойчивости образцов в испытаниях составила $P_{кр}^{ср} = 2200$ кгс; средняя нагрузка потери устойчивости, полученная в результате решения нелинейной статической задачи, $P_{кр}^{кЭМ} = 3000$ кгс; относительная погрешность определения величины нагрузки потери устойчивости составила 36 %.

- Метод конечных элементов позволяет достаточно точно моделировать закритическое поведение образца с дефектом.

На рисунке 11 представлены зоны роста расслоения, соответствующие нагрузке 14000 кгс, полученные из конечно-элементного моделирования при использовании параметров межслоевой вязкости разрушения G_{IC}^{ini} и G_{IC}^{prop} .

На рисунке 12 схематично изображены зоны роста расслоения образцов О62.1 и О62.2, полученные по результатам испытаний с помощью ультразвукового неразрушающего контроля.

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

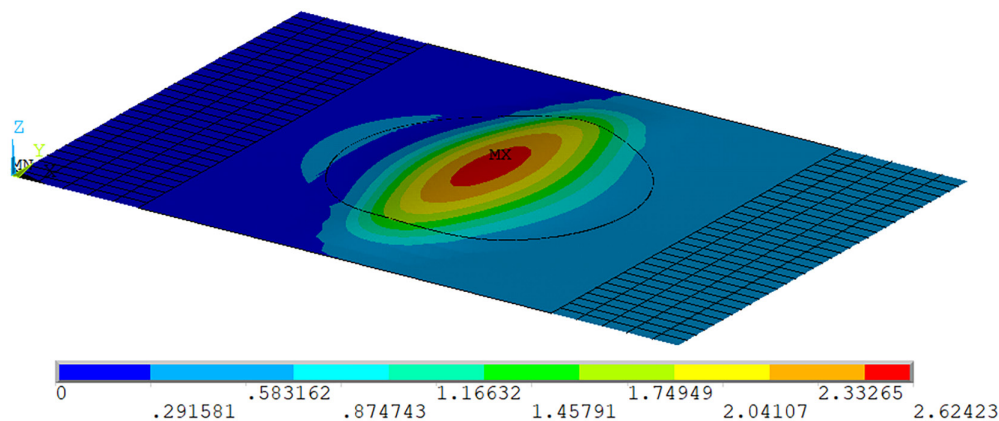


Рисунок 9. Деформированное состояние конечно-элементной модели с предварительным непрочным под действием нагрузки 14000 кгс

• При моделировании значение вязкости межслойного разрушения G значительно влияет на итоговый результат (рисунок 11).

• Зоны роста расслоения у двух рассмотренных образцов (рисунок 12) значительно отличаются. Это может быть следствием затрудненности изготовления идентичных образцов из многослойного компо-

зита с предварительным дефектом. Для более корректных экспериментальных данных необходимо значительно большее количество образцов.

• По итогам конечно-элементного моделирования процесса расслоения были получены результаты, качественно согласующиеся с экспериментальными данными.

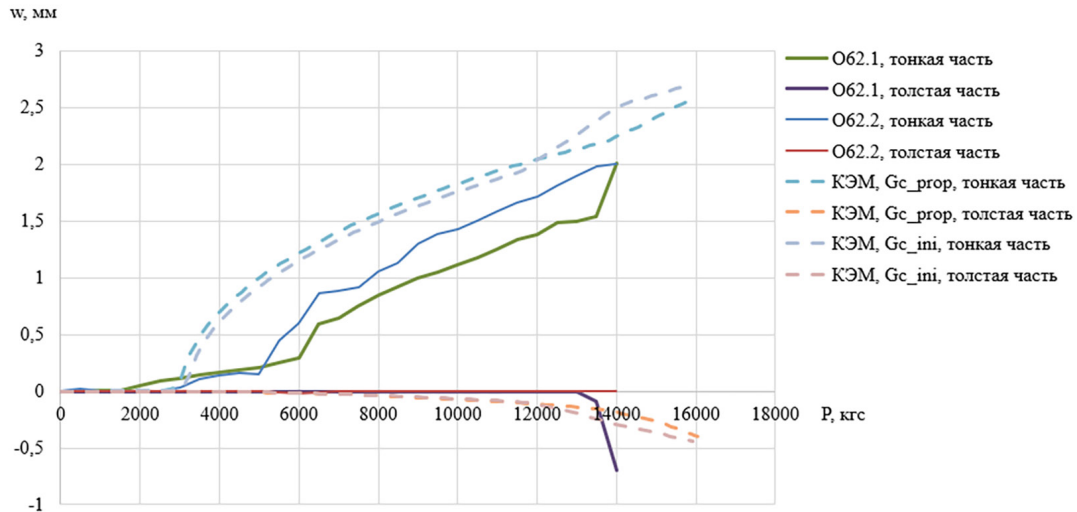
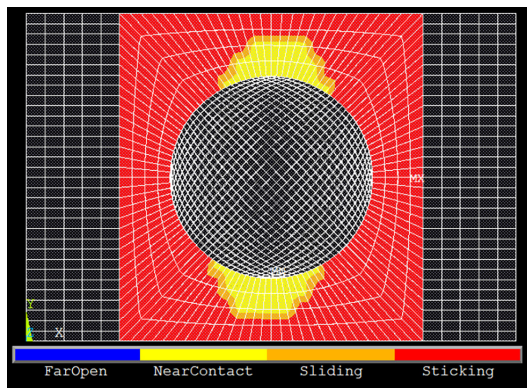
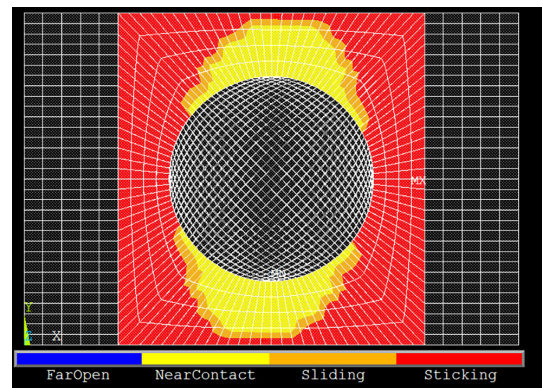


Рисунок 10. Зависимости перемещений центров отслоения (тонкой части) и основной (толстой) части образцов O62.1 и O62.2 в зависимости от нагрузки

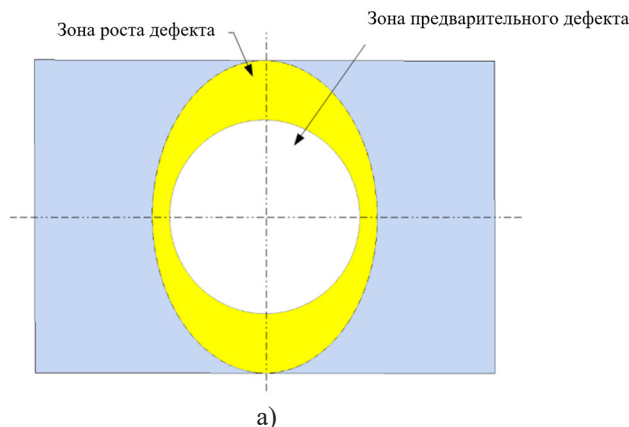


а)

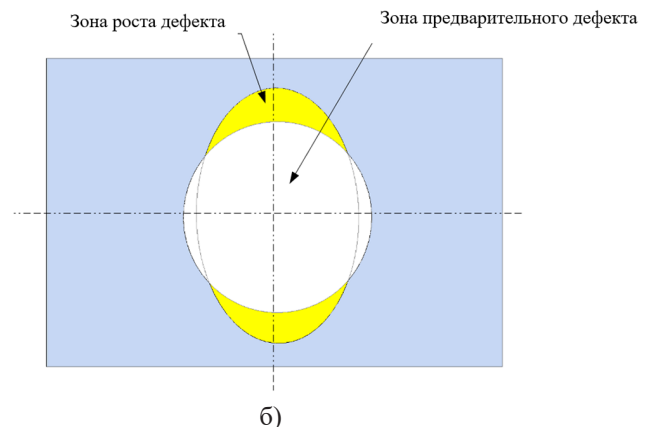


б)

Рисунок 11. Зоны роста межслойного дефекта (отмечено желтым), полученные с помощью конечно-элементного моделирования: а – с использованием $G_{c_{ini}}$; б – с использованием $G_{c_{prop}}$



а)



б)

Рисунок 12. Зоны роста межслойного дефекта, полученные по результатам испытаний: а – образец O62.1; б – образец O62.2

Заключение

Были проведены испытания двух типов образцов, выполненных из многослойного композитного материала, с предварительными дефектами: образцы в виде полосы со сквозным непрочлеем и образцы в виде пластины с круглым непрочлеем. По результатам испытаний были получены зоны роста межслойного дефекта для обоих типов образцов.

Также было проведено конечно-элементное моделирование испытаний обоих типов образцов, учитывающее локальную потерю устойчивости в зоне дефекта, закритическое поведение и процесс расслоения.

Для образцов в виде полосы со сквозным непрочлеем наименьшая погрешность была получена при моделировании процесса расслоения мето-

дом VCST с использованием вязкости межслойного разрушения страгивания G_{IC}^{ini} : относительная погрешность определения величины нагрузки потери устойчивости составила 6 %, относительная погрешность определения величины нагрузки, необходимой для роста сквозного межслойного дефекта до одной и той же величины, составила 17 %. Для образцов в виде пластины с круглым непрочлеем относительная погрешность определения величины нагрузки потери устойчивости составила 36 %.

По результатам сравнения экспериментальных и расчетных данных о росте межслойного дефекта, получено качественное соответствие. Что позволяет использовать построенные расчетные модели для оценки процесса расслоения в элементах конструкции из композитных материалов.

Список литературы

- [1] Максименко В.Н., Олегин И.П., Пустовой Н.В. Методы расчёта на прочность и жёсткость элементов конструкций из композитов. Новосибирск, Изд-во НГТУ. 2015. 424 с.
- [2] Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. Москва: Физмалит. 2013. 272 с.
- [3] Рана С., Фангейру Р. Современные композиционные материалы для аэрокосмической техники: обработка, свойства и применение. Кембридж, Великобритания, издательство Woodhead Publishing, 2016. 496 с.
- [4] Чавла К.К. Композитные материалы: наука и техника. Бирмингем, Алабама, США, Springer Science & Business Media. 2019. 560 с.
- [5] Чермошнцева А.С. Разработка методики повышения прочности тонкостенных элементов конструкций из композитных материалов с дефектами типа расслоения: дис. ...канд. техн. наук: 01.02.04. Чермошнцева Анна Сергеевна; МГТУ. Москва, 2018. 168 с.
- [6] Ван К., Чжао Л., Хонг Х., Гун Ю., Чжан Дж., Нин Х. Аналитическая модель для оценки потери устойчивости, распространения расслаивания и разрушения расслаивающихся композитов при одноосном сжатии. Композитные конструкции. 2019. Т. 223. С. 1–9.
- [7] Ван К., Чжао Л., Хонг Х., Гун Ю., Чжан Дж., Нин Х. Исследование параметров и принципы оценки повреждений от расслаивания в слоистых композитах. Китайский журнал аэронавтики. 2021. Т. 37(7). С. 32–72.
- [8] Крюгер Р. Метод виртуального закрытия трещин: история, подход и применение. Приложение. Механический выпуск. 2004. Т. 57(2). С. 109–143.
- [9] Крюгер Р., О'Брайен К. Методика оболочечного 3D-моделирования для анализа расслаивающихся композитных ламинатов. Журнал AIAA. 2000. Т. 37. № 6. С. 25–44.
- [10] Ирвин Г. Анализ напряжений и деформаций вблизи вершины трещины, пересекающей пластину. Журнал прикладной механики. 1957. Т. 24. С. 361–364.
- [11] Дагдейл Д.С. Текучесть стальных листов с прорезями. Журнал механики и физики твердого тела. 1960. Т. 8(2). С. 100–104.
- [12] Баренблатт Г.И. Математическая теория равновесных трещин при хрупком разрушении. Достижения в области прикладной механики. 1962. Т. 7. С. 55–129.
- [13] Сюй Х.-П., Нидлман А. Численное моделирование быстрого роста трещин в хрупких твердых телах. Журнал механики и физики твердого тела. 1994. Т. 42. 1397–1434.
- [14] Шабощ Ж. Л., Жирар Р., Шафф А. Численный анализ композитных систем с использованием моделей взаимодействия фаз/интерфейсов. Вычислительная механика. 1997. Т. 20. С. 3–11.
- [15] Альфано Г., Крисфилд М. Конечно-элементные модели интерфейсов для анализа расслаивания слоистых композитов: механические и вычислительные проблемы. Численные методы в инженерии, англ. 2001. Т. 50. С. 1701–1736.
- [16] Каманьо П. П., Давила К. Г., Де Мура М. Ф. Численное моделирование прогрессирующего расслаивания смешанного типа в композиционных материалах. Композиционные материалы. 2003. Т. 37. С. 1415–1438.

- [17] Гоял В.К., Джонсон Э.Р., Давила К.Г. Необратимый определяющий закон для моделирования процесса расслаивания с использованием неоднородностей межфазной поверхности. Композитные конструкции. 2004. Т. 65. С. 289–305.
- [18] Мео М., Тийло Э. Моделирование расслоения в двойной консольной балке. Композитные конструкции. 2005. Т. 71. С. 429–434.
- [19] Тайрон А., Давила К. Г., Каманьо П. П., Коста Дж. Инженерное решение для учета влияния размера конечного элемента при моделировании расслоения с использованием моделей когезионной зоны. Инженерная механика разрушения. 2007. Т. 74(10). С. 1665–1682.
- [20] Тайрон А., Гонсалес Э. В., Саррадо С., Гийамет Г., Майми П. Точное моделирование расслоения при смешанном режиме нагружения с использованием модели когезионной зоны с зависящей от режима жесткостью. Композитные конструкции. 2018. Т. 184. С. 506–511.
- [21] Белоусов И.С., Беспалов В.А. Экспериментальное определение вязкости межслойного разрушения композитного материала. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 8. С. 81–87.
- [22] ASTM D 7137/D 7137M, 2007. Стандартный метод определения остаточной прочности при сжатии поврежденных композитных плит с полимерной матрицей. Стандарт. Американское общество по испытаниям и материалам. Уэст-Коншохокен, Пенсильвания, США.
- [23] Достижения в области применения ультразвуковых технологий с фазированными антенными решетками: Olympus NDT, США, Waltham, 2007. 491 с.
- [24] Чернякин С.А., Скворцов Ю. В. Анализ роста расслоений в композиционных конструкциях. Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 249–255.

VALIDATION OF MODELING THE DELAMINATION PROCESS OF COMPOSITE PANELS OF LOAD-BEARING ELEMENTS OF AIRCRAFT STRUCTURES

I.S. Belousov

Novosibirsk State Technical University (NSTU)

Novosibirsk, The Russian Federation

FAE “S.A. Chaplygin Siberian Research Institute of Aviation”

Novosibirsk, The Russian Federation

Both in the manufacture and operation of structural elements made of layered composite materials, interlayer defects may occur upon impact as a result of operation or violation of manufacturing technology, which significantly reduces the strength characteristics of such structures. Therefore, taking into account the effect of such defects on strength is an urgent task. The main purpose of this work is to present the results of validation of finite element models of the deformation process of structural elements made of layered composites with interlayer defects. Two types of specimens are considered in the work: samples in the form of a strut with a wide through embedded delamination and plates with a round embedded delamination. The embedded delamination was created by adding a thin fluoroplastic film of the required size to the composite package. Compression tests of such specimens were carried out, and data on the growth of interlayer defects were obtained. Finite element models are constructed taking into account the growth of interlayer defects during compression. Using the constructed models, a nonlinear static problem was solved, taking into account the local buckling of the specimen in the defect area and its further post buckling behavior, accompanied by an increase in the interlayer defect. The experimental and calculated data are compared. The influence of interlayer fracture characteristics on the stratification process is shown.

Keywords: *multilayer composites, interlayer defect, stratification process, finite element method, supercritical behavior.*

References

- [1] Maksimenko V. N., Olegin I. P., Pustovoi N. V. Methods for calculating the strength and stiffness of structural elements made of composites. Novosibirsk, NSTU, 2015, 424 p.
- [2] Grishin V.I., Dzyuba A. S., Dudar'kov Yu. I. Strength and stability of elements and connections of aircraft structures made of composites. Moscow, ANO «Fizmalit», 2013, 272 p.
- [3] Rana S., Figueiro R. Advanced composite materials for aerospace engineering: processing, properties and application. Cambridge, UK, Woodhead Publishing, 2016, 496 p.
- [4] Chawla K. K. Composite materials: Science and Engineering. Birmingham, AL, USA, Springer Science & Business Media, 2019, 560 p.
- [5] 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; MSTU, Moscow, 2018. 168 p.
- [6] Wang K., Zhao L., Hong H., Gong Y., Zhang J., Ning H. An analytical model for evaluating the buckling, delamination propagation, and failure behaviors of delaminated composites under uniaxial compression. Composite Structures, 2019. Vol. 223, pp. 1–9.
- [7] Wang K., Zhao L., Hong H., Gong Y., Zhang J., Ning H. Parameter studies and evaluation principles of delamination damage in laminated composites. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, vol. 37(7), pp. 32–72.
- [8] Krueger R. Virtual crack closure technique: History, approach, and applications. Appl. Mech. Rev. 2004. Vol.57(2), pp.109–143.
- [9] Krueger R., O'Brien K. A shell/3D modeling technique for the analysis of delaminated composite laminates. AIAA Journal. 2000. Vol. 37. № 6, pp. 25–44.
- [10] 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.
- [11] Dugdale D. S. Yielding of steel sheets containing slits. J Mech Phys Solids. 1960. Vol. 8(2). pp.100–104.
- [12] Barenblatt G. I. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture. Adv. Appl. Mech. 1962. Vol.7, pp.55–129.
- [13] Xu X-P, Needleman A. Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. J Mech Phys Solids 1994. Vol.42, 1397–1434.
- [14] Chaboche J. L., Girard R., Schaff A. Numerical analysis of composite systems by using interphase/interface models. Comput. Mech 1997. Vol. 20, pp.3–11.
- [15] Alfano G., Crisfield M. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. Int J Numer Methods Eng. 2001. Vol.50, pp. 1701–1736.
- [16] Camanho P. P., Davila C. G., De Moura M. F. Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials. J Compos Mater. 2003. Vol. 37, pp.1415–1438.
- [17] Goyal V. K., Johnson E. R., Davila C. G. Irreversible constitutive law for modeling the delamination process using interfacial surface discontinuities. Compos Struct 2004. Vol.65, pp.289–305.
- [18] Meo M., Thieulot E. Delamination modelling in a double cantilever beam. Compos Struct. 2005. Vol.71, pp.429–434.
- [19] Turon A., Dávila C. G., Camanho P. P., Costa J. An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. Eng Fract Mech. 2007. Vol.74(10), pp. 1665–1682.
- [20] Turon A., González E. V., Sarrado C., Guillaumet G., Maimí P. Accurate simulation of delamination under mixed-mode loading using a cohesive model with a mode-dependent penalty stiffness. Compos Struct 2018. Vol.184, pp. 506–511.
- [21] Belousov I. S., Bepalov V. A. Experimental determination of the interlayer fracture toughness of a composite material. Industrial Laboratory. Material Diagnostics. 2023. Vol. 8. pp. 81–87.
- [22] ASTM D 7137/D 7137M, 2007. Standard test method for compressive residual strength properties of damaged polymer matrix composite plates. Standard. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA.
- [23] Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications: Olympus NDT, USA, Waltham, 2007. 491 p.
- [24] Chernyakin S. A., Skvortsov Yu. V. Analysis of the growth of bundles in composite structures. Bulletin of SibGAU. 2014. Vol. 4(56), pp. 249–255.

Сведения об авторе

Белоусов Илья Сергеевич – ассистент кафедры «Прочность летательных аппаратов» факультета летательных аппаратов НГТУ; инженер 1 категории ФАУ «СибНИА им. С. А. Чаплыгина». Окончил магистратуру Новосибирского государственного технического университета в 2018 году. Область научных интересов: проектирование и расчет на прочность элементов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов.