

Анализ упругих градиентов напряжений в плоской постановке в болтовых соединениях из Д16Т

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Выполнен анализ упругих градиентов напряжений в болтовых соединениях с помощью метода конечных элементов. Установлено существенное отличие между градиентами напряжений в полосе со свободным отверстием и в полосе с заполненным либо нагруженным отверстиями. На основе полученных результатов проведен расчет упругопластических градиентов напряжений по аналитической зависимости.

Ключевые слова: градиент напряжений, локальное напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, характерный размер зерна металла, диаграмма деформирования.

Введение

Ресурс конструкции планера самолёта ограничен долговечностью зон конструктивных нерегулярностей (соединения, отверстия, усиливающие накладки, галтельные переходы и т.д.). В работе [1] отмечено, что 91% усталостных разрушений в сборных панелях крыла приходится на зоны вблизи отверстий. Использование монолитных панелей в крыле приводит к уменьшению относительного числа разрушений по отверстиям до 61%, но все равно не решает полностью проблем, связанных с усталостной долговечностью. Наибольшее число разрушений в панелях приходится на отверстия под крепежные элементы в поперечных стыках и продольных швах. Такие высоконагруженные соединения в основном выполняют с помощью болтов.

В настоящее время расчёт долговечности соединений проводят по номинальным напряжениям [2–4] либо по локальному напряженно-деформированному состоянию (НДС) [5–8].

Метод расчета долговечности конструкций по номинальным напряжениям основан на использовании понятия эффективного коэффициента концентрации напряжений. Вследствие своей простоты метод нашел широкое применение в инженерной практике. Однако используемый в качестве исходных данных эффективный коэффициент концентрации напряжений необходимо получать экспериментально в испытаниях образцов натуральных конструкций или применяя предварительно установленные эмпирические соотношения.

Особенностью метода расчета долговечности по локальному НДС является то, что в качестве исходных данных используют параметры материала, а не конструктивного элемента. Такой подход позволяет на этапе проектирования избежать значительной части дополнительных усталостных испытаний различных вариантов исполнения конструктивных элементов для уточнения значений эффективных коэффициентов концентрации напряжений. Расчет долговечности по локальному НДС предусматривает выделение наиболее нагруженной зоны конструкции, в которой начнется развитие усталостной трещины, и определение для нее параметров локального цикла деформирования.

На сегодняшний день предполагают, что развитие макротрещины начинается не на контуре концентратора напряжений, а на некотором расстоянии от него при достижении микротрещинами своего критического размера.

Р. Питерсон [9], исходя из возможности наличия остаточных напряжений на поверхности тел, высказал гипотезу о том, что долговечность определяется напряжениями не на поверхности, а на некотором расстоянии от нее. Р.Б. Хэйвуд [9] предположил, что усталостные трещины возникают именно на поверхности, но увеличение их числа становится важным, если их длина превышает некоторый размер Δ . Этот характерный размер часто связывают со средним размером зерна в сплаве. Из сказанного выше следует, что для расчета долговечности по локальному НДС необходимо проводить построение локального цикла деформирования материала не в точке наибольшей концентрации напряжений на контуре отверстия, а на расстоянии характерного размера Δ от нее. Таким образом, оценивать напряженное состояние в наиболее опасной точке следует с учетом градиента напряжений, который характеризует скорость изменения напряжений по мере увеличения расстояния от поверхности концентратора.

Одни из первых исследований влияния градиентов напряжений на долговечность элементов конструкции проведены в работах Х. Хертеля [10], Р.Б. Хэйвуда [9] и др. В общем машиностроении прогнозирование долговечности проводят с использованием эффективных коэффициентов концентрации напряжений. В ГОСТ 25.504-82, регламентирующем методы расчёта характеристик сопротивления усталости, предложена зависимость для расчета эффективного коэффициента концентрации напряжений для геометрических концентраторов с учётом упругих градиентов напряжений [11]. При этом оценка нагруженности соединений с учётом градиента напряжений не проведена.

Позже в работе [12] с помощью метода конечных элементов (МКЭ) определены градиенты упругих и упругопластических напряжений на контуре ряда отверстий (свободного, заполненного и нагруженного) с конкретной геометрией. Однако расчёт проведен с использованием только диаграммы монотонного деформирования, тогда как для авиационных конструкций характерны повторно-переменные (циклические) нагрузки.

В работе [13] предложена аналитическая методика расчёта упругопластических градиентов напряжений для геометрических концентраторов напряжений. Для их расчёта использована формула Нейбера в предположении о том, что данное соотношение справедливо и в окрестности точки с наибольшей концентрацией напряжений. Для расчета упругопластических градиентов напряжений необходимо знать величины упругих градиентов напряжений.

Целью данной работы является сравнение и оценка величины градиентов напряжений на контуре отверстий нагруженных болтовых соединений, определенных как в упругой постановке, так и с учетом диаграммы циклического деформирования материала. Важно также определить область применимости градиентов напряжений, вычисленных в упругой и упругопластической постановках.

1 Определение упругих градиентов напряжений

Задача решена в плоской постановке, т.е. не рассмотрены градиенты напряжений по толщине листа. Величины напряжений, использованные при вычислении градиентов напряжений, получены с помощью МКЭ путем решения контактной задачи в геометрически нелинейной постановке. Расчеты выполнены для диапазона номинальных напряжений в сечении «брутто» 20...160 МПа.

Объект исследования – полоса с нагруженным отверстием. Такая модель имитирует высоконагруженные поперечные стыки обшивки с поясами нервюр, а также поперечные соединения обшивок между собой. Рассмотренные диаметры крепежных элементов ($d = 4...12$ мм) являются наиболее распространенными в авиационных конструкциях. Принято типовое отношение ширины полосы к диаметру отверстия, равное шести.

Материал полосы с отверстием – алюминиевый сплав Д16Т, материал крепежного элемента – сталь 30ХГСА. Граничные условия и конечно-элементная (КЭ) сетка в зоне наибольшей концентрации напряжений показаны на рис. 1.

Величина усилия P_0 , передаваемого крепежным элементом, определена предварительно в зависимости от параметров соединения. Вычисление усилий проведено на отдельных моделях соединений, в которых крепежные элементы моделируются специальными связями с учётом реальной податливости крепежных элементов.

Контактная задача решена с учетом коэффициента трения, равного 0,15, что соответствует граничному виду трения для пары материалов алюминиевый сплав – сталь [14]. Посадка крепежного элемента в отверстие смоделирована без зазора и натяга.

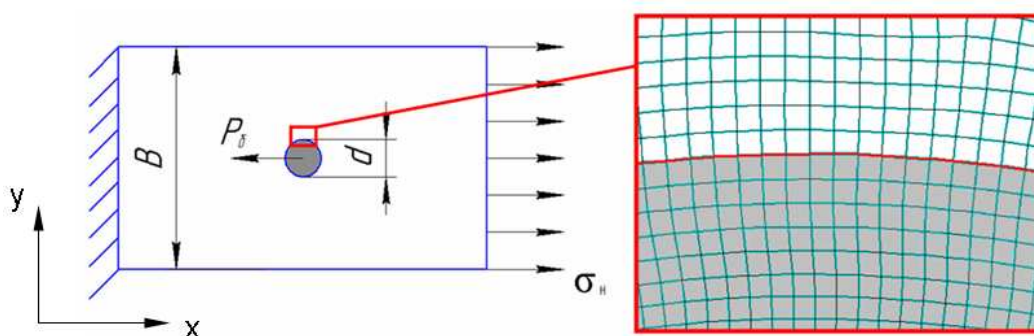


Рис. 1. Полоса с нагруженным отверстием

При создании КЭ модели использованы восьмиузловые элементы. Сходимость решения проверена путём последовательного уменьшения размера конечных элементов до такого значения, при котором отличие по градиентам напряжений от предыдущего варианта разбиения сетки не превышает 3%.

Относительный градиент первого главного напряжения определяют по формуле [15]

$$\bar{G} = \frac{1}{\sigma_{max}} \cdot \left(\frac{\partial \sigma}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где σ_{max} – максимальное напряжение в вершине концентратора.

Характерный размер Δ , определяющий зону зарождения трещины, принят равным 0,12 мм в соответствии с [13]. Необходимо отметить, что согласно ОСТ1 90070-92 «Листы обшивочные из алюминиевых сплавов. Технические условия» максимальный размер зерна для листов Д16Т не должен превышать 0,1...0,15 мм. Таким образом, принятый размер Δ близок к размеру зерна, что косвенно подтверждает предположение о том, что этот размер соответствует среднему размеру зерна материала.

В таком случае формулу (1) можно записать как отношение приращения напряжения между соседними точками к расстоянию между этими точками Δ и к максимальному напряжению:

$$\bar{G} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{\Delta}}{\Delta \cdot \sigma_{max}},$$

где σ_{Δ} – напряжение на характерном расстоянии Δ от вершины концентратора.

Для проверки достоверности расчетов градиента напряжений на основе МКЭ выполнено сравнение полученных относительных упругих градиентов с градиентами, вычисленными согласно ГОСТ 25.504-82 [11]. Сопоставление выполнено только для свободного отверстия ввиду отсутствия в стандарте расчетных зависимостей для силовых концентраторов напряжений. Установлено, что отличие по градиентам напряжений не превышает 12%, что соответствует изменению напряжения на характерном расстоянии Δ всего на 1,5%.

Проведен анализ величин упругих градиентов напряжений для нагруженных отверстий в зависимости от диаметра крепежного элемента и типа соединения. На рис. 2 показаны зависимости относительных упругих градиентов от диаметра отверстия для одно-, двух- и трёхрядного соединений, а также заполненного (имитация слабонагруженных соединений) и свободного отверстий.

Установлено, что величина градиентов напряжений для заполненного и нагруженного отверстий значительно (более двух раз) превосходит таковую для свободного. Следует также отметить, что величины градиентов напряжений для одно-, двух- и трёхрядных соединений и заполненного отверстия достаточно близки.

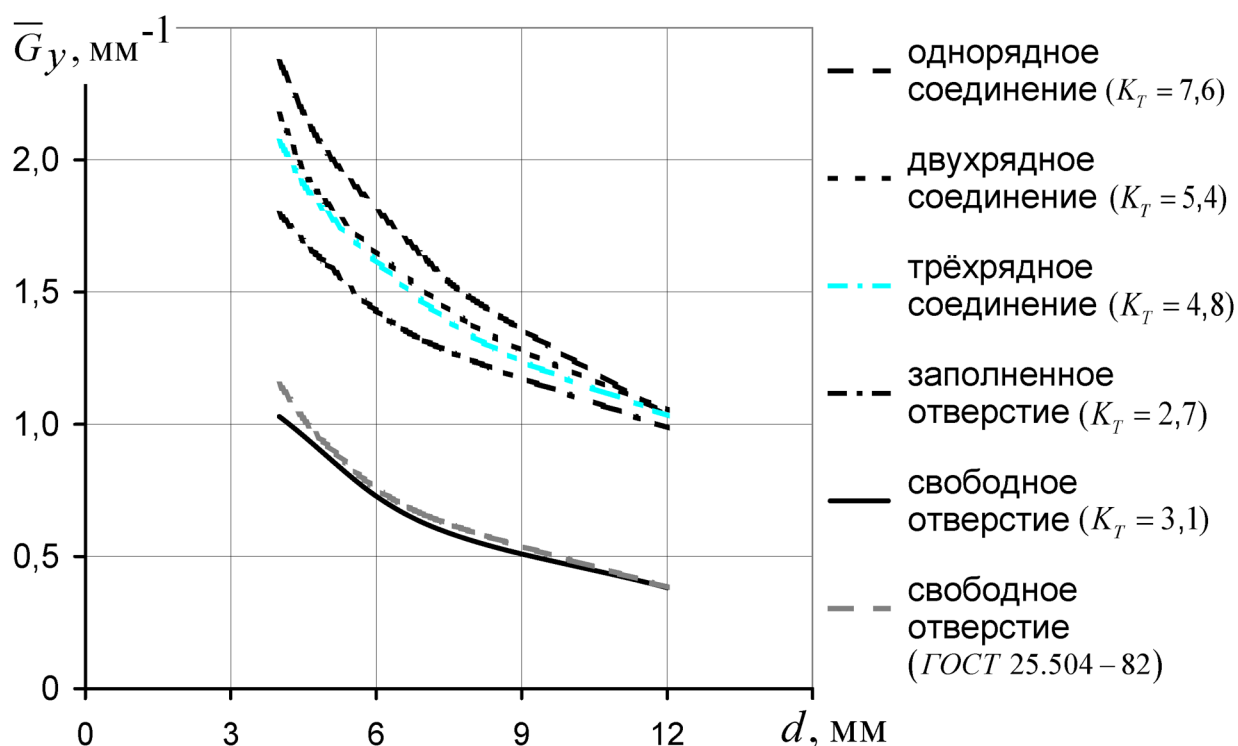


Рис. 2. Зависимость относительных упругих градиентов напряжений от диаметра отверстия

2 Анализ полученных результатов и сопоставление с градиентами, вычисленными аналитически

На основе полученных с помощью МКЭ упругих градиентов напряжений для нагруженного отверстия ($d = 5$ мм) вычислены упругопластические градиенты, метод расчета которых предложен в работе [13]:

$$\bar{G} = \frac{2 \cdot K_T \cdot \Pi_n}{\Pi' \cdot \sigma_a} \cdot \bar{G}_y, \quad (2)$$

где K_T – теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$\Pi_n = \frac{\sigma_{ан}^2}{E} + \sigma_{ан} \cdot \left(\frac{\sigma_{ан}}{K_m} \right)^{\frac{1}{m}}$ – потенциальная энергия деформирования при номинальном напряжении;

$\sigma_{ан}$ – амплитуда номинальных напряжений;

$\Pi' = \frac{2 \cdot \sigma_a}{E} + \frac{1+m}{m} \cdot \left(\frac{\sigma_a}{K_m} \right)^{\frac{1}{m}}$ – производная потенциальной энергии деформирования в концентраторе напряжений по напряжениям;

σ_a – амплитуда локальных упругопластических напряжений, полученных при решении уравнения Нейбера;

E – модуль упругости материала;

K_m, m – параметры материала, численные значения которых для сплава Д16Т

приведены в [16, 17];

\bar{G}_y – относительный упругий градиент напряжений.

Сопоставление относительных градиентов напряжений, определённых с помощью МКЭ и методом расчёта по формуле (2), показано на рис. 3.

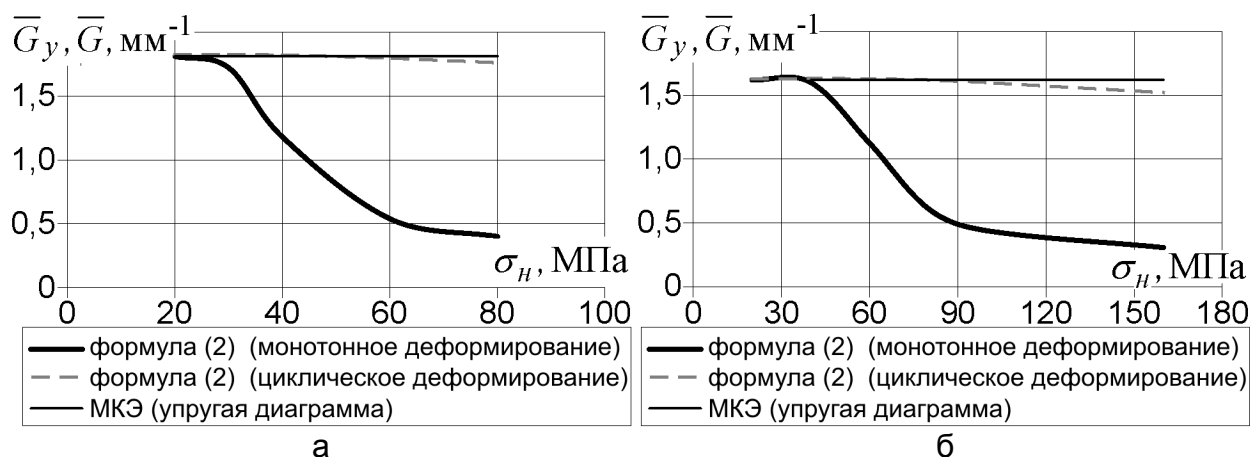


Рис. 3. Сопоставление расчётов градиентов напряжений с помощью МКЭ и по аналитической зависимости (2)

а – трёхрядное соединение; б – однорядное соединение

Следует отметить, что упругопластические градиенты напряжений при монотонном и циклическом деформировании материала существенно отличаются как количественно, так и качественно. Это объясняется тем, что алюминиевый сплав Д16Т, как и В95Т, интенсивно упрочняется в процессе наработки, поэтому величина реализующихся при этом пластических деформаций намного меньше, чем при монотонном нагружении.

Выводы

В работе проведен анализ величины упругих градиентов напряжений на контуре отверстий нагруженных болтовых соединений. Учет градиентов напряжений необходим для повышения точности расчёта долговечности по локальному напряжённо-деформированному состоянию. Рассмотрен силовой концентратор напряжений – нагруженное отверстие, который является типовым для авиационных конструкций.

В результате анализа напряжённо-деформированного состояния нагруженного, заполненного и свободного отверстий установлено, что для силового концентратора вне зависимости от его абсолютного размера величина градиента напряжений существенно больше, чем для свободного отверстия. В случае малых диаметров отверстий (4...5 мм) отличие максимального локального напряжения от напряжения в зоне зарождения усталостной трещины может достигать 35%, что, в свою очередь, приведет к ошибке при расчете долговечности более 3 раз.

В соединениях при задании монотонной диаграммы деформирования значения градиентов малы, если локальные напряжения превышают предел текучести материала. Поэтому их учет не приведет к существенному изменению расчетной долговечности.

Градиенты упругопластических напряжений при использовании циклической модели деформирования материала близки к упругим. Отличие между ними не превышает 7%, что соответствует 1,5% отличию по напряжениям на расстоянии характерного размера Δ . Поэтому в инженерных расчетах долговечности многорядных болтовых соединений без существенной погрешности могут быть использованы упругие градиенты напряжений.

Все полученные выводы могут быть распространены и на сплав В95Т, так как он обладает еще меньшей пластичностью при циклическом деформировании, чем сплав Д16Т.

Список литературы

1. Галкин, С.И. Классификация локальных зон элементов конструктивных нерегулярностей нижней поверхности центроплана и крыла пассажирских самолетов [Текст] / С.И. Галкин, В.Д. Ремнев, В.М. Син // Местная прочность конструктивных нерегулярностей планера самолета: сб. работ, Труды ЦАГИ. – Вып. 2018. – М.: Изд. отдел ЦАГИ, 1979. – С. 21 – 34.
2. Соппротивление усталости элементов конструкций [Текст] / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
3. 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.

4. 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.

5. Фомичев, П.А. Прогнозирование долговечности по локальному напряженно-деформируемому состоянию. Сообщение 1. Определение напряжений и деформаций в надрезе при циклическом упругопластическом деформировании [Текст] / П.А. Фомичев, В.В. Звягинцев // Проблемы прочности: междунар. научно-техн. журн.. – 2000. – №3. – С. 37 – 45.

6. Фомичев, П.А. Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформируемому состоянию. Сообщение 2. Определение параметра, характеризующего долговечность тел с концентраторами напряжений [Текст] / П.А. Фомичев // Проблемы прочности: международный научно-технический журнал. – 2000. – №3. – С. 46 – 55.

7. Dowling, N.E. A review of fatigue life prediction method / N.E. Dowling. – SAE Techn. Pap. Ser. 1987 №871966. - p.p. 1 – 22.

8. Dowling, N.E., Brose W.R., Wilson W.K. Notched member fatigue life predictions by the local strain approach / N.E. Dowling, W.R. Brose, W.K. Wilson // Fatigue under Complex Loading, Analyses and Experiments. Ed.R.M. Wetzel. SAE Inc. Warrendale, PA. 1977, p. 55-84.

9. Хэйвуд Р.Б. Проектирование с учётом усталости [Текст] / Р.Б. Хэйвуд. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.

10. Hertel, H. Ermudungsfestigkeit der Konstruktionen / H. Hertel // Springer – Verlag. Berlin – Heidelberg – NY, 1960. – 660 s.

11. ГОСТ 25.504-82. Расчёты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. – введ. 18.05.1982. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 21 с.

12. Гонтаренко, А.П. Методика расчета долговечности болтовых и заклепочных соединений по локальному напряженно-деформированному состоянию: дис. канд. техн. наук: 05.07.02 Гонтаренко А.П.– Х., 2000. – 130 с.

13. Фомичев, П.А. Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщение 3. Учёт градиентов напряжений и деформаций [Текст] / П.А. Фомичев // Проблемы прочности. – К.: Наук. думка. – 2000. – Вып. 4.0. – С. 12 – 21.

14. Авиационный технический справочник [Текст] / Эксплуатация, обслуживание, ремонт, надежность; под общ. ред. В.Г. Александрова. – М., 1975. – 412 с.

15. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность [Текст] / справ. / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.

16. Третьяков, А.С. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при асимметричном мягком регулярном нагружении [Текст] / А.С. Третьяков, А.А. Черных // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (59). Х., 2009. – С. 44 – 52.

17. Черных, А.А. Выбор уравнения для аппроксимации экспериментальных диаграмм деформирования [Текст] / А.А. Черных // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (53). – Х.: ХАИ, 2008. – С. 113 – 120.

Рецензент: кандидат технических наук Гуменный А.М. Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Поступила в редакцию 07.02.2013

Аналіз пружних градієнтів напружень у плоскій постановці у болтових з'єднаннях з Д16Т

Виконано аналіз пружних градієнтів напружень у болтових з'єднаннях за допомогою методу скінченних елементів. Встановлено суттєву відмінність між градієнтами напружень у полосі з вільним отвором і в полосі із заповненим або навантаженим отворами. На основі отриманих результатів проведено розрахунок пружнопластичних градієнтів напружень за аналітичною залежністю.

Ключові слова: градієнт напружень, локальний напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, характерний розмір зерна металу, діаграма деформування.

Analysis of elastic stress gradients in planar formulation in bolted joints made of D16T

The analysis of elastic stress gradients in the bolted joints is made using the finite element method. The significant difference between stress gradients in the strip with the free hole and the strip with the filled or loaded holes is founded. The elastoplastic stress gradients are calculated by analytical method and using the previously obtained results.

Keywords: stress gradient, local stress-strain state, finite element method, characteristic size of metal grain, deformation diagram.