

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ

Гоцелюк Т.Б. *, Гришин В.И. **, Коваленко Н.А. *

* *Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина,
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия*

** *Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского,
г. Жуковский, Россия*

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование прочности образцов двухсрезного болтового соединения на основе углепластика типа КМКУ и Torayca T700. Рассмотрены образцы с разными схемами укладки, диаметрами отверстий, геометрическими параметрами образцов и усилиями затяжки болтов. На основе модели прогрессирующего разрушения проведена расчетная оценка разрушающей нагрузки и типа разрушения двухсрезных болтовых соединений в слоистых композитах. Модель прогрессирующего разрушения реализована в трехмерной постановке и включает в себя анализ напряженного состояния, анализ разрушений и деградацию свойств материала в соответствии с обнаруженным видом разрушения. Расчет напряженного состояния выполнен методом конечных элементов в трехмерной постановке с учетом контактного взаимодействия болта с отверстием, наличия осевого натяга и трения в контактных парах. Для анализа разрушения использованы критерии разрушения Хашина для задачи в объемной постановке, позволяющие идентифицировать различные механизмы разрушения композита, такие как растрескивание матрицы при растяжении и сжатии, разрушение волокна при растяжении и сжатии, отрыв матрицы от волокна посредством сдвига и расслоение при растяжении и сжатии. Мера деградации механических свойств материала выбрана на основе подхода Тана, распространенная на трехмерный случай Каманхо и Мэттьюсом. Оценка разрушающей нагрузки проведена на основе диаграммы «нагрузка-перемещение». Тип разрушения спрогнозирован по характерному распределению поврежденных элементов в области нагруженного отверстия. Эффективность использования модели прогрессирующего разрушения для прогнозирования разрушающей нагрузки и типа разрушения болтового соединения подтверждена сравнением результатов численного исследования с данными эксперимента.

Ключевые слова: слоистые композиты; болтовое соединение; модель прогрессирующего разрушения; критерии разрушения слоистых композитов; деградация материала; метод конечных элементов

STRENGTH RESEARCH OF BOLTED JOINTS IN COMPOSITE LAMINATES BY USING A PROGRESSIVE DAMAGE MODEL

Gotseluk T.B. *, Grishin V.I. **, Kovalenko N.A. *

* *Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Tchaplygin, Novosibirsk,
Russia*

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ABSTRACT

The experimental strength research of double-shear bolted joints manufactured of carbon fibre plastic KMKU and Torayca T700 was carried out. The specimens with different staking sequences, hole diameters, geometric parameters as well as bolt tightening forces are considered. The computational estimation of the failure load and the failure mode of double-shear bolted joints in composite laminates was done based on progressive damage model. The progressive damage model was implemented in the three-dimensional definition and it includes stress analysis, failure analysis and material property degradation according to the detected damage mode. Stress analysis was performed with the finite element method using the three-dimensional model with a consideration of the contact between the bolt and the surface of the hole as well as the presence of the bolt tightening and friction. The 3-D Hashin failure criteria were used for the failure analysis, which allows the identification of different failure modes of composite laminate such as matrix tensile and compressive cracking, fibre tensile and compressive failure, fibre matrix shear-out as well as delamination in tension and compression. The degradation measure of material property was chosen on the basis of the approach proposed by Tan and extended to the three-dimensional case by Camanho and Matthews. The failure load estimation was based on the joint load-displacement curve. The failure mechanism was predicted by the characteristic distribution of damaged elements in the loaded hole area. The efficiency of the use of a progressive damage model for the prediction of failure load and failure mode of the bolted joint was confirmed by comparison between computational research results and experimental data.

Keywords: composite laminates; bolted joint; progressive damage model; failure criteria of composite laminates; material degradation; finite element method

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование композиционных материалов (КМ) в различных элементах конструкций делает актуальным вопрос о расчетном методе, способном прогнозировать поведение и разрушение элементов конструкции из КМ. Зачастую наиболее ответственной областью в таких элементах является область соединения, которое выполняется механически, посредством болтов или заклепок. Наличие сквозного отверстия в КМ вызывает высокую концентрацию напряжений на кромках отверстий, нагруженных болтами, что в совокупности со склонностью КМ к хрупкому разрушению с небольшим или практически отсутствующим запасом по пластичности приводит к значительному снижению прочности в зоне механического соединения. Экспериментальное определение прочности механического соединения представляется задачей трудоемкой и очень дорогой вследствие зависимости прочности соединения от свойств материала, последовательности укладки слоев в пакете и геометрии образцов. Это обстоятельство послужило причиной интереса к разработке расчетного метода, способного на основе данных о прочности монослоев, их укладке в пакете и геометрии соединения спрогнозировать несущую способность КМ в зоне соединения и предсказать вид разрушения.

В настоящее время для прогнозирования прочности механических соединений слоистых КМ предложено несколько подходов, основные из которых приводят в обзорной статье [1]. Один из первых подходов был основан

на определении напряжений в окрестности отверстия и применении критериев разрушения КМ (критерий максимальных напряжений и максимальных деформаций и т.д.) [2,3]. В случае выполнения критерия разрушения для одной из точек слоя весь слой считали разрушенным и исключали из дальнейшего анализа. Затем пересчитывали распределение напряжений и вновь применяли критерий прочности до тех пор, пока не происходило полного разрушения КМ. Использование данного подхода приводит к консервативным оценкам прочности соединения и не позволяет прогнозировать вид разрушения КМ.

Следующий подход использует двухпараметрические методы, основанные на критерии разрушения Уитни и Нуизмера для ненагруженных отверстий [4,5]. Основными параметрами этих методов являются прочность на растяжение гладкого образца и характеристическое расстояние. Существует две различные формулировки критерия разрушения на основе этого подхода: критерий разрушения по напряжениям в точке и критерий средних напряжений [6]. В первом подходе предполагается, что разрушение происходит, когда нормальное напряжение в направлении нагружения на расстоянии r_0 от отверстия, равно прочности материала без концентратора напряжений. Во втором подходе использовано предположение, что разрушение имеет место, когда среднее напряжение на некотором расстоянии a_0 равно прочности материала гладкого образца. Указанные расстояния r_0 и a_0 приняты как характеристики материала, которые должны быть определены в ходе дополнительного эксперимента. Одним из главных недостатков указанных методов является неспособность спрогнозировать вид разрушения.

Несколько модификаций двухпараметрических методов было предложено для того, чтобы иметь возможность прогнозировать вид разрушения. Так, например, для каждого вида разрушения вычислялись средние напряжения вдоль определенных линий, вносящие наибольший вклад в данный вид разрушения, и сравнивались с соответствующим предельным значением напряжения на растяжение, сжатие или сдвиг для рассматриваемого материала [7]. Подобные модификации были разработаны и для критерия разрушения по напряжениям в точке [8]. Точность оценки прочности соединений, выполненной на базе данного подхода, сильно зависит от конфигураций КМ.

Существуют подходы, которые используют комбинацию теории прочности и концепции характеристического расстояния Уитни и Нуизмера. Так в работе [9] совместно с характеристической кривой применен критерий разрушения Ямадо-Сана. Вид разрушения при использовании такой комбинации методов может быть определен из расположения точки, в которой срабатывает критерий разрушения, на характеристической кривой.

Расчет прочности болтового соединения также может быть проведен на основе методов линейной упругой механики разрушения [10]. Использование данных подходов предполагает знание экспериментально определенного значения прочности и трещиностойкости КМ и возможность вычислить коэффициенты интенсивности напряжений K_I , K_{II} в точках на кромке отверстия, в которых предполагается появление трещин.

В настоящее время широкое распространение получили методы, основанные на моделях прогрессирующего разрушения, в которых зарождение и рост повреждения в КМ моделируют, используя различные модели деградации упругих свойств материала [11,12]. Первый этап в данном подходе – анализ

напряженного состояния, выполненный на основе двумерной или трехмерной, линейной или нелинейной конечно-элементной модели с учетом трения в контактных парах или без. Второй этап – проверка материала на наличие повреждения, для этого используют различные критерии разрушения, позволяющие разделить механизмы разрушения внутри пакета (разрушение матрицы и волокна при растяжении и сжатии, отрыв волокна от матрицы, расслоение). В литературе встречаются исследования на базе критериев Ямадо-Сана [13], Цзя-Ву [14], максимальных напряжений [11,12], Хашина [11,12] и различных их комбинаций для различных механизмов разрушения. Третий этап – деградация свойств материала. Степень снижения свойств зависит от механизма разрушения. Существуют два основополагающих подхода. Первый предложен Ф.Чангом и К.Чангом [15] и основан на предположении, что для группы свойств материала, отвечающей за соответствующий вид разрушения, значения свойств полагаются равными нулю после обнаружения в материале соответствующего вида разрушения. Вторым введен Таном и его коллегами [14] и распространен на трехмерный случай Каманхо и Мэттьюсом [12]. Согласно данному подходу свойства материала в разрушенной определенным образом зоне не падают до нуля. Оставшийся процент от исходного свойства был определен Таном из упругого решения задачи разрушения слоя на основе модели микромеханики и проверен для некоторых свойств в эксперименте. В дальнейшем происходит итерационный процесс, состоящий из пересчета напряженного состояния соединения с измененными свойствами материала, нахождения новых участков повреждения материала и соответствующим ухудшением свойств материала до момента разрушения. Момент разрушения исследователи определяют по-разному. Некоторые считают, что разрушение детали происходит тогда, когда разрушение волокна распространяется до края КМ [12,14], в случае если вид разрушения соответствует разрыву или сколу. При разрушении смятием момент определяют из условия, что повреждение вышло за некоторую критическую дистанцию, определяемую геометрией соединения. Другие используют диаграмму «нагрузка-перемещение» при оценке величины разрушающей нагрузки.

Подход, основанный на модели прогрессирующего разрушения, дает возможность прогнозировать начало и развитие повреждения, определить вид разрушения и дать оценку прочности болтового соединения. Исходными данными для применения данного подхода являются геометрические параметры соединения, укладка слоев КМ в пакете и паспортные данные о механических характеристиках и характеристиках прочности монослоя, что не требует проведения дополнительных экспериментальных исследований. Упомянутые преимущества подхода с одной стороны и необходимость иметь надежный метод оценки прочности и вида разрушения болтовых соединений в элементах конструкций из КМ с другой стороны делают актуальным вопрос о разработке эффективной численной модели для оценки прочности болтовых соединений на основе модели прогрессирующего разрушения.

В настоящей работе модель прогрессирующего разрушения реализована в трехмерной постановке и включает в себя анализ напряженного состояния, анализ разрушений и деградацию свойств материала в зависимости от обнаруженного вида разрушения. Задача определения напряженного состояния решена с использованием конечно-элементного комплекса ANSYS в трехмерной постановке с учетом контактного взаимодействия болта с отверстием,

при наличии трения. С помощью встроенного в ANSYS языка программирования APDL разработан макрос, реализующий применение модели прогрессирующего разрушения для расчета элементов конструкций из КМ. Основой для анализа разрушений в макросе служат критерии Хашина для задачи в объемной постановке, позволяющие идентифицировать различные механизмы разрушения внутри пакета. В макросе использована мера деградации механических свойств КМ, основанная на подходе Тана [12] и распространенная Каманхо и Мэттьюсом [12] на трехмерный случай. Оценка прочности соединения проведена с использованием диаграммы «нагрузка-перемещение». Показано, что характерное распределение поврежденных элементов в зоне нагруженного отверстия позволяет прогнозировать вид разрушения соединения. Эффективность использования модели прогрессирующего разрушения для прогнозирования момента и вида разрушения соединения подтверждена сравнением результатов численного исследования с данными экспериментального исследования.

1. МОДЕЛЬ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ

Модель прогрессирующего разрушения представляет собой объединение анализа напряженно-деформированного состояния объекта исследования, анализа разрушений и деградации механических свойств материала. С использованием встроенного языка программирования APDL в ANSYS разработана подпрограмма, реализующая модель прогрессирующего разрушения для оценки прочности болтовых соединений. Структура расчета, заложенная в подпрограмме, продемонстрирована с помощью блок-схемы на рис.1.

На первом этапе расчета необходимо разработать конечно-элементную модель (КЭМ) болтового соединения для оценки напряженно-деформированного состояния. В настоящей работе использована трехмерная КЭМ контактного взаимодействия болтового соединения с учетом коэффициента трения, созданная на основе конечно-элементного комплекса ANSYS. Слои КМ смоделированы однородным ортотропным материалом с механическими характеристиками монослоя, по толщине монослоя расположен один конечный элемент. Угол армирования в укладке задан с использованием локальной системы координат, которая определяет направление осей ортотропного материала.

После проведения расчета на основе разработанной КЭМ следует анализ разрушений, представляющий собой проверку на наличие повреждений по критериям разрушения. В представленном исследовании для анализа разрушений выбраны критерии Хашина [16] для задачи в объемной постановке в форме, предложенной в работе [17]. Выбранные критерии позволяют различить следующие виды разрушения внутри пакета: растрескивание матрицы при растяжении и сжатии, разрушение волокна при растяжении и сжатии, отрыв матрицы от волокна посредством сдвига и расслоение при растяжении и сжатии.

Используемые в анализе критерии типа Хашина приведены в таблице 1 в соответствии с видом разрушения. Обозначения, используемые в соотношениях (1)-(7) табл.1, соответствуют локальной системе координат слоя, где оси x и y ориентированы вдоль и поперек волокна слоя соответственно, а ось z перпендикулярна плоскости слоя. Величины X_t , Y_t , Z_t , X_c , Y_c , Z_c , S_{xy} , S_{yz} , S_{xz} — значения пределов прочности монослоя на растяжение, сжатие и сдвиг, соответственно.



Рис.1. Блок-схема расчета на основе модели прогрессирующего повреждения.

Когда в одном из слоев пакета выполнен один из критериев разрушения (1)-(7) или их комбинация, это свидетельствует о наличии разрушения в слоях КМ по одному из видов разрушения или по их комбинации. Обнаружение определенного вида разрушения предполагает, что в области повреждения материал перестает воспринимать соответствующую нагрузку полностью или частично в зависимости от использованного правила деградации материала. Используемые на практике правила деградации получены эмпирическим путем и заключаются в снижении определенных свойств материала в поврежденной области в зависимости от вида разрушения. В данной работе использованы правила деградации, предложенные Таном и его коллегами [12]. Результаты работы [11] показывают, что использование данного подхода позволяет точнее оценивать прочность болтового соединения.

Мера деградации механических свойств, в соответствии с подходом Тана, показана в таблице 2. После обнаружения разрушения в пакете проводилось ухудшение свойств материала на основе выражений табл.2. В случае срабатывания нескольких критериев одновременно для одной и той же области степень деградации механических свойств определялась комбинацией соответствующих выражений.

Таблица 1.

Критерии разрушения.

Вид разрушения	Условие	Критерий разрушения
Растрескивание матрицы при растяжении	$\sigma_y > 0$	$\left(\frac{\sigma_y}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 \geq 1$ (1)
Растрескивание матрицы при сжатии	$\sigma_y < 0$	$\left(\frac{\sigma_y}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 \geq 1$ (2)
Разрыв волокна	$\sigma_x > 0$	$\left(\frac{\sigma_x}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2 \geq 1$ (3)
Разрушение волокна при сжатии	$\sigma_x < 0$	$\left(\frac{\sigma_x}{X_c}\right) \geq 1$ (4)
Отрыв матрицы от волокна посредством сдвига	$\sigma_x < 0$	$\left(\frac{\sigma_x}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2 \geq 1$ (5)
Расслоение при растяжении	$\sigma_z > 0$	$\left(\frac{\sigma_z}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 \geq 1$ (6)
Расслоение при сжатии	$\sigma_z < 0$	$\left(\frac{\sigma_z}{Z_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 \geq 1$ (7)

Таблица 2.

Мера деградации механических свойств.

Механизм разрушения	Мера деградации свойств
Растрескивание матрицы при растяжении (1)	$E_y = 0,2E_y; G_{xy} = 0,2G_{xy}; G_{yz} = 0,2G_{yz}$
Растрескивание матрицы при сжатии (2)	$E_y = 0,4E_y; G_{xy} = 0,4G_{xy}; G_{yz} = 0,4G_{yz}$
Разрушение волокна при растяжении (3)	$E_x = 0,07E_x$
Разрушение волокна при сжатии (4)	$E_x = 0,14E_x$
Отрыв матрицы от волокна (5)	$G_{xy} = \mu_{xy} = 0$
Расслоение (6), (7)	$E_z = G_{yz} = G_{xz} = \mu_{yz} = \mu_{xz} = 0$

После проведения деградации механических свойств материала проводится проверка на потерю несущей способности исследуемого элемента конструкции. В случае если элемент конструкции утрачивает способность нести нагрузку, программа останавливается. В обратном случае программа возвращается на этап расчета напряженного состояния элемента с ухудшенными свойствами на текущем уровне нагружения. Вновь проводится анализ на наличие новых повреждений и, в случае необходимости, последующая деградация свойств материала. Процедура пересчета на текущем уровне нагрузки продолжается до тех пор, пока не прекращается накопление поврежденного материала,

после чего уровень прикладываемой нагрузки повышается на заданный шаг нагружения и процедура расчета начинается заново. Расчет останавливается в момент, когда исследуемый объект теряет несущую способность.

Для контроля потери несущей способности используется диаграмма «нагрузка-перемещение» контрольных точек объекта, построенная на основе конечно-элементного расчета. Наличие резкого увеличения перемещений при неизменном шаге нагружения свидетельствует о переходе к активной фазе накопления повреждений, что, как правило, сопровождается приростом зон, поврежденных по наиболее опасным комбинациям механизмов разрушения (разрыв волокна, расслоение и отрыв матрицы от волокна), который контролируется отдельно.

2. ВЕРИФИКАЦИЯ

Для анализа применимости и эффективности модели прогрессирующего разрушения в исследовании прочности болтовых соединений в слоистых КМ проведена численная оценка прочности образцов болтовых соединений углепластика с металлическими пластинами, результаты которой сопоставлены с результатами экспериментального исследования образцов. Эскиз образца приведен на рис.2.

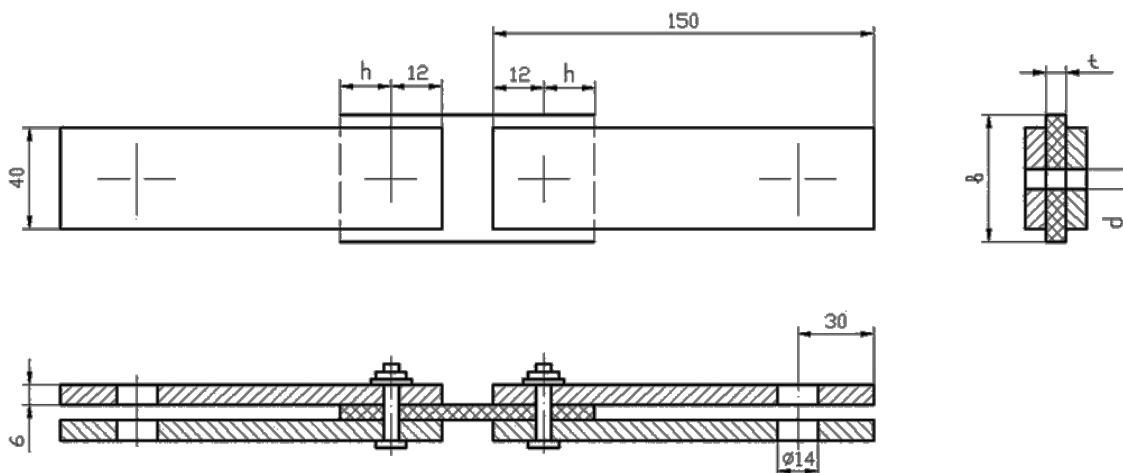


Рис.2. Эскиз образца болтового соединения.

Часть композитных пластин образцов была вырезана из углепластика типа КМКУ, наружные слои выполнены из стеклопластика КМКС в виде защитных слоев сверху и снизу с ориентацией 0° . В данных образцах композитные пластины имели следующие укладки слоёв углепластика КМКУ:

1. $[0^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]$;
2. $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ]$;
3. $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ]$;
4. $[\mp 45^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/\mp 45^\circ/0^\circ/90^\circ/\mp 45^\circ/0^\circ/90^\circ/\mp 45^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/\mp 45^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/\mp 45^\circ]$.

Вторая часть образцов была изготовлена из углепластика на основе монослоя Тогауса Т700. Были исследованы образцы, имеющие следующие укладки слоев в пакете:

1. $[\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/\mp 45^\circ]$;
2. $[\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/\mp 45^\circ]$;
3. $[\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/\mp 45^\circ]$;
4. $[\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/\mp 45^\circ]$.

Механические характеристики и характеристики прочности материалов монослоев приведены в таблице 3, где использованы следующие обозначения: δ – толщина монослоя, E_+ , E_- , G – модуль упругости на растяжение, сжатие, сдвиг; μ – коэффициент Пуассона.

Таблица 3.

Паспортные данные монослоев.

№	Марка ПКМ	δ , мм	X_t , кгс/мм ²	E_{x+} , кгс/мм ²	Y_t , кгс/мм ²	E_{y+} , кгс/мм ²	μ_{xy}
1	КМКУ	0,12±0,01	90	11500	4,3	825	0,29
2	КМКС	0,25±0,01	56	2400	39	2200	0,229
3	Torayca T700	0,192	234	12551	5,17	878	0,34
№	X_c , кгс/мм ²	E_{x-} , кгс/мм ²	Y_c , кгс/мм ²	E_{y-} , кгс/мм ²	S_{xz} , кгс/мм ²	S_{xy} , кгс/мм ²	G_{xy} , кгс/мм ²
1	90	11000	11,7	900	7,4	12	300
2	56	2500	43	2200	6,9	11	300
3	124	11438	21,12	867	7,14	7,14	474

Металлические пластины в образцах были изготовлены из листа Д16Т толщиной 6 мм. Болты, используемые в образцах, выполнены из высокопрочной стали. Часть образцов была испытана с затяжкой гаек. Затяжка гаек с моментом $M_3 > 0$ кгс·м проводилась динамометрическим ключом, затяжка гаек $M_3 = 0$ кгс·м обеспечивалась усилиями пальцев. Параметры болтового соединения с указанием момента затяжки представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Результаты экспериментального исследования и расчетной оценки разрушающей нагрузки с использованием модели прогрессирующего разрушения.

Группа	Материал	Укладка	d , мм	t , мм	b , мм	h , мм	M_3 , кгс·м	n , шт	$P_{э ср}$, кгс	$P_{расч}$, кгс	δ , %	Прим.
I	КМКУ	2	6	4,9	29,2	12	0	3	1731	1560	-9,9	скол
II	КМКУ	2	6	4,9	29,0	12	1,0	3	1987	1992	0,3	скол
III	КМКУ	2	6	4,9	28,0	24	0	1	1800	1680	-6,7	см/разр
IV	КМКУ	2	6	4,9	34,2	24	0	2	1725	1704	-1,2	см/скол
V	КМКУ	2	6	4,9	34,0	24	1,0	3	2266	2136	-5,7	см/разр
VI	КМКУ	3	6	3,0	30,0	20	0,5	3	1100	1200	9,1	см/разр
VII	КМКУ	4	6	4,9	33,4	24	0	3	1558	1560	0,1	см/разр
VIII	КМКУ	4	6	4,9	29,2	24	0	1	1650	1560	-5,5	см/разр
IX	КМКУ	4	6	4,9	32,3	24	1,0	2	2114	1968	-6,9	разрыв
X	КМКУ	4	6	4,9	29,1	24	1,0	1	2040	1920	-5,9	разрыв
XI	КМКУ	1	6	4,0	30,1	12	0	3	1166	1272	9,2	скол
XII	КМКУ	1	6	4,0	34,4	24	1,0	1	2048	1824	-10,9	скол
XIII	КМКУ	1	6	4,0	34,3	24	0	3	1250	1392	11,4	см/разр

XIV	КМКУ	1	6	4,0	32,6	24	1,0	2	2022	1824	-9,8	разр/скол
XV	КМКУ	2	10	4,9	44,0	20	0	2	2361	2472	4,7	скол
XVI	КМКУ	2	10	4,9	43,8	20	4,0	2	3062	2880	-5,9	разрыв
XVII	Torayca	1	6	4,2	26,5	24	0	2	2085	1752	-15,9	смятие
XVIII	Torayca	2	6	2,9	26,5	24	0	1	1184	1320	11,5	смятие
XIX	Torayca	3	6	2,5	27,0	24	0	1	1186	1032	-13,0	смятие
XX	Torayca	4	6	2,2	25,5	24	0	1	830	768	-7,5	смятие

Испытания были проведены на электрогидравлической машине UTM-100 с нагружением по перемещению штока со скоростью 6 мм/мин. Испытания образцов сопровождались записью диаграмм «нагрузка-перемещение» штока.

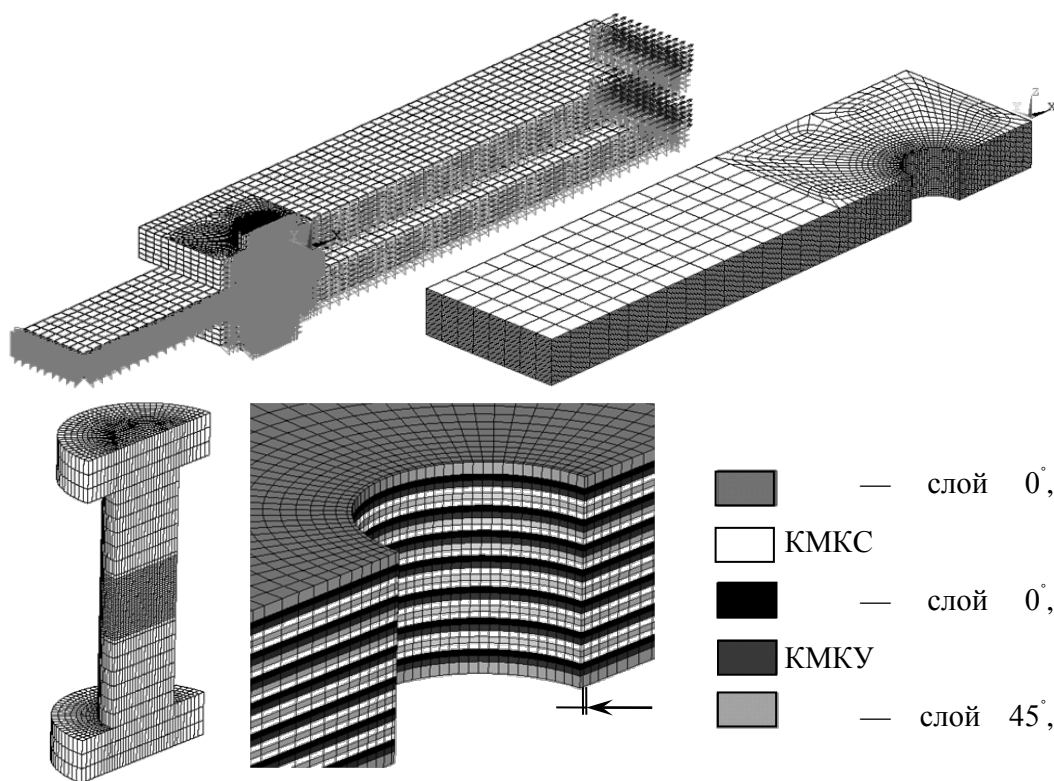


Рис.3. КЭМ образца болтового соединения.

При численном моделировании болтового соединения использовали объемные восьмиузловые конечные элементы SOLID45. Моделирование контакта между болтом и пластинами, а также между алюминиевыми и композитными пластинами, проводили с использованием контакта типа «поверхность-поверхность» следующими конечными элементами TARGE170 и CONTA174. Коэффициент трения принят равным 0,3 для всех контактных поверхностей. Для пластины из КМ по толщине монослоев располагали один конечный элемент, слои моделировали однородным ортотропным материалом с механическими характеристиками монослоя (табл.3) и с заданием для каждого слоя локальной системы координат, соответствующей углу армирования в укладке. Общий вид КЭМ образца болтового соединения представлен на рис.3. В силу симметрии образца относительно двух плоскостей моделировали четверть образца с наложением условий симметрии на соответствующие поверхности (рис.3). Болт и алюминиевые пластины моделировали с использованием конечного элемента SOLID45. В расчет были заложены следующие значения механических

характеристик материала болта – $\mu=0,3$; $E=21000$ кгс/мм² и материала металлических пластин – $\mu=0,3$; $E=7200$ кгс/мм². К торцам алюминиевых пластин прикладывали распределенную нагрузку и ограничивали их перемещения вдоль оси Z.

При моделировании образцов болтового соединения с затяжкой гаек для обеспечения равномерной стяжки алюминиевых и композитной пластин к болту прикладывали пониженную температуру, под действием которой болт равномерно сжимался. Величина температуры была подобрана для каждого образца индивидуально таким образом, чтобы обеспечить требуемое усилие затяжки.

На этапе отладки расчета при достижении определенного уровня нагружения численное решение нелинейной задачи контактного взаимодействия расходилось, это приводило к остановке процедуры расчета задолго до предполагаемого момента потери несущей способности болтового соединения. Данное обстоятельство вызвано большими деформациями кромки отверстия в зоне контакта образца из КМ и болта из-за резкого падения жесткости, обусловленного деградацией свойств материала и, как следствие, чрезмерным искажением формы элементов. Для преодоления данной численной трудности была заимствована идея, описанная в [11], где авторы предлагают ввести в модель соединения дополнительный ряд элементов образца КМ, в котором не будет проводиться деградация механических свойств на протяжении всей процедуры расчета. Толщина ряда дополнительных элементов (t_0) должна быть выбрана таким образом, чтобы избежать значительных изменений в распределении контактных напряжений и в размерах диаметра отверстия. Для исследуемых образцов толщина ряда дополнительных элементов принята равной толщине монослоя (рис.3).

Следует отметить, что величина нагрузки потери несущей способности, прогнозируемая с использованием описанной модели, будет зависеть от выбранного шага нагружения. Большой шаг нагружения будет приводить к более грубой оценке, поскольку в этом случае в процессе деградации свойств материала повреждения в материале накапливаются более скачкообразно и при достижении разрушающей нагрузки имеет место более резкий скачок в перемещениях. Выбор же слишком маленького шага приводит к значительным временным затратам при проведении расчета, не давая существенного выигрыша в точности прогнозирования разрушающей нагрузки. Результаты численного исследования влияния шага нагружения на величину прогнозируемой нагрузки разрушения с использованием модели прогрессирующего разрушения, представленные в работе [18], показывают, что оптимальным является шаг нагружения 3-5% от предполагаемой разрушающей нагрузки. В ходе настоящего исследования проведен расчет разрушающей нагрузки для образца группы I (табл.4) при следующих шагах нагружения ΔP : 4,8 кгс, 12 кгс, 24 кгс и 48 кгс. Существенное отличие в прогнозируемых величинах наблюдается при использовании шага нагружения $\Delta P=48$ кгс (рис.4). Использование шага нагружения менее 24 кгс является нецелесообразным с точки зрения временных затрат. Исходя из этих соображений, для дальнейших расчетов было решено использовать шаг нагружения $\Delta P=24$ кгс.

В табл.4 приведены геометрические параметры исследованных образцов болтового соединения (см. рис.2), результаты экспериментального исследования и расчетной оценки разрушающей нагрузки. Здесь для образцов, разрушавшихся

сколом и разрывом, P_3 – это величина разрушающей нагрузки, т.е. максимальная точка на диаграмме «нагрузка-перемещение»; для образцов, разрушавшихся смятием, P_3 – это величина нагрузки смятия, n – количество испытанных образцов; δ – отклонение расчетной разрушающей нагрузки относительно экспериментально определенной.

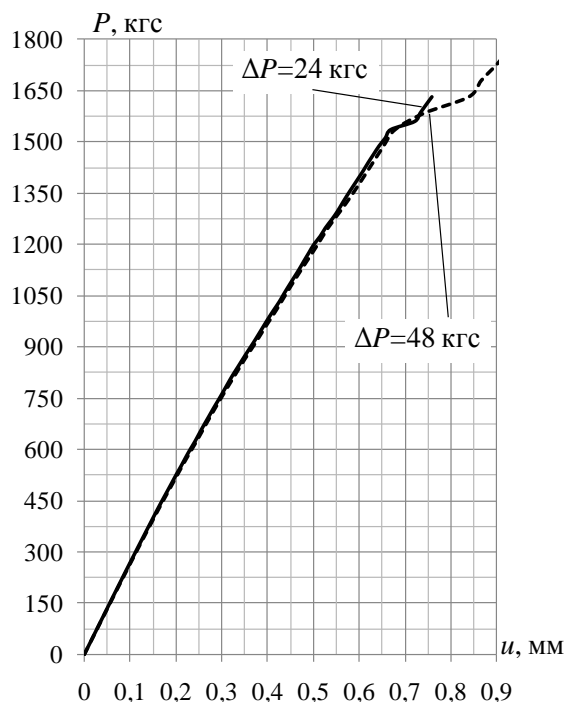


Рис.4 Расчетная диаграмма «нагрузка-перемещение» для образцов группы I при различных шагах нагружения.

Таблица 4.

Результаты экспериментального исследования и расчетной оценки разрушающей нагрузки с использованием модели прогрессирующего разрушения.

Группа	Материал	Укладка	d , мм	t , мм	b , мм	h , мм	M_3 , кгс·м	n , шт	$P_{э\text{ ср}}$, кгс	$P_{\text{расч}}$, кгс	δ , %	Прим.
I	КМКУ	2	6	4,9	29,2	12	0	3	1731	1560	-9,9	скол
II	КМКУ	2	6	4,9	29,0	12	1,0	3	1987	1992	0,3	скол
III	КМКУ	2	6	4,9	28,0	24	0	1	1800	1680	-6,7	см/разр
IV	КМКУ	2	6	4,9	34,2	24	0	2	1725	1704	-1,2	см/скол
V	КМКУ	2	6	4,9	34,0	24	1,0	3	2266	2136	-5,7	см/разр
VI	КМКУ	3	6	3,0	30,0	20	0,5	3	1100	1200	9,1	см/разр
VII	КМКУ	4	6	4,9	33,4	24	0	3	1558	1560	0,1	см/разр
VIII	КМКУ	4	6	4,9	29,2	24	0	1	1650	1560	-5,5	см/разр
IX	КМКУ	4	6	4,9	32,3	24	1,0	2	2114	1968	-6,9	разрыв
X	КМКУ	4	6	4,9	29,1	24	1,0	1	2040	1920	-5,9	разрыв
XI	КМКУ	1	6	4,0	30,1	12	0	3	1166	1272	9,2	скол
XII	КМКУ	1	6	4,0	34,4	24	1,0	1	2048	1824	-10,9	скол
XIII	КМКУ	1	6	4,0	34,3	24	0	3	1250	1392	11,4	см/разр

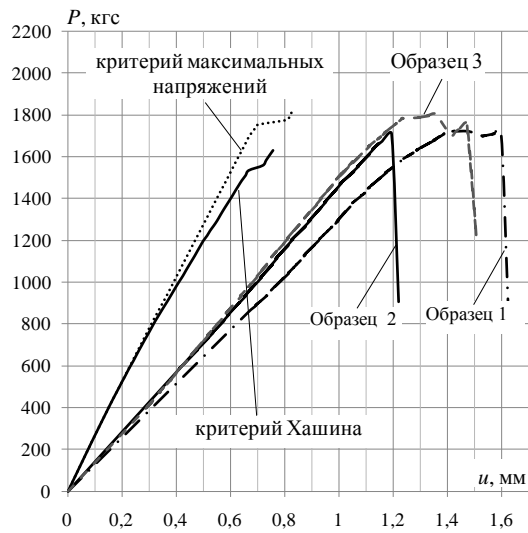
XIV	КМКУ	1	6	4,0	32,6	24	1,0	2	2022	1824	-9,8	разр/скол
XV	КМКУ	2	10	4,9	44,0	20	0	2	2361	2472	4,7	скол
XVI	КМКУ	2	10	4,9	43,8	20	4,0	2	3062	2880	-5,9	разрыв
XVII	Torayca	1	6	4,2	26,5	24	0	2	2085	1752	-15,9	смятие
XVIII	Torayca	2	6	2,9	26,5	24	0	1	1184	1320	11,5	смятие
XIX	Torayca	3	6	2,5	27,0	24	0	1	1186	1032	-13,0	смятие
XX	Torayca	4	6	2,2	25,5	24	0	1	830	768	-7,5	смятие

Результаты расчетной оценки прочности соединений в большинстве случаев хорошо согласуются с данными эксперимента. Для образцов, изготовленных из углепластика типа КМКУ, отклонение расчетной разрушающей нагрузки лежит в пределах 0,1...11,4%. Для большинства образцов, изготовленных на основе монослоя Torayca T700, получена консервативная оценка прочности, отклонение которой несколько выше – 7,5...15,9%. Отдельно стоит образец XVIII, для него в эксперименте была получена нагрузка потери несущей способности, сопоставимая с нагрузкой, полученной для образца XIX, несмотря на наличие дополнительного слоя в направлении 45°, который теоретически должен увеличивать нагрузку смятия.

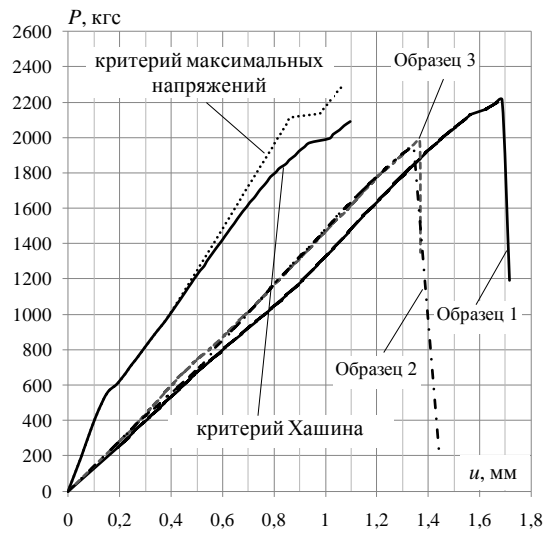
На рис.5 представлены расчетные диаграммы «нагрузка-перемещение» и диаграммы, полученные при испытании, для нескольких групп образцов. Из экспериментальных диаграмм исключен начальный нелинейный участок, отражающий процесс выбора зазоров в болтовом соединении и в захватах испытательной машины. Сопоставление диаграмм показывает существенное различие в углах наклона экспериментальных и численных кривых, что объясняется разницей в податливости КЭМ болтового соединения и испытанного образца с приспособлением. В эксперименте передача нагрузки к образцу осуществлялась через дополнительную пластину, установленную между алюминиевыми пластинами (рис.2). КЭМ, применяемая в расчете, не включала в себя дополнительную пластину и болт, использованные в стенде при испытаниях, с целью уменьшения временных затрат на расчет. Образец с приспособлением представляет собой более податливую систему, чем отдельно взятый образец, что отражается более пологой кривой «нагрузка-перемещение», полученной в эксперименте.

Результаты работы [11] показывают, что учет вклада касательных напряжений при оценке разрушения волокна при растяжении (3) приводит к консервативной оценке прочности болтового соединения, поэтому авторами рекомендовано использование критерия максимальных напряжений при оценке разрыва волокна

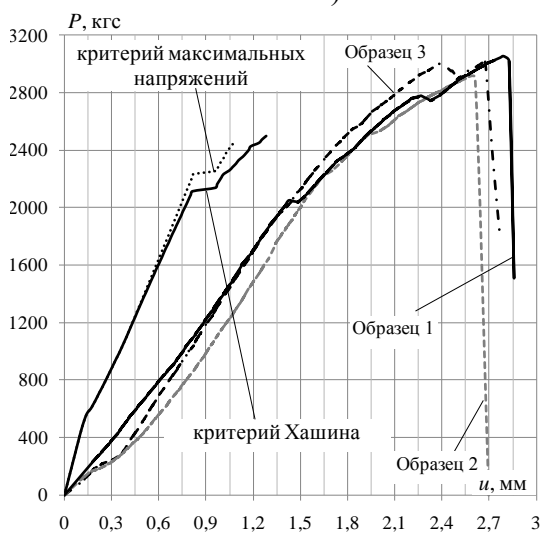
$$\left(\frac{\sigma_x}{X_T} \right) \geq 1 \quad (8)$$



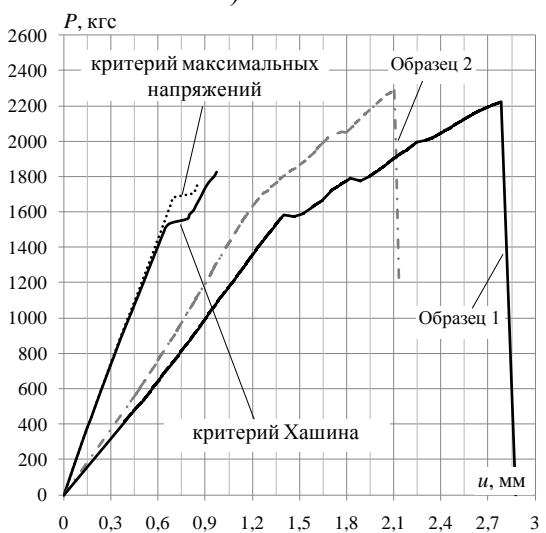
а)



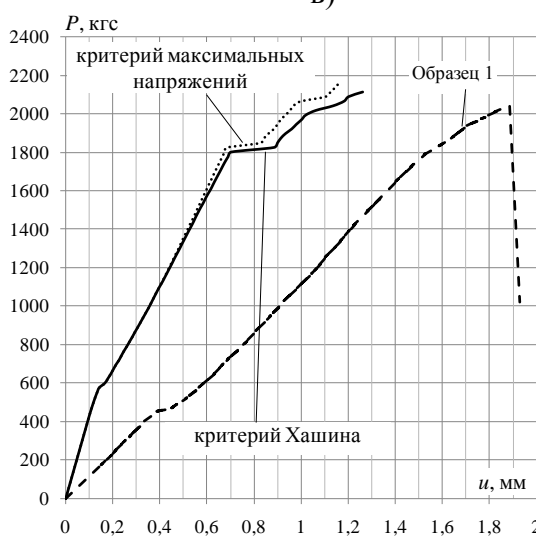
б)



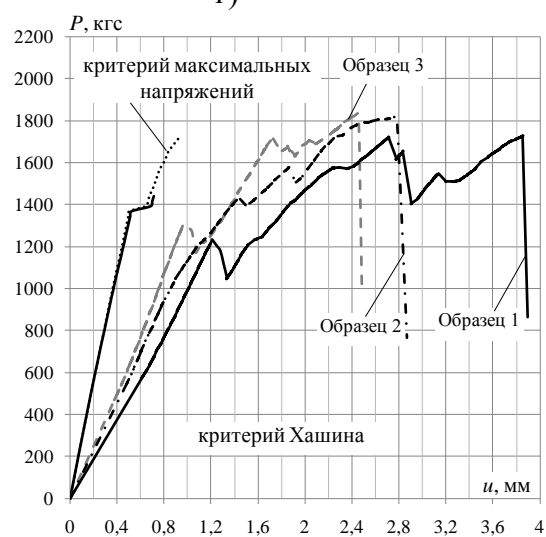
в)



г)



д)



е)

Рис.5. Диаграммы «нагрузка-перемещение» для групп образцов: а) I; б) II; в) V; г) VII; д) XII; е) XII.

Для оценки влияния использования другого критерия разрушения при выявлении разрыва волокна на оценку прочности соединения наряду с критерием Хашина проведена оценка прочности с использованием критерия максимальных напряжений (8) для нескольких групп образцов, диаграммы «нагрузка-перемещение» которых показаны на рис.5.

В таблице 5 приведены результаты оценки прочности соединения для указанных групп образцов с использованием обоих критериев разрушения. Критерий максимальных напряжений дает более высокую оценку разрушающей нагрузки по сравнению с критерием Хашина. Выбор критерия практически не влияет на результат расчетной оценки прочности соединения в случае, когда в укладке слои 0° составляют 50% (укладка 1 в табл. 4 для образца на основе углепластика КМКУ). Для всех остальных образцов изменение в расчетной оценке лежит в пределах 5...13%. В целом результаты в табл.5 показывают, что возможно применение модели прогрессирующего разрушения с использованием и того и другого критерия для разрушения волокна при растяжении, но, так как использование критерия Хашина, в основном, дает консервативную оценку, то для расчета несущей способности болтовых соединений в запас все же следует выбирать данный критерий.

Таблица 5.

Результаты расчетной оценки прочности соединения при использовании критерия Хашина и критерия максимальных напряжений для выявления разрыва волокна.

Группа	$P_{э\text{ ср}}$ кгс	$P_{\text{расч}}$, кгс		δ , %	
		Критерий Хашина	Критерий максимальных напряжений	Критерий Хашина	Критерий максимальных напряжений
I	1731	1560	1776	-9,9	2,6
II	1987	1992	2136	0,3	7,5
V	2266	2136	2256	-5,7	-0,4
VII	1558	1560	1704	0,1	9,4
XII	2048	1824	1848	-10,9	-9,8
XIII	1250	1392	1392	11,4	11,4

Отличительной особенностью оценки прочности болтового соединения с использованием модели прогрессирующего разрушения является возможность прогнозирования типа разрушения образца (разрыв, скол, смятие). Распределение разрушенных определенным образом элементов в образце, полученное в ходе процедуры расчета с использованием модели прогрессирующего разрушения, в момент потери несущей способности позволяет предсказать тип разрушения образца. На рис.6 приведены иллюстрации распределения поврежденного материала вблизи контактной зоны болта и пластины из КМ, характерные для типов разрушения, полученных в эксперименте. Обозначения, принятые на рис.6 для представления различных механизмов разрушения и их комбинаций, представлены в таблице 6.

Направление оси X на этих рисунках соответствует направлению приложения нагрузки к образцу. Из картины распределения поврежденного материала исключены элементы, механизм разрушения которых – растрескивание матрицы при растяжении и сжатии, так как они сильно загромождают общую картину и наименее показательны при идентификации итогового типа разрушения.

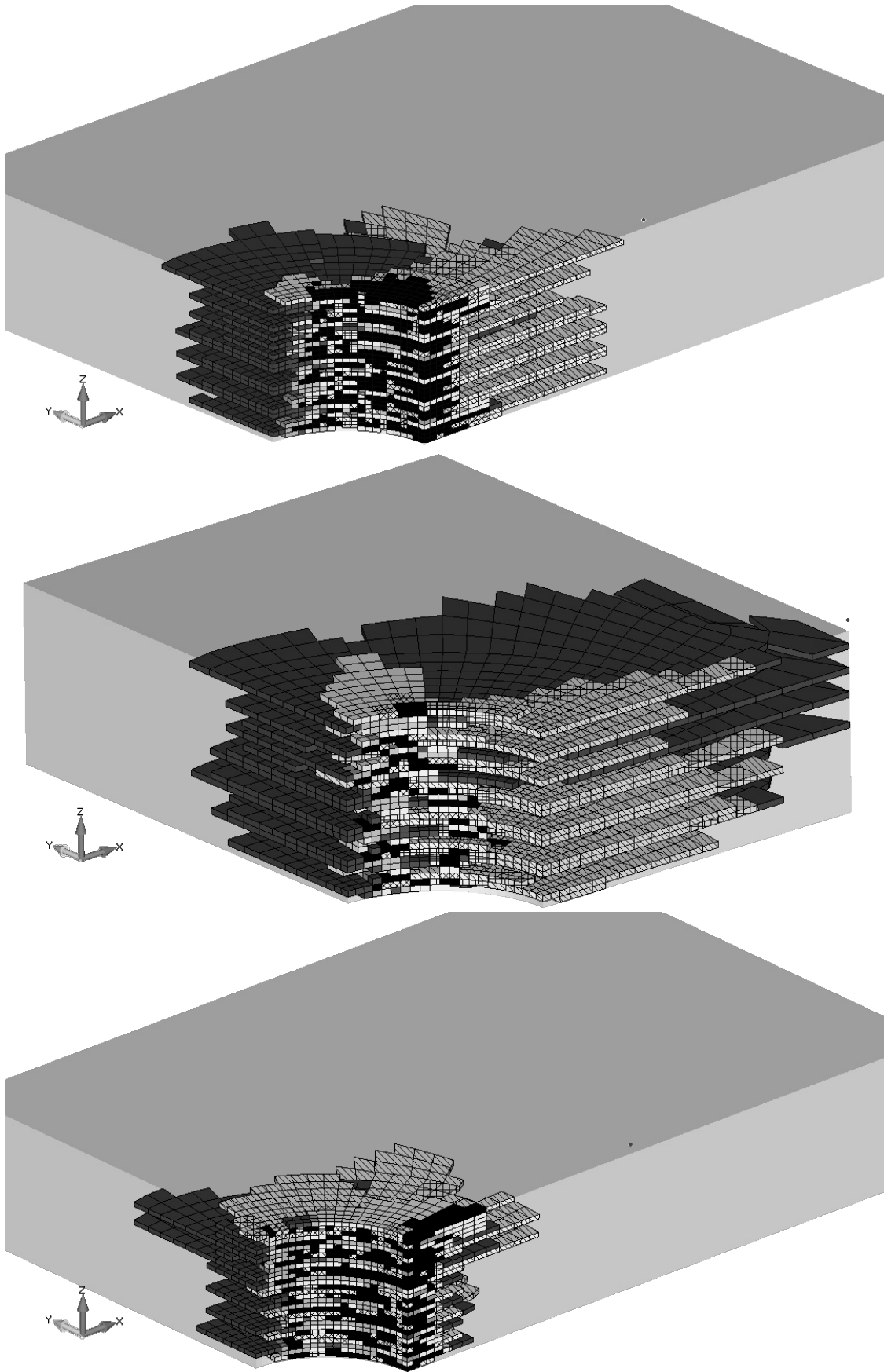









Рис.6. Распределение поврежденного материала вблизи болта: а) смятие; б) скол; в) разрыв.

Таблица 6.

Соответствие обозначения КЭ механизму разрушения.

КЭ	Механизм разрушения/комбинация
	Разрушение волокна при растяжении/сжатии
	Растрескивание матрицы при растяжении/сжатии и отрыв матрицы от волокна посредством сдвига
	Разрушение волокна при растяжении/сжатии и отрыв матрицы от волокна посредством сдвига
	Растрескивание матрицы при растяжении/сжатии и расслоение
	Разрушение волокна при растяжении/сжатии и расслоение
	Растрескивание матрицы при растяжении/сжатии; отрыв матрицы от волокна посредством сдвига и расслоение
	Разрушение волокна при растяжении/сжатии; отрыв матрицы от волокна посредством сдвига и расслоение

При разрушении болтового соединения смятием на картине распределения разрушенного материала можно наблюдать скопление конечных элементов, поврежденных по комбинациям разрушающих механизмов, содержащих расслоение, в особенности, наиболее критичной комбинации – разрушение волокна при растяжении/сжатии, отрыв матрицы от волокна посредством сдвига и расслоение. Такое скопление наблюдается в зоне контакта болта с КМ по всей толщине пакета, причем область такого повреждения распространяется по ширине шляпки болта в направлении действия силы.

В образцах, разрушаемых сколом, такого скопления элементов не наблюдается. В КЭМ на момент потери несущей способности присутствует обширная зона элементов, в которых разрушено волокно. Данная зона распространяется от концентратора по ширине образца и сквозь перемычку по направлению приложения нагрузки, что в действительности присуще такому типу разрушения как скол.

Для разрыва характерно присутствие комбинаций разрушающих механизмов, содержащих расслоение, но в значительно меньшей степени, чем при смятии. Поврежденный материал в основном концентрируется вблизи отверстия и распространяется в направлении приложения нагрузки не столь обширно по сравнению со сколом и смятием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена расчетная оценка прочности болтовых соединений в слоистых композитах. В основу расчета положена модель прогрессирующего разрушения, позволяющая прогнозировать момент и тип разрушения, используя данные о механических характеристиках и характеристиках прочности отдельного монослоя и схеме укладки монослоев в пакете. С использованием встроенного языка программирования APDL в ANSYS разработана подпрограмма, реализующая модель прогрессирующего разрушения для оценки прочности болтовых соединений.

Проведенные численные исследования прочности соединений показали, что выбранная модель позволяет определить момент разрушения и прогнозировать вид разрушения. Расчетная оценка прочности соединений была

выполнена для образцов, изготовленных на основе углепластиков типа КМКУ и Torayca T700, для различных геометрических конфигураций с различной укладкой монослоев в пакете при наличии и отсутствии затяжки болтов. Значения расчетной разрушающей нагрузки хорошо согласуются с экспериментальными данными для большинства рассмотренных образцов. Для образцов, изготовленных из углепластика типа КМКУ, отклонение расчетной разрушающей нагрузки лежит в пределах 0,1...11,4%. Для образцов, при изготовлении которых использован монослой Torayca T700, отклонение расчетной нагрузки оказалось выше, оно лежит в пределах 7,5...15,9%.

Показано, что в качестве критерия для выявления разрушения волокна при растяжении возможно использование критерия максимальных напряжений, но оно ведет к завышенной оценке прочности болтового соединения. Поэтому для расчета несущей способности болтовых соединений в запас все же следует выбирать критерий разрушения Хашина (3).

Разработанная подпрограмма расчета прочности болтовых соединений КМ, основанная на модели прогрессирующего разрушения, дает приемлемую оценку прочности и позволяет достоверно прогнозировать тип разрушения. Она прошла успешное тестирование на различных образцах одноболтовых двухсрезных соединений при растяжении и в дальнейшем может быть распространена для расчета болтовых соединений в различных условиях нагружения на натуральных конструкциях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Camanho P.P., Matthews F.L. *Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP: a review* // Composites Part A. – 1997. – Vol.28A. – P.529-547.
2. Tang S. *Failure of composite joints under combined tension and bolt loads* // J. Compos. Mater. – 1981. – Vol.15. – P.329-335.
3. Waszczak J.P., Cruse T.A. *Failure mode and strength prediction of anisotropic bolt bearing specimens* // J. Compos. Mater. – 1971. – Vol.5. – P.421-425.
4. Whitney J.M., Nuismer R.J. *Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations* // J. Compos. Mater. – 1974. – Vol.8. – P.253-265.
5. Гришин В.И., Глебова М.А., Беспалов В.А., Гоцелюк Т.Б. *Исследование критериев разрушения композиционных образцов с концентраторами напряжений при сжатии* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т.20. – №1. – С.58-86.
6. Максименко В.Н., Олегин И.П. *Теоретические основы методов расчета прочности элементов конструкций из композитов.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 240 с.
7. Agarwal B.L. *Static strength prediction of bolted joint in composite materials* // AIAA J. – 1980. – Vol.18. – P.1371-1375.
8. Xiong Y. *An analytical method for failure prediction of multi-fastener composite joints* // Int. J. Solids Structures. – 1996. – Vol.33. – N29. – P.4395-4409.
9. Chang F.K., Scott R.A., Springer G.S. *Failure of composite laminates containing pin loaded holes – method of solution* // J. Compos. Mater. – 1984. – Vol.18. – P.255-278.
10. Schulz K.C., Packman P., Eisenmann J.R. *A tension-mode fracture model for bolted joints in composite laminates* // J. Compos. Mater. – 1995. – Vol.29. – P.37-58.

11. Tserpes K.I., Labeas G., Papanikos P., Kermanidis Th. *Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates* // Composites Part B: Engineering. – 2002. – Vol.33. – P.521-529.
12. Camanho P.P., Matthews F.L. *A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates* // J. Comp Mater. – 2000. – Vol. 33. – P.906-927.
13. Chang F.K., Chang K.Y. *Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure* // J. Compos. Mater. – 1987. – Vol.21. – P.809-833.
14. Tan S.C. *A progressive failure model for composite laminates containing openings* // J. Compos. Mater. – 1991. – Vol.25. – P.556-577.
15. Chang F.K., Chang K.Y. *A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations* // J. Compos. Mater. – 1987. – Vol.21. – P.834-855.
16. Hahin Z. *Failure criteria for unidirectional fibre composites* // J. Appl. Mech. – 1980. – Vol.47. – P.329-334.
17. Shokrieh M.M., Lessard L.B. *Progressive fatigue damage modeling of composite materials. Part I: Modeling* // J. Compos. Mater. – 2001. – Vol.34. – P.1056-1080.
18. Беспалов В.А., Гоцелюк Т.Б., Коваленко Н.А., Олегин И.П. *Использование модели развивающегося повреждения при оценке прочности слоистых углепластиков с различными концентраторами напряжений* // Омский научный вестник. – 2015. – №3(143). – С.329-333.

REFERENCES

1. Camanho P.P., Matthews F.L. *Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP: a review*. Composites Part A, 1997, Vol.28A, Pp.529-547.
2. Tang S. *Failure of composite joints under combined tension and bolt loads*. J. Compos. Mater., 1981, Vol.15, Pp.329-335.
3. Waszczak J.P., Cruse T.A. *Failure mode and strength prediction of anisotropic bolt bearing specimens*. J. Compos. Mater., 1971, Vol.5, Pp.421-425.
4. Whitney J.M., Nuismer R.J. *Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations*. J. Compos. Mater., 1974, Vol.8, Pp.253-265.
5. Grishin V.I., Glebova M.A., Bepalov V.A., Gotselyuk T.B. *Issledovanie kriteriev razrusheniia kompozitsionnykh obratstov s kontsentratorami napriazhenii pri szhatii [Investigation of fracture criteria of composite samples with stress concentrators in compression]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii, 2014, Vol.20, No.1, Pp.58-86.
6. Maksimenko V.N., Olegin I.P. *Teoreticheskie osnovy metodov rascheta prochnosti elementov konstruktsii iz kompozitov [Theory of strength analysis methods for composite constructions]*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2006, 240 p.
7. Agarwal B.L. *Static strength prediction of bolted joint in composite materials*. AIAA J., 1980, Vol.18, Pp.1371-1375.
8. Xiong Y. *An analytical method for failure prediction of multi-fastener composite joints*. Int. J. Solids Structures, 1996, Vol.33, No.29, Pp.4395-4409.
9. Chang F.K., Scott R.A., Springer G.S. *Failure of composite laminates containing pin loaded holes – method of solution*. J. Compos. Mater., 1984, Vol.18, Pp.255-278.

10. Schulz K.C., Packman P., Eisenmann J.R. *A tension-mode fracture model for bolted joints in composite laminates*. J. Compos. Mater., 1995, Vol.29, Pp.37-58.
11. Tserpes K.I., Labeas G., Papanikos P., Kermanidis Th. *Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates*. Composites Part B: Engineering, 2002, Vol.33, Pp.521-529.
12. Camanho P.P., Matthews F.L. *A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates*. J. Comp Mater., 2000, Vol.33, Pp.906-927.
13. Chang F.K., Chang K.Y. *Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure*. J. Compos. Mater., 1987, Vol.21, Pp.809-833.
14. Tan S.C. *A progressive failure model for composite laminates containing openings*. J. Compos. Mater., 1991, Vol.25, Pp.556-577.
15. Chang F.K., Chang K.Y. *A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations*. J. Compos. Mater., 1987, Vol.21, Pp.834-855.
16. Hahn Z. *Failure criteria for unidirectional fibre composites*. J. Appl. Mech., 1980, Vol.47, Pp.329-334.
17. Shokrieh M.M., Lessard L.B. *Progressive fatigue damage modeling of composite materials. Part I: Modeling*. J. Compos. Mater., 2001, Vol.34, Pp.1056-1080.
18. Bespalov V.A., Gotselyuk T.B., Kovalenko N.A., Olegin I.P. *Ispol'zovanie modeli razvivaiushchegosia povrezhdeniia pri otsenke prochnosti sloistykh ugleplastikov s razlichnymi kontsentratorami napriazhenii [Progressive damage model application for strength estimation of laminate carbon fibre plastic with different stress concentrators*. Omskii nauchnyi vestnik, 2015, No.3(143), Pp.329-333.

Поступила в редакцию 28 января 2016 года

Сведения об авторах:

Гоцелюк Татьяна Борисовна – к.т.н., нач. сектора, ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им.С.А.Чаплыгина»; доц., Кафедра прочности летательных аппаратов, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия; e-mail: gotseluk@ngs.ru

Гришин Вячеслав Иванович – д.т.н., проф., гл.н.с., ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский Московской области, Россия; e-mail: gvi0641@gmail.com

Коваленко Наталья Андреевна – инж. 2-ой категории, ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им.С.А.Чаплыгина»; асп., Кафедра прочности летательных аппаратов, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия; e-mail: natasha.kovalenko89@mail.ru