



УДК 519.6

*Кривов Г.А.¹, Матвиенко В.А.¹, Рудько А.Н.¹, Рудаков К.Н.², Шукаев С.Н.², Негода С.П.²*¹АО «Украинский научно-исследовательский институт авиационной технологии». Украина, г. Киев²Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт". Украина, г. Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ДЕТАЛИ ИЗ ПКМ, В СРЕДЕ FEMAP/NASTRAN

С целью определения влияния ряда конструктивно-технологических параметров на статическую и циклическую прочность соединений, содержащих детали из полимерных композиционных материалов, предложена методика расчета напряженно-деформированного состояния соединения методом конечных элементов с помощью программного комплекса FEMAP/NASTRAN. На примере болтового соединения, содержащего детали из полимерного композиционного материала и титанового сплава, описана методика создания соответствующей трехмерной модели и моделирования конструктивно-технологических параметров соединений (усилие свинчивания, величина зазора/натяга при установке болтов в отверстия, параметры качества поверхности и кромок отверстий), условий эксплуатации (температура, нагрузки).

Ключевые слова: болтовое соединение, полимерный композиционный материал, конечно-элементное моделирование.

Введение

Настоящая статья продолжает серию публикаций, посвященных результатам исследований, проводимых в Украинском научно-исследовательском институте авиационной технологии и посвященных оптимизации конструктивно-технологических параметров соединений элементов планера самолета [1 – 5].

Одной из основных тенденций развития современного самолетостроения является все более широкое использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) в высоконагруженных элементах конструкции планера самолета (крыла, фюзеляжа, оперения). Это обстоятельство, а также особенности структуры, характера разрушения, обрабатываемости ПКМ обуславливают необходимость разработки соответствующих методик, моделей численных и экспериментальных исследований соединений конструкций из таких материалов.

Задачей исследования, результаты которого представлены ниже, была разработка и реализация модели расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) болтового соединения элементов конструкции, изготовленных из ПКМ. Конечной целью таких расчетов являлась количественная оценка влияния ряда конструктивно-технологических факторов на статическую и циклическую прочность соединения.

Основой любых типов расчетов на несущую способность соединений (статическую прочность, малоцикловую или многоцикловую усталость) является расчет напряженно-деформированного состояния элементов соединений, с максимально возможной точностью моделирующий реальные условия эксплуатации.

Болтовые соединения – широко распространенное конструктивное решение по созданию разъемного соединения элементов конструкций. Методы оценки прочности и несущей способности болтовых соединений начали разрабатываться достаточно давно, большинство из них широко апробировано на практике, нашли отражение в научно-технической и справочной литературе [6 – 12]. Для них характерно проведение:

- упрощенного аналитического расчета болта (с учетом усилия свинчивания болтового соединения – расчет на растяжение; при установке болта без гарантированного зазора – расчет на срез);
- уточненного аналитического расчета болта (дополнительно учитывается податливость соединяемых деталей);
- аналитического расчета распределения усилий свинчивания болтового соединения между витками резьбы болта (гайки);
- уточненного численного расчета напряжений в резьбе болта (гайки) с применением метода конечных элементов (МКЭ). Краевая задача ставится как неконтактная или контактная. В послед-

нем случае автоматически учитывается неравномерность восприятия усилия свинчивания болтового соединения в резьбе разными витками;

- приближенного расчета НДС соединяемых элементов (вблизи отверстий), аналитического или с применением МКЭ. Краевая задача ставится как неконтактная;

- уточненного численного расчета всего соединения с применением МКЭ. Краевая задача ставится как контактная.

Так как болтовые соединения с применением ПКМ требуют уточненных расчетов, то желательно применять трехмерный (3D) конечно-элементный расчет всего соединения в контактной постановке. Это стало возможным благодаря развитию ЭВМ и программных комплексов класса PLM (Product Lifecycle Manufacturing – компьютерная технология оценки качества спроектированной конструкции).

В качестве объекта моделирования было принято двухрядное двухсрезное соединение, воспринимающее растягивающие нагрузки. Была разработана модель и проведены расчеты, подтверждающие правильность принятых технологических решений.

Технологические и эксплуатационные факторы, влияющие на статическую и циклическую прочность соединения, учитываемые в разработанной модели:

- величина зазора/натяга при постановке болтов в отверстия;
- усилие свинчивания болтового соединения;
- величина параметров качества поверхности и кромок отверстий, выполненных в деталях из ПКМ;
- трение в соединении;
- температурные и силовые нагрузки.

Материалы элементов болтовых соединений

Для проведения расчетов болтового соединения с применением технологии PLM необходимо иметь набор физико-механических характеристик материалов элементов соединения (соединяемые детали, крепежные элементы). Для авиационных конструкций в качестве основных материалов, наряду с ПКМ, характерно применение титановых или алюминиевых сплавов.

Крепежные элементы (болт, гайка, шайба и т.п.) традиционно изготавливается из титанового сплава или легированной стали (чаще всего 30ХГСА, с поверхностным покрытием; материал рекомендуют для условий низких и повышенных (до 200°С) температур, значительных и знакопеременных нагрузок [16]).

Титановые сплавы и стали считаются изотропными материалами, алюминий – слабо анизотропным (листовой – слабо 2D-ортотропным) [16 – 18].

Композиционный материал для высоконагруженных авиационных элементов конструкций – обычно полимерный, с симметрично армированны-

ми слоями, с наполнителем из углеродных волокон и эпоксидной основой [12 – 15, 19, 20]. Особенностью механических характеристик ПКМ является их большая вариативность, поскольку данный материал является, по сути, конструкцией, созданной из множества слоев с различными углами укладки. Такие материалы формализуются как 3D-ортотропные [13, 14, 19, 21 – 23]. Если известны толщина и механические характеристики только одного слоя, то механические свойства многослойного ПКМ можно определить с использованием формул одной из "теорий эффективного модуля" [21 – 23] ("эффективный модуль" – модуль упругости, усредненный для всей толщины пластины из композиционного материала с учетом углов укладки слоев): либо самостоятельным их применением, либо с помощью процедур фирменных программ.

Следует добавить, что большие различия значений характеристик слоя в разных направлениях, в том числе коэффициентов температурного расширения (в 30 ... 80 раз [22 – 24]), приводят при термическом нагружении к появлению межслойных напряжений у "свободной кромки" листового композиционного материала, что может вызывать его расслоение даже без приложения силовой нагрузки (только от термической) при неоптимальной схеме укладки слоев ПКМ. "Теория эффективного модуля" позволяет оценивать такие напряжения [22].

Выбор программного комплекса с технологией PLM

Среди наиболее известных программных комплексов с технологией PLM, в которых реализован МКЭ и алгоритм решения статических контактных краевых задач, отметим следующие: Workbench/ANSYS, FEMAP/NASTRAN/ADINA, PATRAN/NASTRAN, ABAQUS, SolidWorks/COSMOS, HyperWorks.

В этих комплексах Workbench, FEMAP, PATRAN и SolidWorks соответственно являются пре- и пост-процессорами (т.е. это среды подготовки модели, просмотра и документирования результатов), а ANSYS, NASTRAN и COSMOS – только процессорами. Комплексы ABAQUS и HyperWorks – цельные пре-, пост- и процессоры. ADINA может поставляться как самостоятельный комплекс или в составе FEMAP как один из процессоров. Однако ADINA (в составе FEMAP v10) не может работать с 3D-ортотропными материалами.

Все указанные программные комплексы имеют удобный графический интерфейс пользователя. В их среде можно:

- создавать 3D-геометрические объекты практически любой сложности;
- создавать на основе 3D-геометрии конечно-элементной модели (КЭМ) высокого качества (с под-

робной аппроксимацией геометрии, с управлением локальным сгущением конечно-элементной сетки);

- моделировать все необходимые свойства материалов, в частности, изотропию и 3D-ортотропию, зависимость механических свойств от температуры;
- назначать расположение осей анизотропии материала;
- назначать/редактировать возможные зоны контакта типа "поверхность-поверхность", в том числе величину натяга при установке болтов в отверстия, назначать зонам контакта особые свойства (например, модели (коэффициенты) трения);
- проводить конечно-элементные расчеты (моделировать) или назначать (как известное) начальное и текущее тепловое состояние элементов модели;

- наличие интерфейса (системы передачи данных) с другими программными комплексами;
- наличие опыта работы с данным программным комплексом и существование вспомогательной литературы по работе с FEMAP/NASTRAN [28 – 31].

Характеристики технологического образца болтового соединения

В качестве технологического образца использовалось двухрядное двухсрезное болтовое соединение "титан-ПКМ-титан", работающее на растяжение и воспринимающее температурное воздействие. На рис.1 показана 3D-геометрическая модель такого соединения.

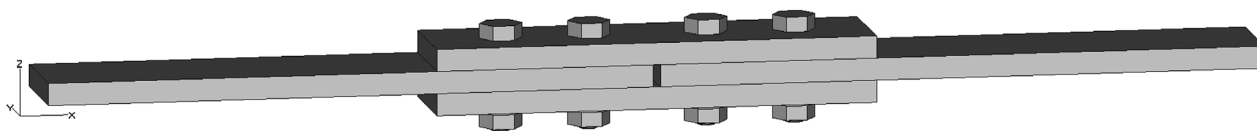


Рис. 1. Трехмерная модель двухрядного двухсрезного болтового соединения

- проводить конечно-элементные расчеты НДС элементов модели в контактном взаимодействии без ограничения в количестве контактирующих тел и с переменными зонами контакта;
- управлять точностью получаемых результатов;
- анализировать и документировать полученные результаты;
- проводить расчеты на ЭВМ, объединенных кластерной технологией вычислений [25 и др.], или на отдельных персональных компьютерах, в распределенных операционных системах (Windows, Linux);
- обмениваться моделями и результатами с другими программными комплексами.

В литературе встречаются единичные публикации о трехмерных расчетах с применением МКЭ и с учетом контактного взаимодействия, т.е. широкого применения такие расчеты еще не нашли. Как правило, в таких источниках можно встретить подобные расчеты, проведенные в программных комплексах ABAQUS [26, 27] или ANSYS [12].

Для создания, отработки и иллюстрации методики проведения расчетов НДС в элементах болтовых соединений, содержащих детали из ПКМ, в настоящей работе использовался программный комплекс FEMAP/NASTRAN, а именно FEMAP v10 / NX NASTRAN v7, по следующим причинам:

- широкое применение FEMAP/NASTRAN в мировой практике проектирования авиационно-космической техники является фактическим стандартом (процессор NASTRAN разработан по заказу NASA: от NAsa STRuctural ANalysis);

Номинальные размеры элементов болтового соединения, принятые для проведения расчетов, приведены в табл. 1.

В болтовом соединении моделировался натяг по цилиндрическим контактирующим поверхностям системы "болт-отверстие". Анализируемые величины натяга: 0 мм; 0,015 мм; 0,030 мм; 0,060 мм.

Кроме того, в болтовом соединении моделировалось свинчивание с контролируемым крутящим моментом $M_{кл}$, равным 11 Нм, 13 Нм и 15 Нм.

Усилия, прикладываемые к болтовому соединению, – растягивающие вдоль продольной оси (оси X). При расчетах были приняты следующие значения усилий: 38 кН; 50 кН и 56 кН.

Принятые значения коэффициентов трения: для пары "металл-металл" – 0,1; для пары "металл-ПКМ" – 0,01.

В расчетах было принято, что начальная температура соединения составляет +90°C и конечная –60°C, т.е. задавался отрицательный перепад температур в 150°C.

Механические характеристики материалов болтового соединения

Для проведения расчетов были приняты следующие значения механических характеристик пластины из ПКМ (табл. 2): модули упругости одного слоя (монослоя) ПКМ – в соответствии с [26], а коэффициенты теплового удлинения – в соответствии с [24]; толщина монослоя – 0,132 мм.

Таблица 1.

Номинальные размеры элементов болтового соединения

Элемент соединения	Величина	Значение величины, мм
Пластины из ПКМ	длина	165
	ширина	30
	толщина	6
	торцевой зазор между пластинами	2
	фаски на кромках отверстий	0,3
	длина поверхности для приложения усилия, растягивающего соединение	70
Пластины из титана	длина	120
	ширина	30
	толщина	6
	фаски на кромках отверстий	0,3
	расстояние между центральными отверстиями	32
	расстояние между крайними отверстиями	24
Болт	диаметр гладкой части	6
	длина	25
	резьба	M6x1
	длина резьбы	7,5
	высота шестигранной головки	4
	размер под ключ	10
Гайка	высота	4
	резьба	M6x1
	размер под ключ	10
Шайба	наружный диаметр	12
	диаметр отверстия	6,5
	высота	2

Таблица 2.

Механические характеристики ПКМ

Характеристика		Значение	
		Монослой	Пластина
Модуль Юнга, ГПа	E_{11}	140,0	88,0
	E_{22}	10,0	32,3
	E_{33}	10,0	10,0
Модуль Юнга, ГПа	G_{12}	3,9	4,55
	G_{23}	5,2	17,3
	G_{13}	3,9	4,55
Коэффициент Пуассона	ν_{12}	0,3	0,447
	ν_{23}	0,5	0,415
	ν_{13}	0,3	0,447
Коэффициент температурного удлинения, 1/град	α_{13}	$0,36 \times 10^{-6}$	$0,86 \times 10^{-6}$
	α_{13}	$28,8 \times 10^{-6}$	$6,9 \times 10^{-6}$
	α_{13}	$28,8 \times 10^{-6}$	$28,8 \times 10^{-6}$

Примечание: Первый индекс в характеристике обозначает направление действия усилия, второй – направление вызванной им деформации. Направление осей в пластинах из ПКМ: ось 1 – вдоль наибольшего габарита (длины) пластины (ось OX), ось 2 – вдоль среднего габарита (ширины) пластины (ось OY), ось 3 – вдоль наименьшего габарита (толщина) пластины (ось OZ).

В FEMAP предусмотрен "инструмент", использующий "теорию эффективного модуля" для подсчета эффективных модулей упругости в плоскости пластины из многослойного композиционного материала с разно-ориентированными слоями (команда **Model→Layup**, материал типа **Orthotropic (2D)**). Для листа пластины из ПКМ с 3D-ортотропной структурой [45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/45] получены эффективные значения модулей, приведенные в табл. 2.

отверстиях, причем в титановых пластинах они соответствуют чертежу, а в пластинах из ПКМ – моделируют кольцевое отслоение на кромках отверстия.

После создания геометрической модели болтового соединения назначались возможные контактные поверхности (их 28), из них "собирались" пары (Connectors, их 18) контактных поверхностей: "ведущая" (Master) и "ведомая" (Slave). Порядок назначения пар – произвольный. В качестве "ведо-

Таблица 3.

Механические характеристики материалов пластин из титанового сплава и крепежных элементов

Характеристика	Значение	
	Пластина из титанового сплава ВТ6	Крепежные элементы (болт, гайка, шайба)
Модуль Юнга, ГПа	110	210
Коэффициент Пуассона ν	0,19	0,3
Коэффициент температурного удлинения α , 1/град	$8,6 \times 10^{-6}$	$11,7 \times 10^{-6}$

В табл. 3 представлены механические характеристики пластин из титанового сплава и крепежных элементов.

Методика расчета напряженно-деформированного состояния болтовых соединений с применением технологии PLM

Поскольку рассматриваемое болтовое соединение имеет две плоскости симметрии: XZ и YZ, то расчет выполнялся для ¼ части трехмерной модели соответствующего соединения (рис. 2).

мой" рекомендуют задавать поверхность более жесткого тела. Так как в данном случае жесткость тел примерно одинакова, то фактически нет приоритетности в назначении возможных контактных поверхностей "ведущей" или "ведомой". Контакт типа "поверхность-поверхность" позволяет создавать на контактирующих поверхностях независимые конечно-элементные сетки, моделировать контакт с трением или без, в том числе и взаимное проскальзывание, и возникновение зазоров (потерю контакта) в результате деформирования (поэтому контактные поверхности – возможные).

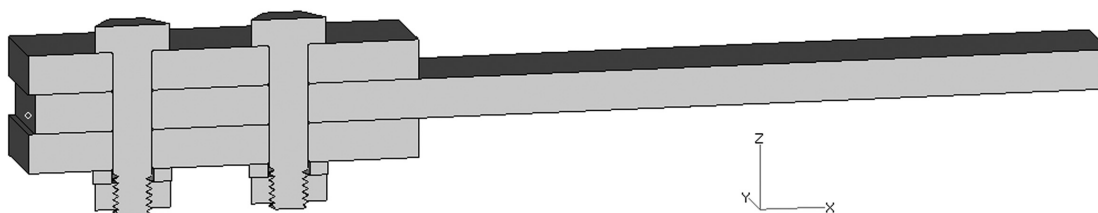


Рис. 2. Фрагмент трехмерной модели двухсрезного болтового соединения, принятый для расчетов

Величина натяга при установке болтов в отверстия моделировалась увеличением диаметра болта.

Для моделирования усилия свинчивания болтового соединения резьба в гайке создавалась сдвинутой в осевом направлении от головки болта на величину, определяемую по методике, изложенной в следующем разделе.

Поскольку расчет является методическим, то такие подробности геометрии, как фаски и округления, не моделировались, за исключением фасок в

Каждая контактная пара поверхностей может иметь свои свойства (Property), в частности, свой коэффициент трения (или модель трения, в FEMAP их 11 вариантов), глубину возможного "проникновения" или "натяга" (это сугубо расчетная величина, которую можно трактовать как величину смятия шероховатостей на контактной поверхности). На рис. 3 и рис. 4 показаны две такие контактные пары поверхностей (выделены желтым цветом). На рис. 3 "ведущая" и "ведомая" контакт-

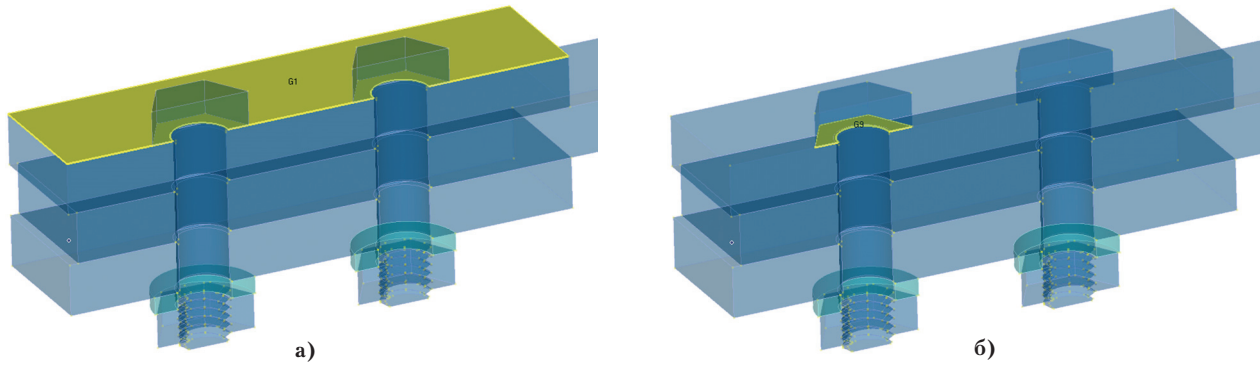


Рис. 3. Фрагмент модели двухсрезного болтового соединения с указанной парой №1 контактных поверхностей:
а) – "ведущая"; б) – "ведомая"

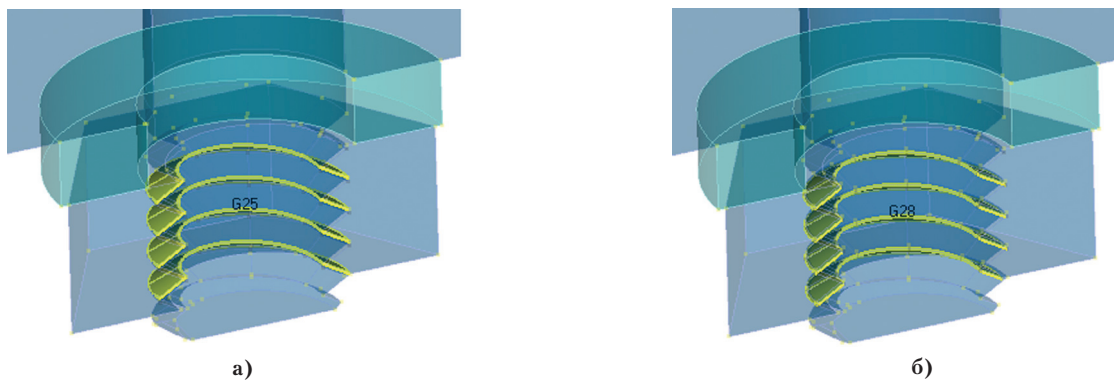


Рис. 4. Фрагмент модели двухсрезного болтового соединения с указанной парой №18 контактных поверхностей:
а) – "ведущая"; б) – "ведомая"

ные поверхности содержат по одной (модельной) поверхности, а на рис. 4 – по несколько (фрагменты витков резьбы болта и гайки).

Далее для модели были заданы материалы путем ввода механических характеристик материалов, приведенных в табл. 2 и 3. После этого, для конечных элементов создаются "Property". При построении сетки конечных элементов использовались тетрагональные трехмерные конечные элементы с аппроксимацией второго порядка (Parabolic) для каждого элемента соединения.

Резьбовая часть болтового соединения моделировалась упрощенно: закругление вершин и впадин резьбы не выполнялось, поперек профиля резьбы создавалось лишь по два конечных элемента. Резьба моделировалась лишь для задания момента свинчивания болтового соединения. Более того, можно было совсем отказаться от моделирования резьбы (с целью уменьшения количества узлов в данной зоне для увеличения их количества в зоне отверстий, где будет присутствовать концентрация напряжений), а заменить резьбовую часть болта, гайку и шайбу "второй головкой болта", т.е. моделировать эти три тела как единое целое. Такой подход реализован, например, в [26, 27], но без обоснова-

ния, хотя очевидно, что осевая жесткость "болта с двумя головками" больше, чем реального. Этот подход требует введения обоснованной поправки в вычислительном эксперименте.

Следующий этап – построение конечно-элементных сеток в каждом из элементов соединения в отдельности с использованием того "Property", который "содержит" нужный материал. Этот процесс в FEMAP автоматизирован, но при этом необходимо качественная сетка конечных элементов – в местах возможной концентрации напряжений она должна сгущаться. В FEMAP для этого есть все необходимые инструменты. В то же время следует учитывать параметры компьютера, на котором краевая задача будет решаться: чем мельче сетка, тем больше узлов и их степеней свободы, тем больше нужно будет памяти ЭВМ и затрат времени на расчеты.

Конечно-элементная модель, созданная для проверки работоспособности методики, представлена на рис.5, а количество узлов и конечных элементов – приведено в табл. 4.

На следующем этапе в NASTRAN собирается и решается система уравнений, содержащая примерно $3N_{узлов}$ неизвестных – узловых перемещений, т.е. в данном случае примерно 340 тысяч.

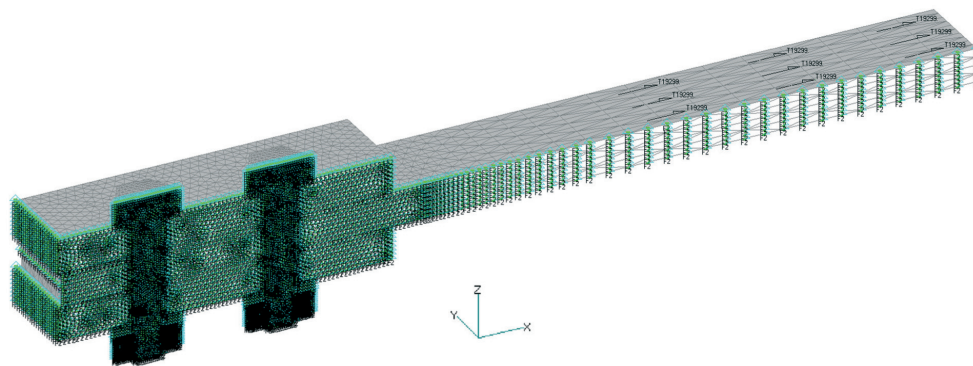


Рис. 5. Конечно-элементная модель фрагмента двухсрезового болтового соединения (ограничения перемещений в узлах и растягивающие нагрузки отмечены треугольниками и стрелками соответственно)

Таблица 4.

Количество узлов и конечных элементов в модели

Элемент соединения	Количество		
	Элементов, N	Узлов, $N_{узлов}$	Конечных элементов, $N_{кэ}$
Пластина из титана	2	17 481	11 105
Пластина из ПКМ	1	25 453	16 074
Болт	2	12 899	7 962
Гайка	2	12 250	7 575
Шайба	2	1 606	901
Всего в модели		113 925	71 160

Влияние "отсеченных" симметричных частей моделируется следующим образом: всем узлам конечно-элементной сетки, лежащим на плоскости отсечения, "запрещали" перемещение в перпендикулярном к плоскости отсечения направлении. Таких направлений в модели два: X и Y . В оставшемся (вертикальном) направлении Z модель фиксировали в узлах левого (рис. 5) торца пластины из ПКМ, расположенных на срединной линии.

Растягивающее усилие задавали в виде двух сил, приложенных к правым (рис. 5) частям верхней и нижней поверхности пластины из ПКМ, равных половине полного усилия N_x , на длине 70 мм (для этого каждая из поверхностей пластины была предварительно разделена на две части). Такой вариант приложения силы N_x , во-первых, соответствует реальным условиям ее приложения при испытаниях соединения (в плоских захватах) и, во-вторых, осуществлен достаточно далеко от отверстий и болтов, чтобы, в соответствии с принципом Сен-Венана, практически не влиять на НДС соединения в районе отверстий.

Тип краевой задачи, назначаемый в FEMAP для NASTRAN, – Static.

Параметры качества поверхности и кромок отверстий, выполненных в деталях из ПКМ; возможности их моделирования

Выполнение отверстий в деталях из ПКМ характеризуется, как правило, следующими параметрами качества поверхности и кромок отверстий [13 – 15]:

- несрезанные волокна (отдельные или в массиве);
- выкрашивание (сколы) на кромках отверстия;
- отслоение (вспучивание) на кромках отверстия (овальное или кольцевое);
- расслоения ПКМ.

В процессе эксплуатации соответствующих конструкций контролируются следующие параметры:

- смятие поверхности отверстия;
- абразивный износ ПКМ.

Все они, с точки зрения несущей способности, фактически означают ее потерю в некотором объеме материала и являются дополнительными концентраторами напряжений.

В рамках МКЭ, фактически являющимся способом аппроксимации пространства и времени для любого типа краевых задач с любыми свойствами

материалов, указанные отклонения в ПКМ можно моделировать следующими способами:

- вносить соответствующие изменения в геометрию детали, на основе которой затем будет создаваться конечно-элементная модель (КЭМ);
- удалять из уже существующей КЭМ отдельные конечные элементы и узлы, соответствующие зоне с отклонениями качества, или разрывать узловые связи соседних КЭ;
- "ослаблять" (но не до нуля) характеристики материала в соответствующих отклонению конечных элементах уже существующей КЭМ.

Два последних способа имеют общий недостаток – конечные элементы ранее созданной КЭМ могут не соответствовать геометрии моделируемого отклонения. Иначе говоря, геометрия отклонений будет моделироваться приближенно. Однако при моделировании появления новых отклонений, эти способы быстры в реализации. Первый способ требует больших затрат времени на реализацию, но позволяет провести более точное моделирование.

Методика задания усилия свинчивания болтового соединения

Существует приближенная (формульная) методика расчета усилия свинчивания болтового

соединения N_{nz} . Однако более точные расчеты можно выполнить непосредственно на КЭМ болтового соединения, проведя дополнительные тарировочные расчеты при отсутствии усилия N_x . Тем более, что в КЭМ невозможно задать усилие свинчивания болтового соединения с помощью силы, прикладываемой к ключу: это можно сделать путем перемещения гайки к головке болта на некоторую величину Δ (мм). Задавая достаточно произвольные значения Δ (табл. 5), проводился конечно-элементный расчет. В средней части болтов определяли средние значения осевого напряжения $(\sigma_z)_{cp}$. По формуле $N_{nz} = (\sigma_z)_{cp} A$, где A – площадь поперечного сечения болта в месте замера $(\sigma_z)_{cp}$, определяли фактическую величину усилия свинчивания болтового соединения. Полученная зависимость $N_{nz}(\Delta)$ приведена в табл. 5 и в виде графика на рис. 6.

Так как график $N_{nz}(\Delta)$ практически линейный, то требуемое значение Δ можно получить линейной аппроксимацией:

$$\Delta \approx \Delta_{(k)} + \frac{N_{nz}(\Delta) - N_{nz}(\Delta_{(k)})}{N_{nz}(\Delta_{(k+1)}) - N_{nz}(\Delta_{(k)})} [\Delta_{(k+1)} - \Delta_{(k)}]$$

где k – номер точки, $\Delta_{(k)} \leq \Delta \leq \Delta_{(k+1)}$.

Таблица 5.

Результаты определения $N_{nz}(\Delta)$

№	Величина перемещения гайки, Δ , мм	$(\sigma_z)_{cp}$, МПа		Диаметр болта, мм	Площадь поперечного сечения болта, A , мм ²	Усилие свинчивания болтового соединения, N_{nz} , Н
		Болт №1	Болт №2			
1	0,030	42	42	6,015	28,4	1 193
2	0,064	179	177			5 055
3	0,1168	395	394			11 218
4	0,20	730	726			20 675

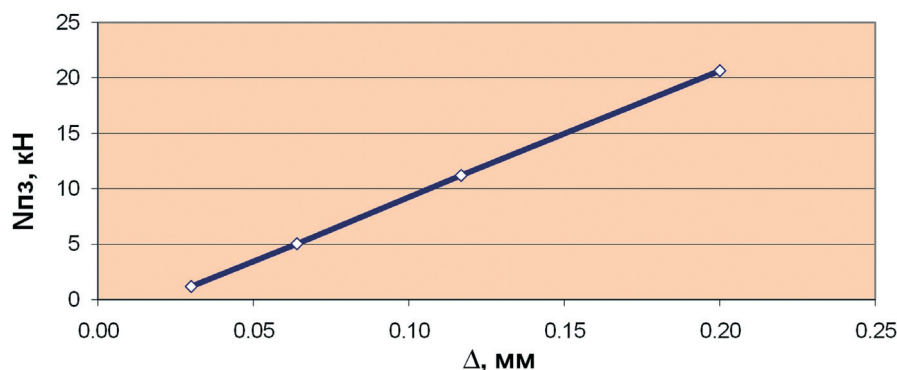


Рис. 6. Зависимость усилия свинчивания болтового соединения N_{nz} от величины перемещения гайки Δ

Требуемое значение усилия свинчивания болтового соединения $N_{нз}$ (Δ) можно вычислить из регламентированной величины момента на ключе [6] $M_{кл} = M_P + M_T$, причем момент сил трения в резьбе:

$$M_P \approx 0.5N_{нз}d_2(\delta/\pi d_2 + f_p)/(1 - f_p\delta/\pi d_2),$$

где d_2 – средний диаметр резьбы; f_p – коэффициент трения в резьбе; а момент сил трения на торце гайки

$$M_T \approx f_T N_{нз} R_T,$$

где f_T – коэффициент трения на торце гайки; R_T – радиус трения опорной поверхности гайки, зависящий от формы поверхности.

При плоской форме опорной поверхности:

$$R_T = (D^3 - d_0^3)/[3(D^2 - d_0^2)],$$

где D, d_0 – диаметры опорной поверхности гайки.

Анализ результатов расчета НДС болтового соединения

Были проведены расчеты при одной величине натяга δ в отверстии, одном значении усилия свинчивания болтового соединения $N_{нз}$ (соответствует моменту на ключе $M_{кл}$), изменении температуры на 150°C и трех парах значений растягивающей силы ($N_X)_{max}$, ($N_X)_{min} = 0,1(N_X)_{max}$ (табл. 6). Указанные значения были приняты по аналогии с параметрами программы выполненного ранее в УкрНИИАТ исследования на усталость соответствующего болтового соединения.

В табл. 6 приведены полученные в результате расчета значения $(\sigma_Z)_{max}$, $(\sigma_Z)_{min}$ и $(\sigma_Z)_m$ – напряжения от растяжения и изгиба в наиболее нагруженном первом (правом) болте (рис. 7) примерно посередине его длины, причем $(\sigma_Z)_m$ – напряжение на оси болта.

Таблица 6.

Параметры и результаты расчета двухсрезового болтового соединения “титан-ПКМ-титан”

№ пары сил	δ , мм	$M_{кл}$, Нм	$N_{нз}$, Н	Δ , мм	N_X , Н	№ болта	$(\sigma_Z)_{max}$, мм	$(\sigma_Z)_{min}$, мм	$(\sigma_Z)_m$, мм
1	0,015	11	14600	0,1466	50980	1	2290	-1542	408
						2	1643	-857	434
5098					1	829	150	495	
					2	563	424	505	
2					56543	1	2480	-1755	398
						2	1786	-1032	410
5654	1	842	135	495					
	2	546	441	504					
3	38598	1	1876	-1067	430				
		2	1325	-470	458				
	3860	1	800	184	492				
		2	597	385	505				

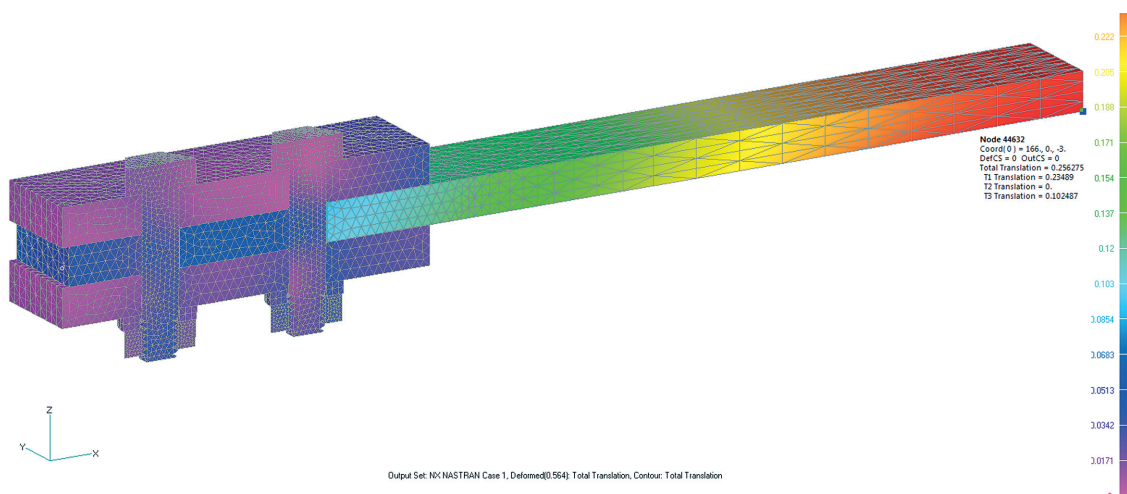


Рис. 7. Конечно-элементная модель фрагмента болтового соединения с указанным распределением полных перемещений (мм)

В результате проведения детального анализа результатов противоречий с ранее полученными результатами натуральных испытаний не было выявлено. Основные этапы анализа проиллюстрированы (рисунки 7–13) для случая с максимальной нагрузкой (пара сил 2 в табл. 6).

Полученные результаты соответствуют граничным условиям и условиям контактного взаимодействия. На рис. 7 представлена КЭМ в деформированном состоянии (к координатам точек добавлены перемещения) и с наложением на поверхностях цветовой градации полных перемещений. Видно, что все элементы болтового соединения находятся

На рис. 8 показано распределение напряжений σ_x на поверхности пластины из ПКМ. Наибольший уровень напряжений наблюдается возле первого отверстия. Причем, кроме зон концентрации растягивающих напряжений σ_x (указаны), имеются зоны сжимающих напряжений σ_x на кромках отверстий, контактирующих с болтами: болты подвергаются срезающей нагрузке. Аналогична ситуация в пластинах из титана, только уровень напряжений меньше. Очевидно, что в зонах отверстий примененная конечно-элементная сетка недостаточно мелкая и для уточненных расчетов ее необходимо сгустить.

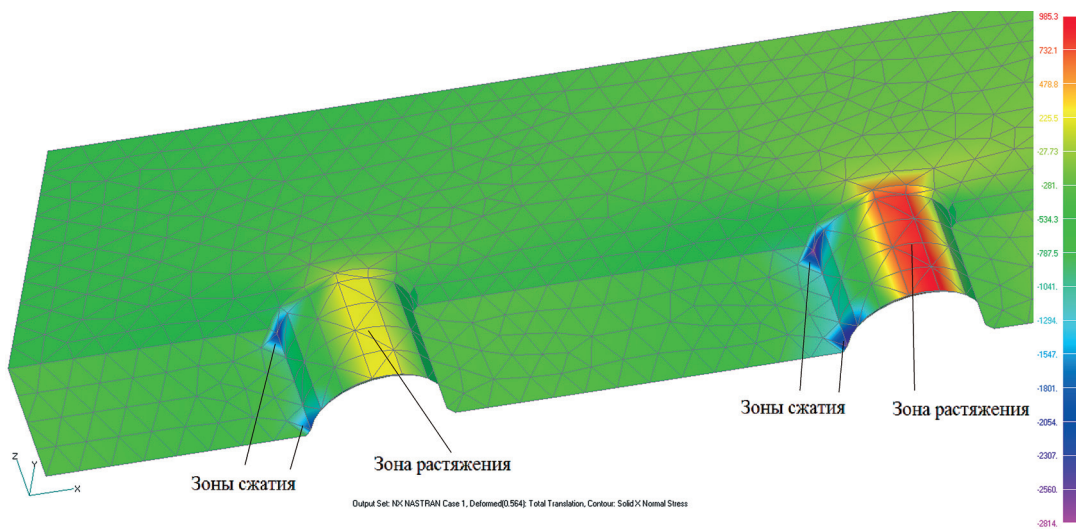


Рис. 8. Конечно-элементная модель фрагмента пластины из ПКМ с указанным распределением нормальных напряжений σ_x (МПа)

на своих местах и взаимно не пересекаются, конструкция вытянута в сторону приложения силы N_x (вдоль оси X), максимальная величина полных перемещений (в крайней правой точке, выделенной на рисунке) равна 0,564 мм, т.е. примерно соответствует наблюдаемым в натурном эксперименте значениям. Плоскости рассечения (симметрии) остались плоскостями и сохранили свою ориентацию в пространстве.

Из данных табл. 6 следует, что при изменении величины растягивающей силы N_x продольное напряжение на оси болта $(\sigma_z)_m$ изменяется незначительно, т.е., в основном, определяется усилием свинчивания болтового соединения. Изгибные напряжения $(\sigma_z)_{max} - (\sigma_z)_m$ на втором болте значительно меньше, чем на первом, т.е. болты подвергаются растяжению и изгибу одновременно, а первый болт (ближе расположенный к месту приложения растягивающей силы N_x) воспринимает более 50% нагрузки. Некоторое снижение напряжения на оси болта $(\sigma_z)_m$ при повышении величины силы N_x объясняется поперечной деформацией пластин, т.е. уменьшением их толщин.

На рис. 9 видно, что в пластинах и шайбах у отверстий возникает зона сжатия (напряжения σ_z), вызванная свинчиванием болтового соединения. Симметричность зоны сжатия нарушается в результате изгиба растянутого болта: на рис. 10 и рис. 11 отчетливо видно, что болты не только растянуты, но и подвергаются изгибу (рис. 10) и срезу (рис. 11). Разный цветовой оттенок касательных напряжений в верхней и нижней зонах среза болта указывает лишь на разный знак касательных напряжений, а по абсолютным величинам они в верхних и нижних зонах среза каждого болта практически идентичны.

На рис. 12 и рис. 13 изображены распределения максимальных нормальных σ_{max} и эквивалентных напряжений σ_{Mises} на поверхностях всего соединения.

Сопоставление результатов расчетов с результатами экспериментальных исследований аналогичных болтовых соединений, выполненных в УкрНИИАТ, показало качественное совпадение характера разрушения соединения в эксперименте с зонами максимальных напряжений, полученными в расчете.

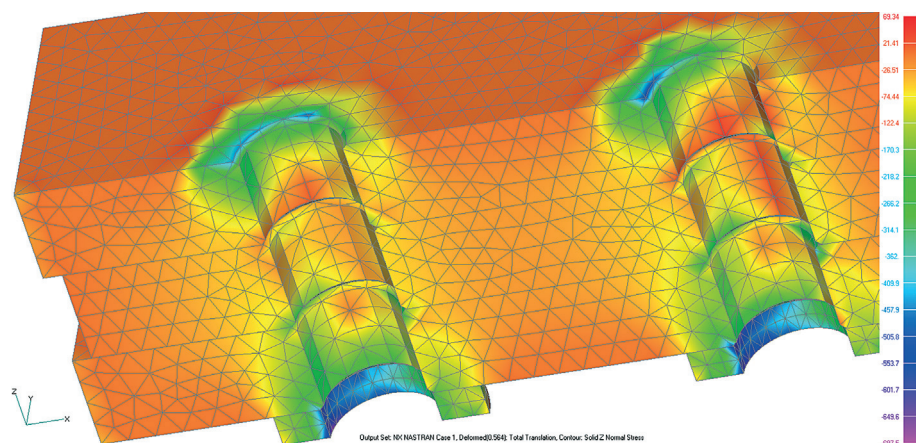


Рис. 9. Конечно-элементная модель фрагмента соединения с указанным распределением нормальных напряжений σ_x (МПа) в пластинах и шайбах

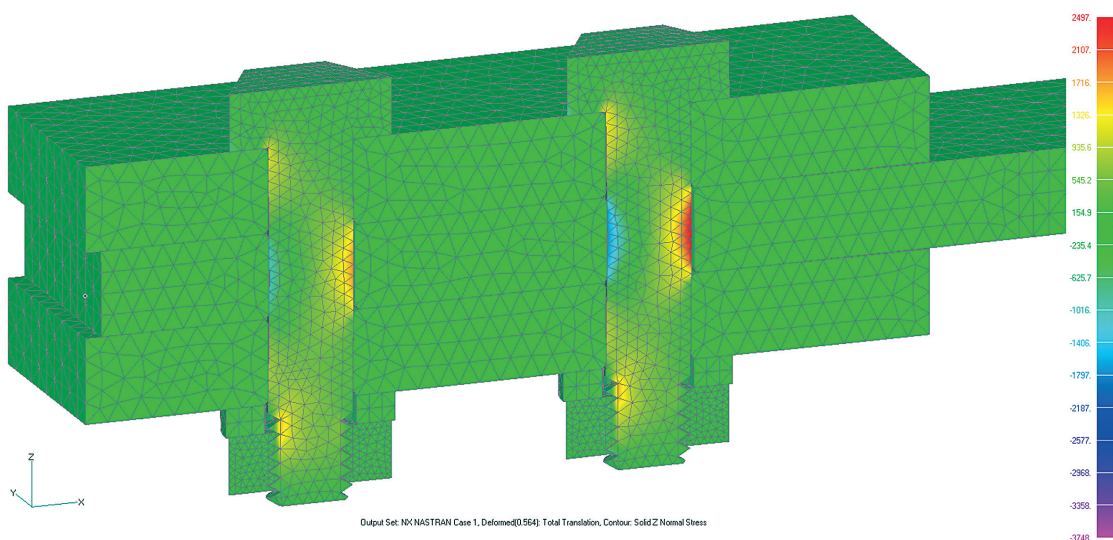


Рис. 10. Конечно-элементная модель фрагмента соединения с указанным распределением нормальных напряжений σ_z (МПа) в болтах

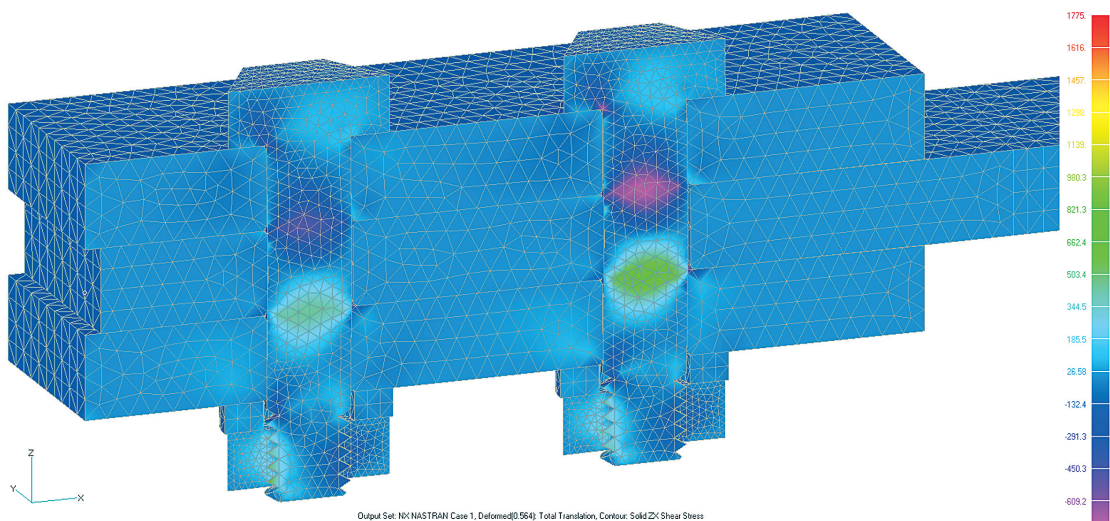


Рис. 11. Конечно-элементная модель фрагмента соединения с указанным распределением касательных напряжений τ_{zx} (МПа)

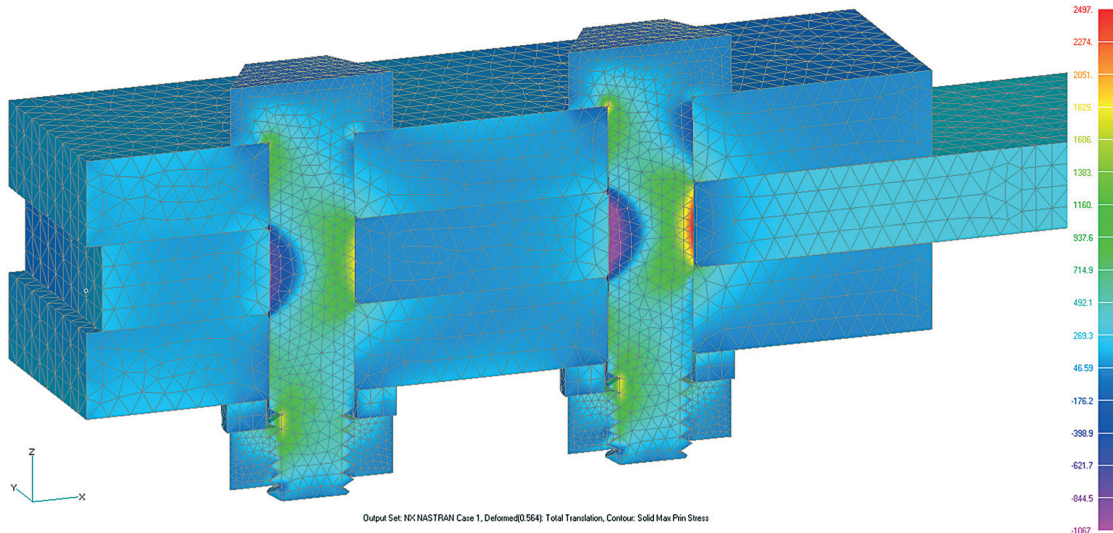


Рис. 12. Конечно-элементная модель фрагмента соединения с указанным распределением максимальных касательных напряжений σ_{max} (МПа)

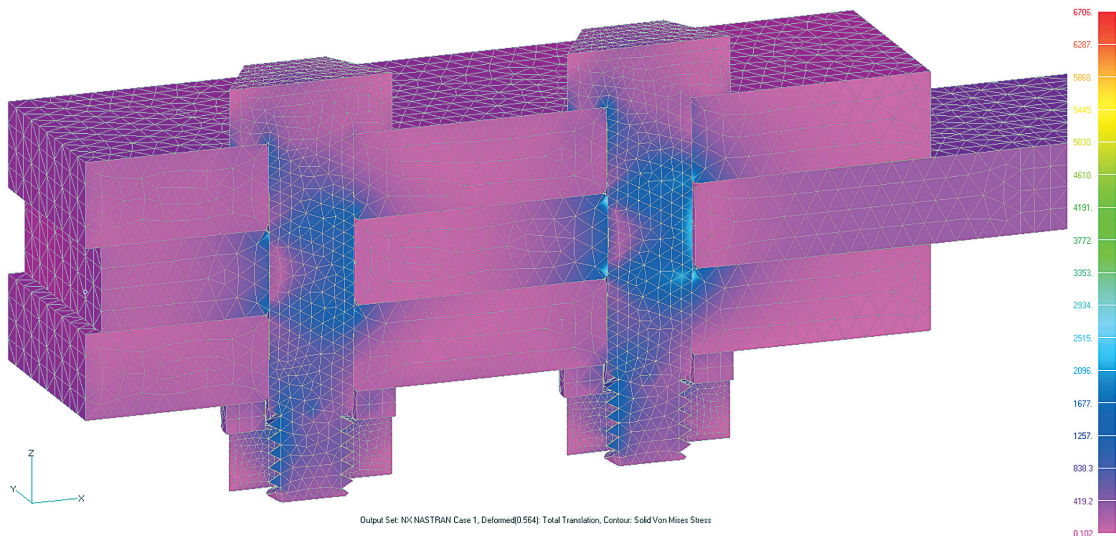


Рис. 13. Конечно-элементная модель фрагмента соединения с указанным распределением эквивалентных напряжений σ_{Mises} (МПа)

Выводы

Полученные числовые результаты свидетельствуют о правильно поставленной и решенной в среде FEMAP/NASTRAN краевой термоупругой задачи в контактной постановке. Результаты расчета позволяют сделать вывод о наличии реальной возможности проведения корректного трехмерного конечно-элементного моделирования болтовых соединений, содержащих, кроме металлических, элементы из 3D-ортотропного композиционного материала, с помощью описанной модели расчета.

Литература

- [1] Кривов Г.А., Матвиенко В.А., Братухин В.А. Комплексно-механизированная технология выполнения болтовых соединений в современном агрегатно-сборочном производстве // Технологические системы. – 2005. – №27. – С. 7-17.
- [2] Матвиенко В.А., Перкаш А.И., Огарков С.О., Прохоров А.Г., Спыну В.Е. Комплексно-механизированная технология выполнения высоконагруженных болтовых соединений элементов конструкций планера самолета SSJ // Технологические системы. – 2009. – №49. – С. 89-94.



- [3] Кривов Г.А., Матвиенко В.А., Гириш Р.И., Резников В.А., Стрижиус В.Е., Гребенников А.Г. Обеспечение ресурса высоконагруженных элементов конструкции планера с функциональными отверстиями // Технологические системы. – 2009. – №49. – С. 94–100.
- [4] Матвиенко В.А., Гириш Р.И., Стрижиус В.Е., Пастушенко В.Н., Толстой С.А., Шитоба Е.Г., Еремин М.В. Механизированные технологии и инструмент для выполнения заклепочных и болт-заклепочных соединений элементов конструкций планера самолетов семейства SSJ // Технологические системы. – 2009. – №49. – С. 100-107.
- [5] Матвиенко В.А., Рудько А.Н., Братухин В.А. Крепежные системы для соединений элементов конструкций планера самолетов нового поколения // Технологические системы. – 2009. – №49. – С. 107–112.
- [6] Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
- [7] Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. – М.: Машиностроение, 1990. – 365 с.
- [8] Иосилевич Г.Б. Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
- [9] Прочность, устойчивость, колебания. Том 2: Справочник / Под общ. ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1962. – 463 с.
- [10] Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки / Пер. с англ. В.И. Контовта под ред. Г.С. Шапиро. – М.: Наука, 1966. – 635 с.
- [11] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / Пер. с англ. В.Э. Наумова и А.А. Спектора под ред. Р.В. Гольдштейна. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
- [12] Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций / А.Г. Гребенников. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2006. – 532 с.
- [13] Серенсен С.В., Зайцев Г.П. Несущая способность тонкостенных конструкций из армированных пластиков с дефектами. – К.: Наук. думка, 1982. – 296 с.
- [14] Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. / Под ред Дж. Любина; Пер. с англ. Под ред. Б.Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. Кн. 1. – 448 с., Кн. 2. – 584 с.
- [15] Астанін В.В., Глоба О.В., Шевченко О.А. Експлуатаційні пошкодження елементів конструкцій літальних апаратів із композиційних матеріалів і методи їх ремонту // Технологические системы, 2011. – № 4(57). – С. 64-68.
- [16] Марочник сталей и сплавов. 2-е изд, доп. и испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
- [17] Титановые сплавы в машиностроении // Б.Б. Чечулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева и др. / Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
- [18] Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. Карманный справочник / Пер. с англ. – М.: Изд. дом "Додэка-XXI", 2004. – 320 с.
- [19] Baker A.A. Composite Materials for Aircraft Structures. – Eurospan, 2004. – 400 s.
- [20] Громашев А.Г., Тарасов Ю.М. Комплексная автоматизация создания интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов // Технологические системы, 2007. – № 2(38). – С. 5-11.
- [21] Васильев В.В. Механика конструкций из композитных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 269 с.
- [22] Межслойные эффекты в композитных материалах // Под ред. Н. Пейгано / Пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 346 с.
- [23] Milton G.W. The Theory of Composites. – Cambridge University Press, 2004. – 719 s.
- [24] Заравовський М.М. Деформування і міцність шаруватих вуглепластиків при кімнатній та криогенних температурах / Автореф... канд. техн. наук. – К.: ІПМіц. НАНУ, 2009. – 20 с.
- [25] Погосян М.А., Савельевских Е.П., Стрелец Д.Ю., Корнев А.В. Отечественные суперкомпьютерные технологии в авиационной промышленности // Технологические системы, 2012. – № 3(60). – С. 33–43.
- [26] Johan Ekh, Joakim Schun, Gunnar Melin. Secondary bending in multi fastener, composite-to-aluminium single shear lap joints. – Composites. Part B: engineering, 2005. – 36. – s. 195-208.
- [27] Gordon Kelly. Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. – Composite Structures, 2006. – 72. – s. 119–129.
- [28] Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC. visualNastran for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 704 с. (Серия "Проектирование")
- [29] Рычков С.П. MSC.visualNASTRAN для Windows. – М.: НТ Пресс, 2004. – 552 с. (Проектирование и моделирование)
- [30] Рудаков К.Н. UGS Femap 9.3. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. – К.: КПИ, 2009. – 296 с.
- [31] Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. – К.: КПИ, 2011. – 317 с.

Krivov G.A.¹, Matvienko V.A.¹, Rudko A.N.¹, Rudakov K.N.², Shukayev S.N.², Negoda S.P.²

¹ Ukrainian Research Institute of Aviation Technology, JSC. Ukraine, Kiev

² The National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute». Ukraine, Kiev

MODELING OF BOLT JOINTS CONTAINS COMPOSITES PARTS USING PROGRAM COMPLEX FEMAP/NASTRAN

In order to determine the effect of structural and technological parameters on static and cyclic durability of joints containing polymer composite material, proposed a method for calculation of the stress-strain state of joints by using finite element and program complex FEMAP/NASTRAN. Methodology of respective 3D-model creating and some constructive and technological parameters modeling (torque, level of interference/clearance fit hole, surface and edges of holes quality parameters), operating conditions modeling (temperature, load) are described for bolt joint contains titanium and composite parts.

Keywords: Keywords: bolted joints, polymer composites, finite-element modeling.

References

- [1] Krivov G.A., Matvienko V.A., Bratuhin V.A. Kompleksno-mehanizirovannaja tehnologija vypolnenija boltovyh soedinenij v sovremennom agregatno-sborochnom proizvodstve [The is complex-mechanised process engineering of realisation of bolt joints in modern agregatno-assembly manufacture] Tehnologicheskie sistemy, 2005. no.27. pp. 7–17.
- [2] Matvienko V.A., Perlash A.I., Ogarkov S.O., Prohorov A.G., Spynu V.E. Kompleksno-mehanizirovannaja tehnologija vypolnenija vysokonagruzhennyh boltovyh soedinenij jelementov konstrukcij planera samoleta SSJ [The is complex-mechanised process engineering of realisation high-loading bolt joints of elements of designs of airframe SSJ] Tehnologicheskie sistemy, 2009. no.49. pp. 89–94.
- [3] Krivov G.A., Matvienko V.A., Girsh R.I., Reznikov V.A., Strizhius V.E., Grebennikov A.G. Obespechenie resursa vysokonagruzhennyh jelementov konstrukcii planera s funkcional'nymi otverstijami [Resource security vysokonagruzhennyh configuration items of a glider with functional orifices] Tehnologicheskie sistemy, 2009. no.49. pp. 94–100.
- [4] Matvienko V.A., Girsh R.I., Strizhius V.E., Pastushenko V.N., Tolstoj S.A., Shitoha E.G., Eremin M.V. Mehanizirovannye tehnologii i instrument dlja vypolnenija zaklepochnyh i bolt-zaklepochnyh soedinenij jelementov konstrukcij planera samoletov semejstva SSJ [The mechanised process engineerings and the tool for realisation rivet and a bolt-zaklepochnyh of junctions of elements of designs of a glider of airplanes of set SSJ] Tehnologicheskie sistemy, 2009. no.49. pp.100–107.
- [5] Matvienko V.A., Rud'ko A.N., Bratuhin V.A. Krepezhnye sistemy dlja soedinenij jelementov konstrukcij planera samoletov novogo pokolenija [Fastening systems for junctions of elements of designs of a glider of airplanes of new generation] Tehnologicheskie sistemy, 2009. no.49. pp. 107–112.
- [6] Raschet na prochnost' detalej mashin: Spravochnik [Calculation on durability of details of machines: Reference book] I.A. Birger, B.F. Shorr, G.B. Iosilevich. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 702 p.
- [7] Birger I.A., Iosilevich G.B. Rez'bovyje i flancevyje soedinenija [Carving and butt Joints] Moscow: Mashinostroenie, 1990. 365 p.
- [8] Iosilevich G.B. Koncentracija naprjazhenij i deformacij v detaljah mashin. [Stress concentration and strains in details of machines] Moscow: Mashinostroenie, 1981. 224 p.
- [9] Prochnost', ustojchivost', kolebanija. Tom 2: Spravochnik [Durability, stability, oscillations. Volume 2: Reference book] Pod obshh. red. I.A. Birgera, Ja.G. Panovko. Moscow: Mashinostroenie, 1962. 463 p.
- [10] Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells. Second Edition. New York Toronto London: McGRAW-HILL BGGK COMPANY, Inc., 1959.
- [11] Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 452 p.
- [12] Grebennikov A.G. Metodologija integrirovannogo proektirovanija i modelirovanija sbornyh samoletnyh konstrukcij [Methodology of the integrated projection and simulation of modular aircraft constructions] Kharkov: Nac. ajerokosm. un-t "HAI", 2006. 532 p.
- [13] Serensen S.V., Zajcev G.P. Nesushhaja sposobnost' tonkostennyh konstrukcij iz armirovannyh plastikov s defektami [Bearing ability of thin-walled constructions from reinforced plastics with imperfections] Kyiv: Nauk. dumka, 1982. 296 p.



- [14] Handbook of composites: Edited by George Lubin. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982.
- [15] Astanin V.V., Globa O.V., Shevchenko O.A. Ekspluatacijni poskodzhennja elementiv konstrukcij lital'nih aparativ iz kompozicijnih materialiv i metodi ih remontu [Operational damages of elements of designs of flight vehicles from composite materials and methods of their repair] Tehnologicheskie sistemy, 2011. no.4(57). pp. 64–68.
- [16] Marochnik stalej i splavov. 2-e izd, dop. i ispr. / A.S. Zubchenko, M.M. Koloskov, Ju.V. Kashirskij i dr. Pod obshej red. A.S. Zubchenko. [Book steels and alloys] Moscow: Mashinostroenie, 2003. 784 p.
- [17] Titanovyje splavy v mashinostroenii // B.B. Chechulin, S.S. Ushkov, I.N. Razuvaeva i dr. [Titanium alloys in engineering] Leningrad: Mashinostroenie, 1977. 248 p.
- [18] Bolton U. Newnes Engineering Materials. Pocket Book. Reed Educational & Professional Publishing Ltd, 2000.
- [19] Baker A.A. Composite Materials for Aircraft Structures. Eurospan, 2004. 400 p.
- [20] Gromashev A.G., Tarasov Ju.M. Kompleksnaja avtomatizacija sozdanija integral'nyh konstrukcij iz polimernyh kompozicijnyh materialov [Complex automation of creation of integrated designs from polymeric composite materials] Tehnologicheskie sistemy, 2007. no.2(38). pp. 5–11.
- [21] Vasil'ev V.V. Mehanika konstrukcij iz kompozitnyh materialov. [Mechanics of designs from composite materials] Moscow: Mashinostroenie, 1988. 269 p.
- [22] Mezhslojnye jeffekty v kompozitnyh materialah Pod red. N. Pejgano / Per. s angl. [Interlaminar effects in composite materials] Moscow: Mir, 1993. 346 p.
- [23] Milton G.W. The Theory of Composites. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 719 p.
- [24] Zarazovskij M.M. Deformuvannja i micnist' sharuvatih vugleplastikov pri kimnatnij ta kriogennih temperaturah. Avtoref... kand. tehn. nauk. [Deformation and strength stratified carbon composite at room and cryogenic temperatures] Kyiv: IPMic. NANU, 2009. 20 p.
- [25] Pogosjan M.A., Savelevskih E.P., Strelec D.Y., Kornev A.V. Otechestvennye superkomp'juternye tehnologii v aviacionnoj promyshlennosti [Domestic super-kompjuternye process engineering in the air industry] Tehnologicheskie sistemy, 2012. no.3(60). pp.33–43.
- [26] Johan Ekh, Joakim Schun, Gunnar Melin. Secondary bending in multi fastener, composite-to-aluminium single shear lap joints. Composites. Part B: Engineering, 2005. 36. pp. 195–208.
- [27] Gordon Kelly. Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. Composite Structures, 2006. no.72. pp.119-129.
- [28] Shimkovich D.G. Raschet konstrukcij v MSC.visualNastran for Windows [Calculation of designs in MSC.visualNastran for Windows] Moscow: DMK Press, 2004. 704 p. (A series "Designing").
- [29] Rychkov S.P. MSC.visualNASTRAN dlja Windows [MSC.visualNASTRAN for Windows] Moscow: NT Press, 2004. 552 p. (Designing and modeling).
- [30] Rudakov K.N. UGS Femap 9.3. Geometricheskoe i konechno-jelementnoe modelirovanie konstrukcij [UGS Femap 9.3. Geometrical and finite-element modeling of designs] Kyiv: KPI, 2009. 296 p.
- [31] Rudakov K.N. FEMAP 10.2.0. Geometricheskoe i konechno-jelementnoe modelirovanie konstrukcij [FEMAP 10.2.0. Geometrical and finite-element modeling of designs] Kyiv: KPI, 2011. 317 p.