

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, НАГРУЖЕННЫХ РАСТЯЖЕНИЕМ-СЖАТИЕМ И МЕСТНЫМ ИЗГИБОМ

Известно, что значительное количество элементов авиационных конструкций наряду с усилиями растяжения-сжатия нагружены местным изгибом, возникновение которого обусловлено особенностью формы рассматриваемой зоны конструкции [1]. К примеру, таковыми зонами являются продольные стыки внахлест обшивок фюзеляжа, поперечные стыки панелей крыла, ступенчатое изменение толщины полотна монолитных панелей и др.

Существует ряд методик, описывающих различные способы вычисления напряжений от изгиба при наличии эксцентриситета передачи нагрузки в элементах конструкции. К примеру, сотрудниками ЦАГИ при расчете соединений листов одинаковой толщины внахлест напряжения от изгиба приняты равными номинальным напряжениям в листе [2]. Такой подход позволяет оценить напряжения лишь на удалении от отверстия, в то время как экспериментально установлено, что наибольших значений напряжения от изгиба достигают в зоне концентратора напряжений [3].

В работах ученых Делфтского технического университета (Нидерланды) [3, 4] заклепочное соединение рассмотрено как упругая балка. При этом изгибающий момент вычислен относительно нейтральной оси, изменяющей свое положение в зоне нахлеста листов в зависимости от податливости крепежных элементов, которая учтена с помощью фиктивных модулей упругости участков листов между крепежными элементами. Авторами отмечено, что данный подход позволяет лишь качественно оценить распределение напряжений от изгиба в соединении, в то время как количественные характеристики требуют более детальных исследований локального деформирования материала.

В цикле работ [5, 6] рассмотрено влияние конструктивно-технологических факторов на общее напряженно-деформированное состояние (НДС) заклепочных и болтовых соединений. Авторами выполнен большой спектр расчетных и экспериментальных исследований, однако анализу распределения напряжений в зоне максимальной концентрации и их влиянию на долговечность уделено недостаточно внимания.

В настоящее время методы расчета долговечности соединений, в основном, сформированы на основе методов расчета по номинальным напряжениям. В работах [7, 8, 9] предложен метод расчета на усталость элементов авиационных конструкций, синтезирующий наиболее удачные положения современных отечественных и зарубежных

подходов к расчету на усталость по номинальным напряжениям. Методика расчета долговечности соединений, предложенная в [8], включает в себя эмпирические коэффициенты, учитывающие ряд конструктивно-технологических особенностей, в то же время влияние местных напряжений от изгиба в работе не упомянуто. В рамках расчета по локальному НДС следует отметить работу [10], в которой рассмотрено влияние локальных напряжений от изгиба на долговечность конструкции с геометрическими концентраторами напряжений. Установлено, что местные напряжения от изгиба могут достигать 15...20% осевых напряжений от растяжения-сжатия, что, в свою очередь, приводит к отличию по долговечности до 2 раз.

Соответственно, большое значение для повышения точности расчета имеет правильный учет местных напряжений от изгиба. Поэтому данная работа и посвящена анализу напряжений в зоне наибольшей концентрации и оценке локальных напряжений от изгиба в этой области. Все заклепочные и болтовые соединения могут быть условно разделены на две группы: слабонагруженные и высоконагруженные. В связи с этим в работе рассмотрены две расчетные схемы: элемент конструкции с заполненным и нагруженным отверстиями. Анализ локального НДС выполнен с помощью метода конечных элементов (МКЭ) на основе результатов решения задачи о контактном взаимодействии деталей стыка в геометрически нелинейной упругой постановке.

Анализ локального НДС в зоне максимальной концентрации напряжений в элементах конструкции с заполненным отверстием

Расчет напряженного состояния и определение напряжений от изгиба выполнены на основе модели образца для усталостных испытаний с выборкой материала в рабочей зоне и центральным круговым отверстием, в которое установлен болт без зазора и натяга (см. рисунок 1). Материал образца – алюминиевый сплав Д16АТ, болта – сталь 30ХГСА.

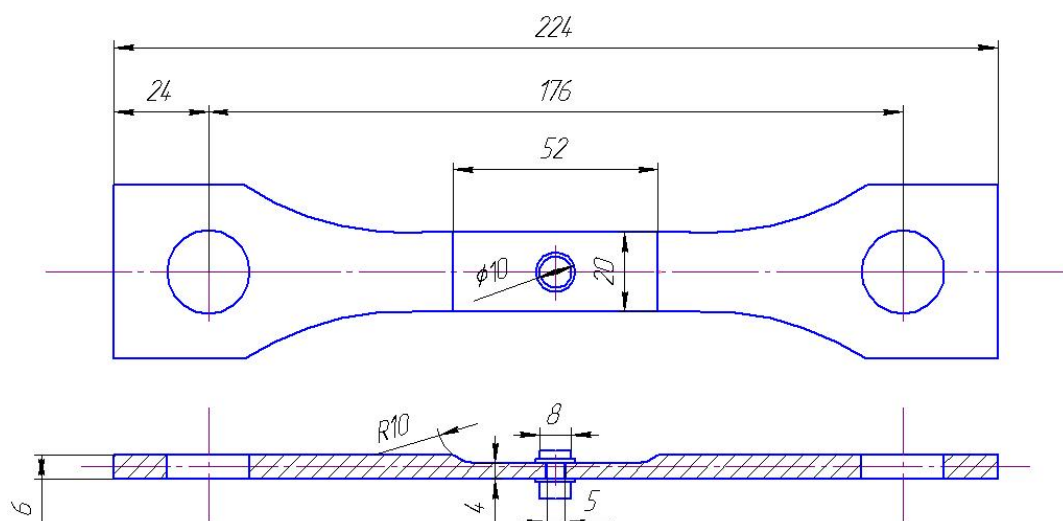


Рисунок 1 – Геометрические размеры образца

Величины нагрузки, прикладываемой к образцу, подобраны таким образом, чтобы номинальные напряжения растяжения-сжатия в рабочей зоне соответствовали таковым в типовом полете. Глубина выборки принята такой, чтобы в рабочей зоне реализовывались номинальные напряжения от изгиба, соответствующие возникающим в реальной конструкции. Трехмерная твердотельная модель показана на рисунке 2. Ввиду симметрии образца относительно продольной оси рассмотрена половина модели.

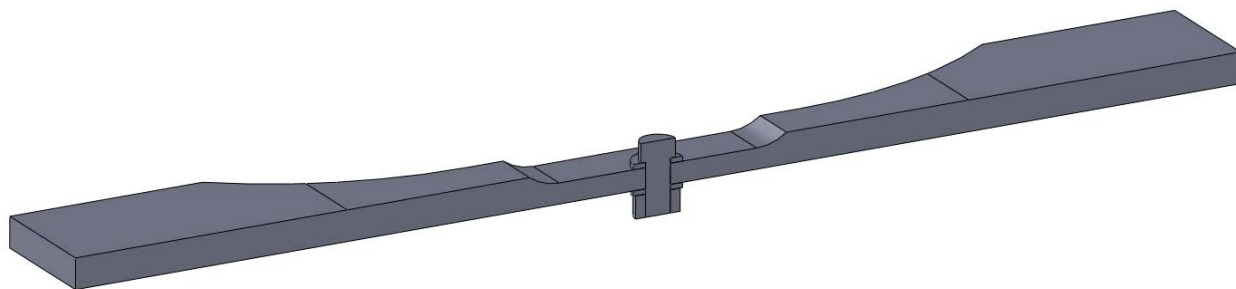


Рисунок 2 – Трехмерная модель образца с выборкой и заполненным отверстием

Размеры конечных элементов в зоне отверстия подобраны по результатам анализа сходимости результатов расчета напряжений. Следует отметить, что в зоне концентратора напряжений обеспечена регулярная сетка элементов, что крайне важно для равномерного распределения контактных давлений (см. рисунок 3).

Контактные пары созданы по всем соприкасающимся плоскостям с учетом коэффициента трения для пары материалов алюминий - сталь, равного 0,15 [11] (см. рисунок 4).

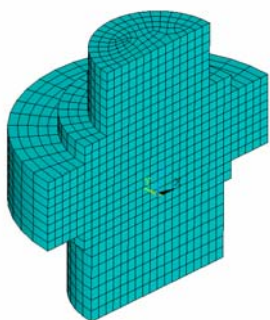


Рисунок 3 – Исследуемая локальная зона модели

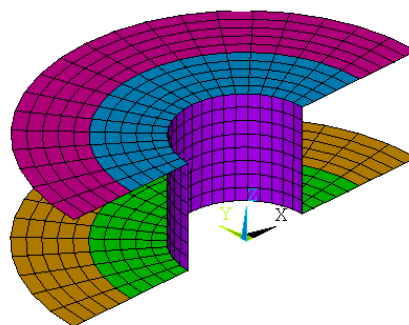


Рисунок 4 – Контактные пары модели

Условия закрепления и нагружения соответствуют таковым для образца в захватах испытательной машины: по грани С модель жестко закреплена, на поверхности А, В наложен запрет на вертикальные перемещения. К плоскости рассечения модели применено условие

симметрии. Расчеты выполнены для диапазона номинальных напряжений растяжения-сжатия в сечении «брутто» рабочей зоны - 250...250 МПа (см. рисунок 5)

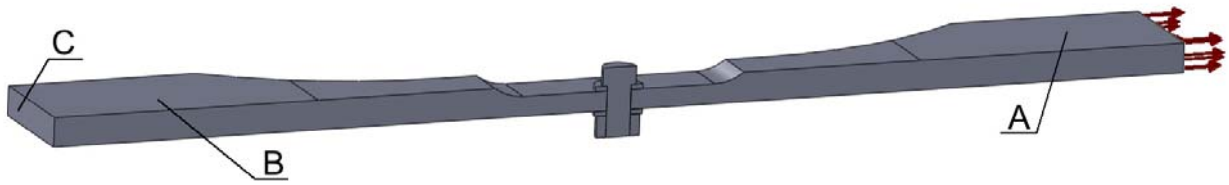


Рисунок 5 – Граничные условия, принятые для расчета с помощью МКЭ: поверхности А, В – ограничение на вертикальные перемещения, грань С – жесткое закрепление

Пример распределения напряжений в модели образце показан на рисунке 6.

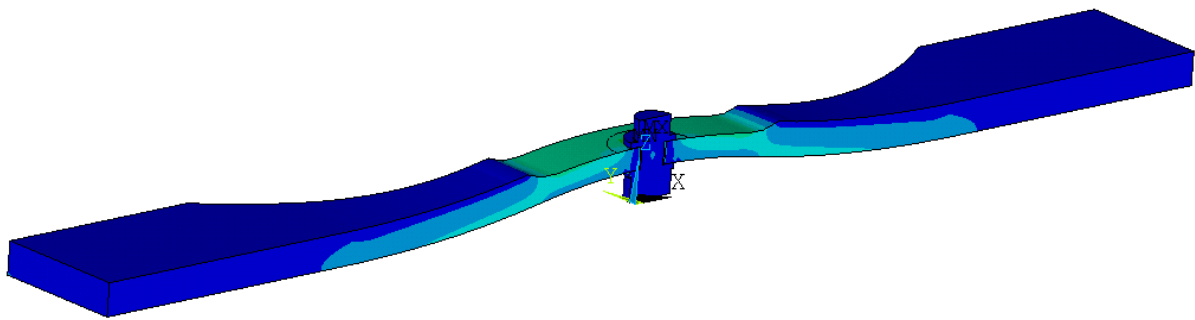


Рисунок 6 – НДС образца с заполненным отверстием (масштаб 20:1)

В области материала вокруг заполненного отверстия реализуется сложное напряженное состояние, для оценки которого использованы эквивалентные напряжения, найденные по энергетической теории прочности (теория Хуберта – Мизеса).

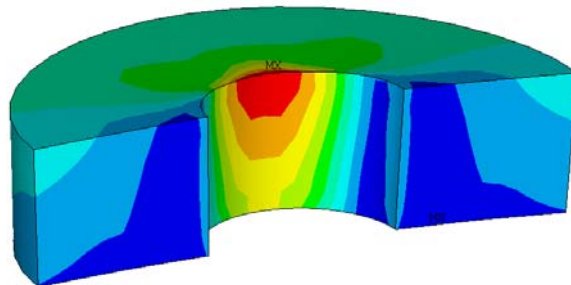


Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений по высоте отверстия

Важной особенностью полученного НДС в концентраторе напряжений является его существенная неравномерность по высоте

отверстия, обусловленная местным изгибом (см. рисунок 7), оценить который можно с помощью коэффициента изгиба [12, 13]:

$$K_u = \frac{\sigma_u}{\sigma_o};$$

$$\sigma_u = \frac{\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{н}}}{2}; \quad \sigma_o = \frac{\sigma_{\text{в}} + \sigma_{\text{н}}}{2},$$

где σ_u – локальные напряжения от изгиба;

σ_o – осевые напряжения от растяжения-сжатия;

$\sigma_{\text{в}}, \sigma_{\text{н}}$ – максимальные напряжения на верхней и нижней поверхностях рабочей зоны.

Установлено, что в рассмотренном диапазоне нагрузок напряжения от изгиба составляют 16...65 % от осевых (см. рисунок 8).

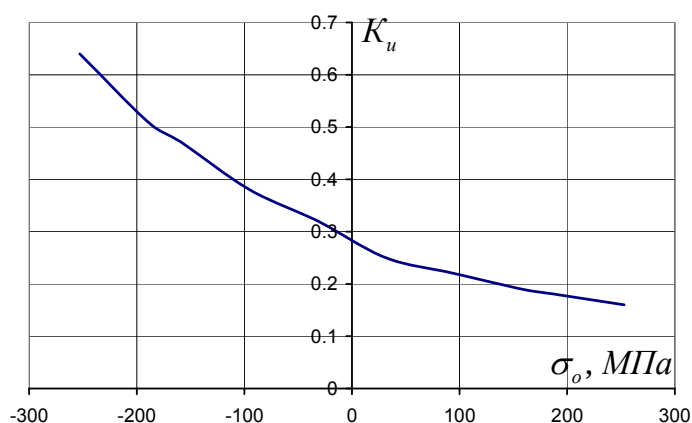


Рисунок 8 – Зависимость K_u от номинальных осевых напряжений

Максимальные напряжения в отверстии реализуются в результате совместного действия усилий от растяжения-сжатия и местного изгиба. Это не позволяет оценить нагруженность таких зон с помощью общепринятого теоретического коэффициента концентрации напряжений, так как он не учитывает знак прикладываемой нагрузки и зависимость изгибных напряжений от нагрузки [10, 14]. Поэтому использован обобщенный коэффициент концентрации напряжений [10], учитывающий изменение максимальных локальных напряжений в зависимости от знака и величины прикладываемого усилия:

$$K_{Ta} = \frac{\sigma^y}{\sigma_H^o},$$

где σ^y – напряжения в концентраторе при упругом деформировании, полученные по результатам расчета МКЭ;

σ_H^o – номинальные осевые напряжения.

В ходе исследований установлено, что значения этого коэффициента для заполненного отверстия, так же, как и для геометрического концентратора напряжений, изменяются нелинейно в зависимости от номинальных осевых напряжений (см. рисунок 9).

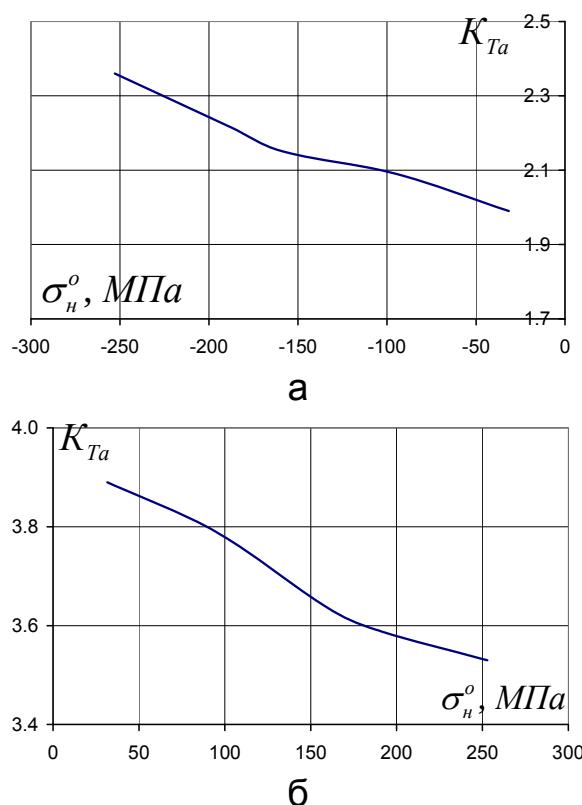


Рисунок 9 – Зависимость K_{Ta} от номинальных осевых напряжений:
а – сжатие; б – растяжение

Как уже отмечено в [14], величина коэффициента концентрации напряжений существенно изменяется при переходе от растяжения к сжатию. В диапазоне рассмотренных номинальных осевых напряжений сжатия изменение значения K_{Ta} может достигать 18%, в случае действия растягивающих усилий – 10%.

Следовательно, учет напряжений от изгиба при расчете долговечности подобных элементов конструкции с заполненным отверстием по локальному НДС может привести к ошибке. В то же время расчет долговечности такого рода соединений в предположении равенства напряжений от изгиба напряжениям от растяжения [2] приведет к существенному занижению расчетной долговечности.

Анализ локального НДС в болтовых соединениях листов одинаковой толщины внахлест. Расчет напряженного состояния и определение напряжений от изгиба выполнены на основе моделей однорядного и трехрядных болтовых соединений, в которых установлен

болт без зазора и натяга (см. рисунок 10). Материал листа – алюминиевый сплав Д16АТ, болта – сталь 30ХГСА.

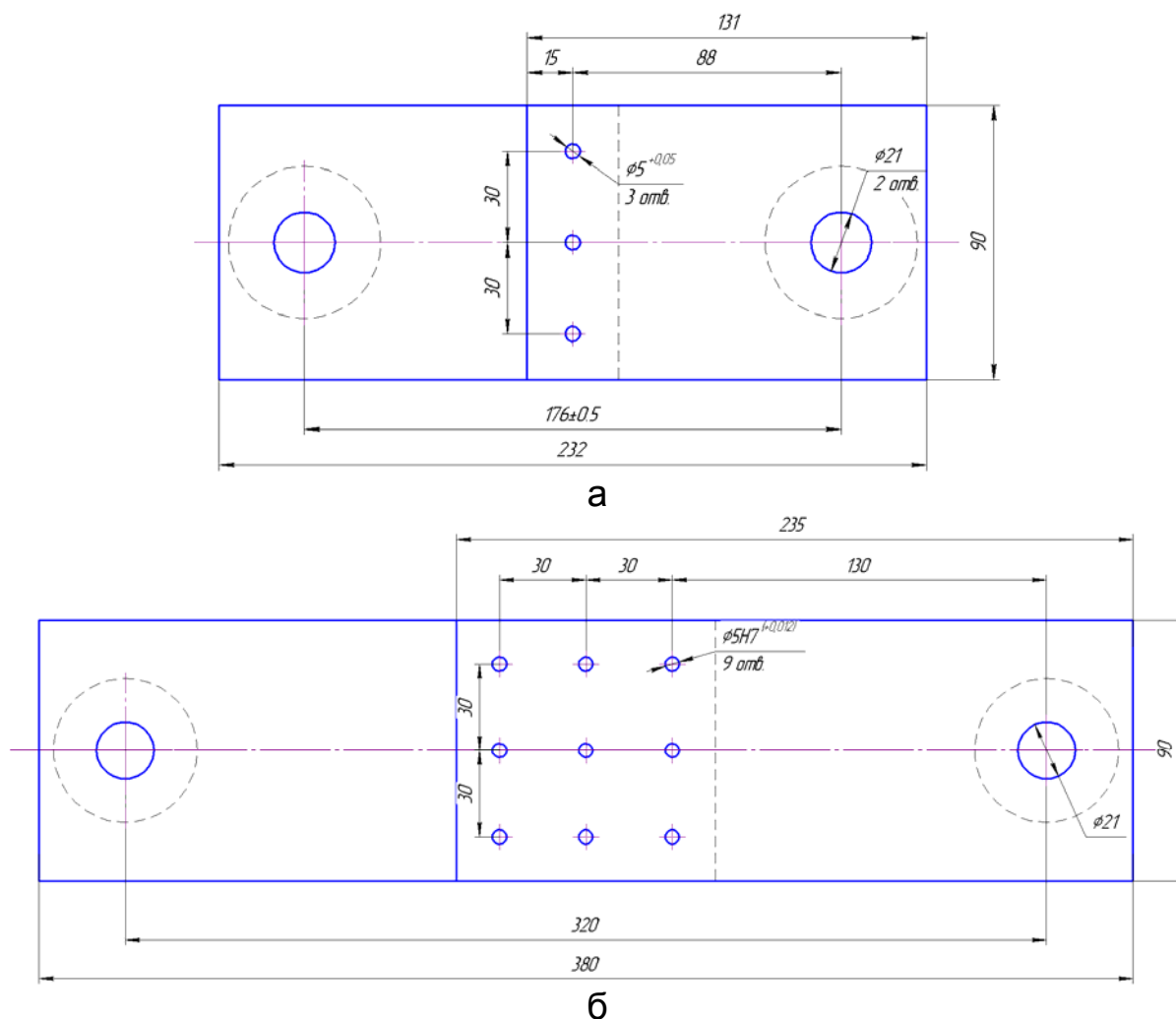


Рисунок 10 – Геометрические размеры образцов болтовых соединений:
а – однорядное соединение; б – трехрядное соединение (шаг – 30 мм)

Как уже было отмечено, величину напряжений от изгиба зачастую определяют, рассматривая модель соединения без учета контактной передачи нагрузки, имитируя крепежные элементы абсолютно жесткими или податливыми связями [3, 12]. Однако, решая задачу в такой постановке, можно оценить только величину номинальных напряжений от изгиба. Очевидно, что детальный анализ НДС непосредственно в зоне наибольшей концентрации напряжений требует решения задачи о контактом взаимодействии элементов. Сопоставление таких способов моделирования показано на примере распределения напряжений вдоль листа от края заделки до кромки отверстия первого ряда для трехрядного соединения с шагом 30мм (см. рисунок 11). Сплошная линия соответствует модели с абсолютно жесткими связями, пунктирная – модели с учетом подробного моделирования контактной передачи

нагрузки. Начало отсчета оси абсцисс на графике совпадает с кромкой отверстия первого ряда.

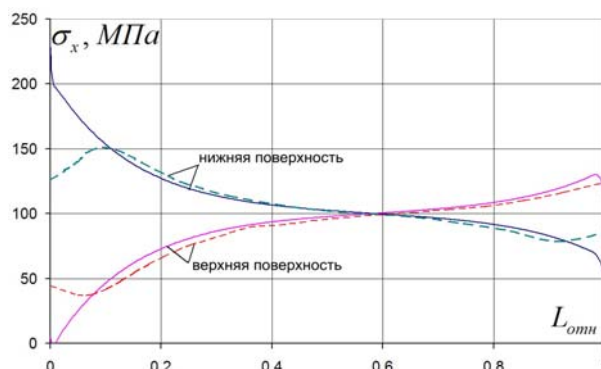


Рисунок 11 – Распределение напряжений вдоль листа в плоской и объемной моделях

Установлено, что на удалении от первого ряда болтов распределение напряжений в разных моделях практически совпадает, а по мере приближения к отверстию отличие достигает 1,8 раз. Такое понижение напряжений в объемной модели объясняется повышенной жесткостью зоны нахлеста листов в модели, которая не учитывает податливость каждого крепежного элемента при распределении нагрузки в соединении и влияние размеров шайбы на деформирование материала у отверстия. Таким образом, использование модели с абсолютно жесткими связями приводит к существенному завышения номинальных напряжений от изгиба.

Определение местных напряжений от изгиба в соединениях выполнено на примере однорядного и трехрядных болтовых соединений с различным шагом установки крепежных элементов (20, 30, 45 мм). Условия закрепления и нагружения соответствуют таковым для фиксации соединения в захватах испытательной машины: по грани С модель жестко закреплена, на поверхности А, В наложен запрет на вертикальные перемещения (см. рисунок 12).

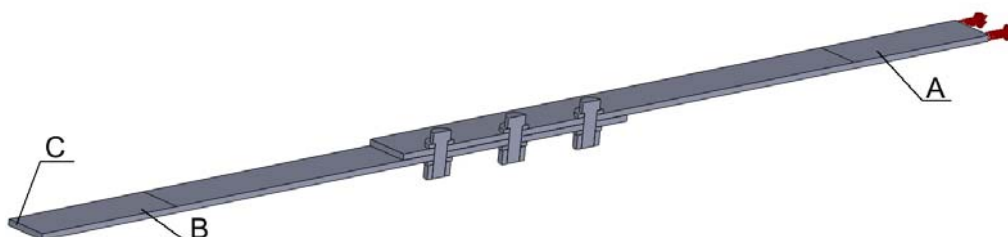


Рисунок 12 – Граничные условия, принятые для расчета соединений: поверхности А, В – ограничение на вертикальные перемещения, грань С – жесткое закрепление

К плоскости рассечения модели применено условие симметрии. Расчеты выполнены для диапазона номинальных напряжений в сечении «брутто» 15...100 МПа (см. рисунок 12).

КЭ сетка и контактные пары модели показаны на примере трехрядного болтового соединения (см. рисунок 13).

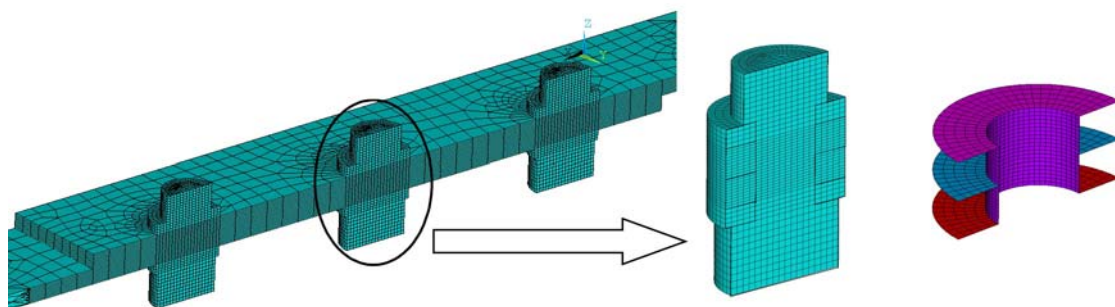


Рисунок 13 – Зона нахлеста листов конечноэлементной модели болтового соединения

Пример распределения эквивалентных напряжений в соединениях показан на рисунке 14.

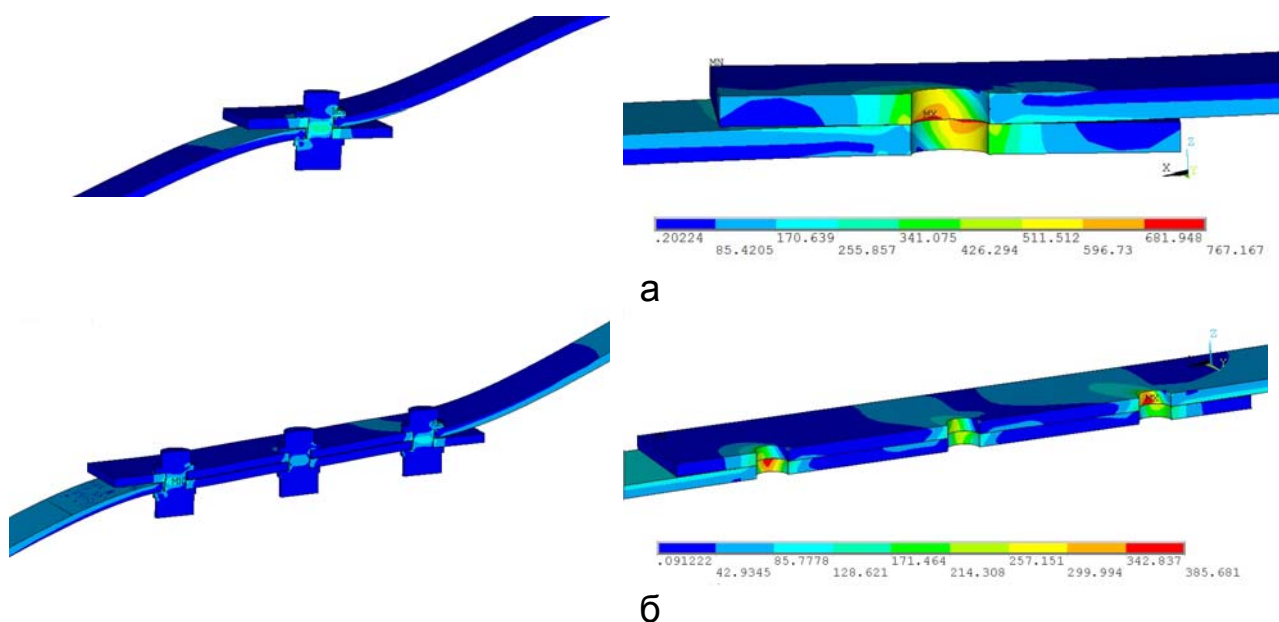


Рисунок 14 – НДС болтовых соединений листов внахлест (эквивалентные напряжения): а – однорядное соединение ($\sigma_H^0 = 100 \text{ МПа}$); б – трехрядное соединение ($\sigma_H^0 = 80 \text{ МПа}$)

Коэффициенты изгиба вычислены для всего диапазона рассмотренных нагрузок. В случае однорядного болтового соединения отмечено незначительное изменение напряжений от изгиба в зависимости от прикладываемой нагрузки (см. рисунок 15, а).

В трехрядных соединениях напряжения от изгиба нелинейно зависят от осевых номинальных напряжений, причем с увеличением нагрузки их значения уменьшаются. Кроме того, на величину K_u влияет шаг установки крепежных элементов. Однако увеличение расстояния между рядами болтов приводит к незначительным изменениям коэффициента изгиба (см. рисунок 15, б).

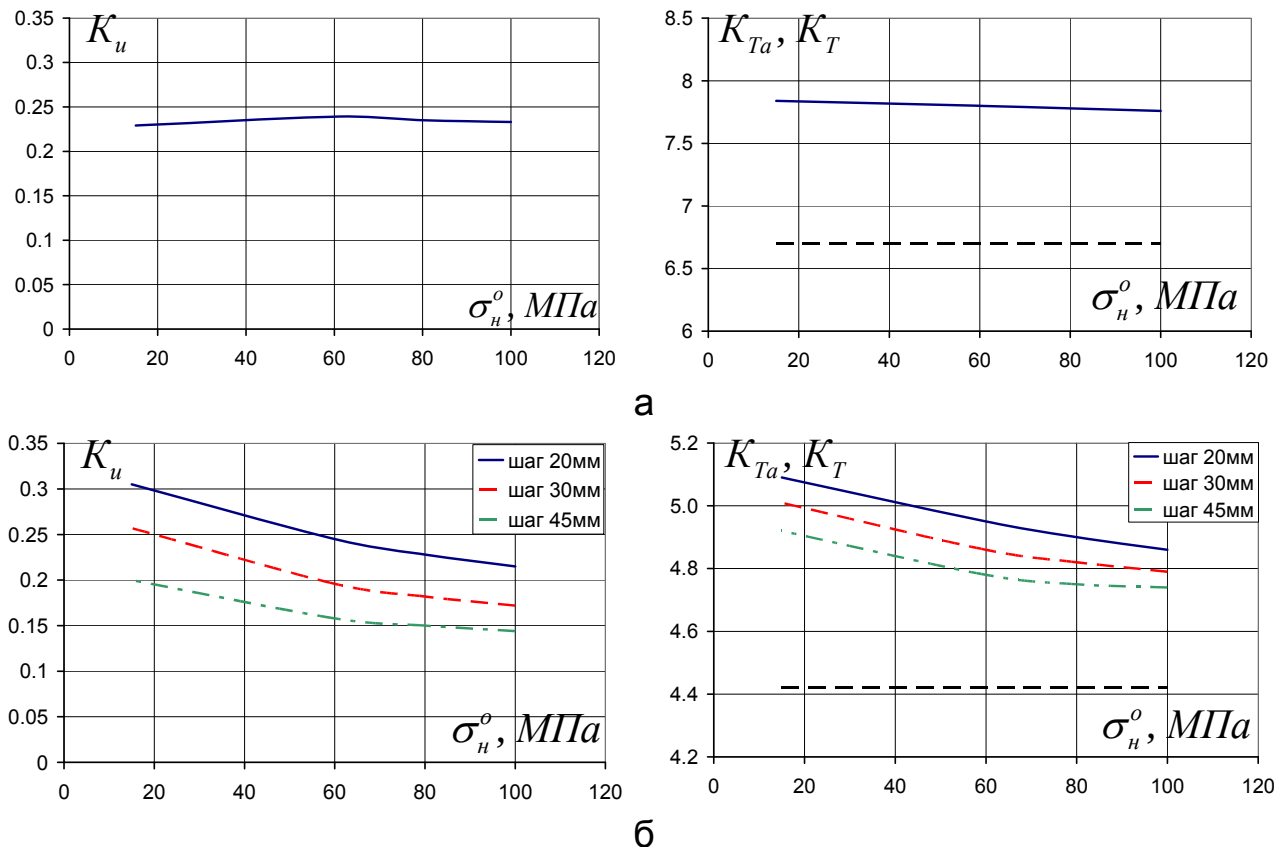


Рисунок 15 – Зависимость K_u и K_{Ta} от осевых номинальных напряжений: а – однорядное соединение; б – трехрядные соединения

Выводы

1. Установлено, что напряжения от изгиба в элементах конструкции с заполненным отверстием нелинейно зависят от номинальных осевых напряжений. В диапазоне рассмотренных номинальных осевых напряжений сжатия изменение значения K_{Ta} может достигать 18%, в случае действия растягивающих усилий – 10%.

2. В трехрядных болтовых соединениях коэффициент изгиба изменяется как от прикладываемой нагрузки (в среднем на 40%), так и шага установки крепежных элементов (около 50%).

3. Расчет номинальных напряжений от изгиба с использованием модели с абсолютно жесткими связями приводит к значительному их завышению по сравнению с моделью, учитывающей контактное взаимодействие.

Список использованных источников

1. Сопротивление усталости элементов конструкций [Текст] / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебеньев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
2. Стебеньев, В.Н. Методика оценки сопротивления усталости соединений [Текст] / В.Н. Стебеньев // Ученые записки ЦАГИ. – Вып. 2117. – 1981. – С. 42 – 54.
3. Muller, R. An experimental and analytical investigation on the fatigue behaviour of fuselage riveted lap joints: doctoral thesis; defence of thesis 1995 [Text] / Muller Richard Paul Gerhard. – Delft University of Technology, 1995. – 516 p.
4. Shijve, J. Riveted lap joints with a staggered thickness in the overlap of the joint. Calculations of secondary bending. Doc. B2-06-02, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands.
5. Гребеников, А.Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций [Текст]: моногр. / А.Г. Гребеников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2006. – 532 с.
6. Гребеников, А.Г. Оценка изгибных напряжений в накладках односрезного соединения [Текст] / А.Г. Гребеников, В.Н. Клименко, С.В. Трубаев // Вопросы механики деформируемого твердого тела. – 1982. – Вып. 3. – С. 78 – 85.
7. Стрижиус В.Е. Модифицированное расчетное уравнение усталости элементов авиационных конструкций [Текст] / В.Е. Стрижиус // Научный Вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика, прочность, поддержание летной годности ВС. – М., 2007. – № 119. – С. 141 – 148.
8. Стрижиус, В.Е. Методика расчетов на усталость элементов авиационных конструкций с использованием рейтингов усталости [Текст] / В.Е. Стрижиус // Научный Вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика, прочность, поддержание летной годности ВС. – М., 2008. – № 130. – С. 47 – 58.
9. Стрижиус В.Е. Методы расчетов на усталость элементов конструкций с геометрическими концентраторами [Текст] / В.Е. Стрижиус // Научный Вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика, прочность, поддержание летной годности ВС. – М., 2009. – № 141. – С. 76 – 83.
10. Третьяков, А.С. Метод расчета долговечности элементов авиационных конструкций, нагруженных растяжением-сжатием и изгибом: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02; защищена 22.10.2010; утв. 20.05.2011 / Третьяков Алексей Сергеевич. – Х., 2010. – 155 с.
11. Авиационный технический справочник [Текст] / Эксплуатация, обслуживание, ремонт, надежность; под общ. ред. В.Г. Александрова. – М., 1975. – 412 с.

12. Халилаева, Р.Ю. Исследование напряжений от изгиба в двух- и трехрядных соединениях внахлест и их влияние на долговечность [Текст] / Р.Ю. Халилаева // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2009. – Вып. 2 (58). – С. 32 – 38.

13. Третьяков, А.С. Анализ местных напряжений от изгиба, возникающих в монолитных панелях крыльев пассажирских и транспортных самолетов [Текст] / А.С. Третьяков, Р.Ю. Решетникова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2012. – Вып. 2 (70). — С. 96 – 106.

14. Гонтаренко, А.П. Методика расчета долговечности болтовых и заклепочных соединений элементов авиационных конструкций по локальному напряженно-деформированному состоянию: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.03; защищена 03.11.2000; утв. 05.04.2001 / Гонтаренко Андрей Петрович. – Х., 2000. – 128 с.

Поступила в редакцию 03.09.2012.

*Рецензент: канд. техн. наук, доц. А.В. Кондратьев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*