

Метод определения характеристик локального НДС стенки экспериментального образца отсека лонжерона в зоне кругового выреза

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

Усталостная долговечность лонжеронов крыла самолетов во многом предопределяет ресурс планера самолета. В конструкции современных самолетов транспортной категории применяются сборные лонжероны, которые представляют собой, как правило, сборные тонкостенные балки, состоящие из поясов, стенки и подкрепляющих стоек. Соединения в лонжеронах выполняют заклепочными или болтовыми. В стенках предусматриваются отверстия и вырезы под трубопроводы топливной системы, тяги системы управления, кронштейны навески механизации. Ослабления, вызванные отверстиями и вырезами, компенсируют с помощью монолитных утолщений и присоединения к стенкам усиливающих накладок.

Согласно классификации, представленной в работе [2], отверстия и вырезы в стенках лонжерона образуют отдельную группу среди конструктивных нерегулярностей зон вероятного усталостного разрушения конструкции лонжеронов. Отверстия влияют на долговечность и входят в состав основных концентраторов напряжения в силовых элементах конструкции лонжеронов.

Для прогнозирования долговечности стенок в зоне отверстий и вырезов в процессе проектирования целесообразно проводить определение характеристик локального НДС стенок отсеков лонжеронов.

Для выявления зон усталостного разрушения, проверки существующих и создания новых методов проводили исследования экспериментальных образцов конструкций лонжеронов [6]. Благодаря этим исследованиям решались методические задачи определения зон вероятного зарождения трещин, направления их распространения. Исследование усталостной долговечности конструкции стенок лонжеронов основывалось на испытаниях образцов экспериментальных отсеков лонжеронов при циклическом нагружении. Они характеризовались большими трудоемкостью, энергозатратами, финансовыми и временными затратами [1, 6, 7].

Экспериментальные образцы отсеков [6] выполнены по схеме двухконсольной балки. По краям каждой консоли были приложены распределенные по высоте стенки силы, эквивалентные нагрузке на лонжерон. Каждая консоль отсеков - это отдельный, в определенной мере независимый, отсек лонжерона. Оба отсека в нагруженном образце уравнивают друг друга при симметричном нагружении и образуют в середине образца жесткую заделку для каждого отсека. Схема нагружения отсека лонжерона с неусиленными круговыми вырезами [6] показана на рис. 1.

На рис. 2 представлена конструкция образца отсека лонжерона без вырезов в стенке, на рис. 3 - конструкция образца отсека лонжерона с круговыми неусиленными вырезами в стенке.

Целью испытаний было определение: усталостных характеристик в зонах круговых вырезов в стенках экспериментальных отсеков; зон вероятного зарождения усталостной трещины на контуре кругового выреза; направления распростра-

нения трещин, усталостной долговечности отсеков до момента визуального обнаружения усталостной трещины в зависимости от положения круговых вырезов. Испытания образцов отсеков лонжеронов проведены на гидравлическом пульсаторе МУП-50 при циклических нагрузках [6].

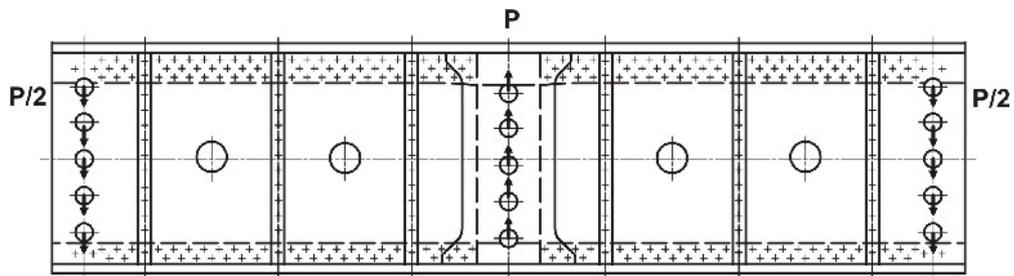


Рис. 1. Схема нагружения отсека лонжерона с неусиленными круговыми вырезами

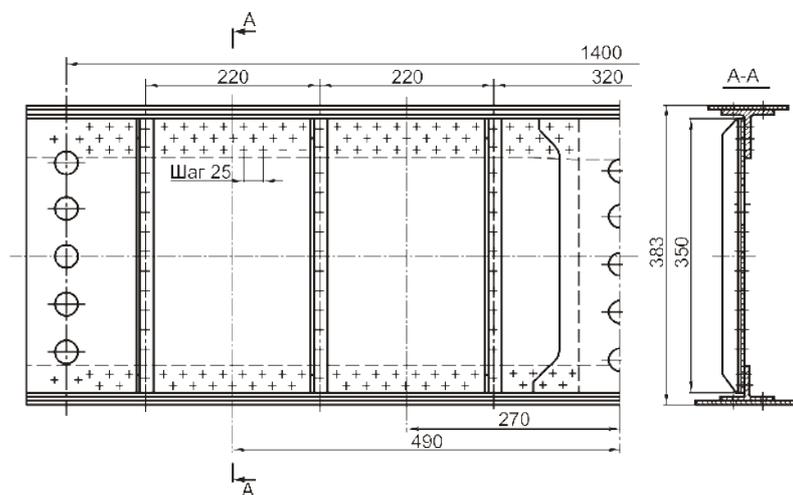


Рис. 2. Конструкция образца отсека лонжерона без вырезов в стенке

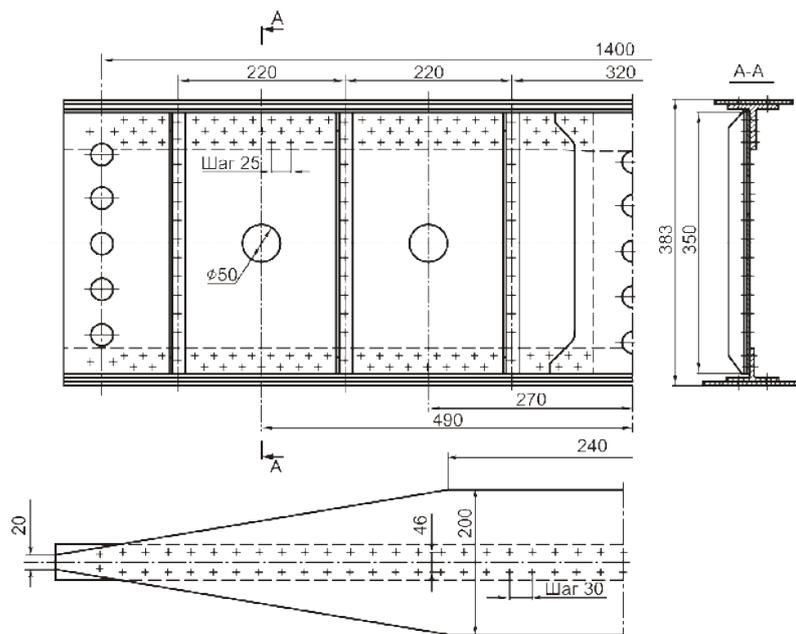


Рис. 3. Конструкция образца отсека лонжерона с круговыми неусиленными вырезами в стенке

Пояса образцов отсеков лонжеронов состояли из профиля таврового сечения Д16Т Пр-315-9 и накладок из листа Д16АТ л.5. Накладки соединены болтами диаметром 6 мм ОСТ 1.31180-80 с полками профиля. Стенка изготовлена механическим фрезерованием: по контуру из листа Д16АТВ л.5. Продольные оси стенок и накладок отсека лонжерона совпадают с направлением волокон проката листов. Подкрепляющие стойки изготовлены механическим фрезерованием из профиля Д16Т-Пр111-3 и имеют постоянную площадь сечения. При механической обработке всех входящих деталей достигнута шероховатость поверхности R_{z40} . Все входящие детали анодированы "НХ" по серийной технологии в соответствии с ОСТ 1.90055-85.

Проектировочный расчет регулярной зоны отсеков выполнен из условий статической прочности по методике, представленной в работе [4]. Учитывая опыт проектирования лонжеронов, замечено, что продольные соединения стенки с поясами, нагруженными на растяжение, являются одной из вероятных зон возникновения усталостных разрушений. Вследствие этого соединение стенки с нагружаемым на растяжение поясом выполнено трехрядным, а стенки с нагружаемым на сжатие – двухрядным. Соединение поясов со стенкой выполнено в шахматном порядке расположения заклепок. Установлены заклепки диаметром 5 мм ОСТ 1.34040-79, а в зоне соединения, подкрепляющей стойки с поясом, - диаметром 6 мм. Для многократного использования сжатого пояса соединение стенки и подкрепляющих стоек с ним выполнено болтами ОСТ 1.31180-80 с номинальным диаметром, равным диаметру заклепок, так как зона этого соединения не критична по усталостной долговечности отсека. В зонах захвата отсека в пульсаторе по краям отсека приклеены дополнительные усиливающие титановые накладки 350x50x3 со стороны стенки и 350x55x10 со стороны ребер поясов [6].

На рис. 4 показана очередность появления усталостных трещин в зоне круговых вырезов в стенке экспериментального отсека лонжерона.

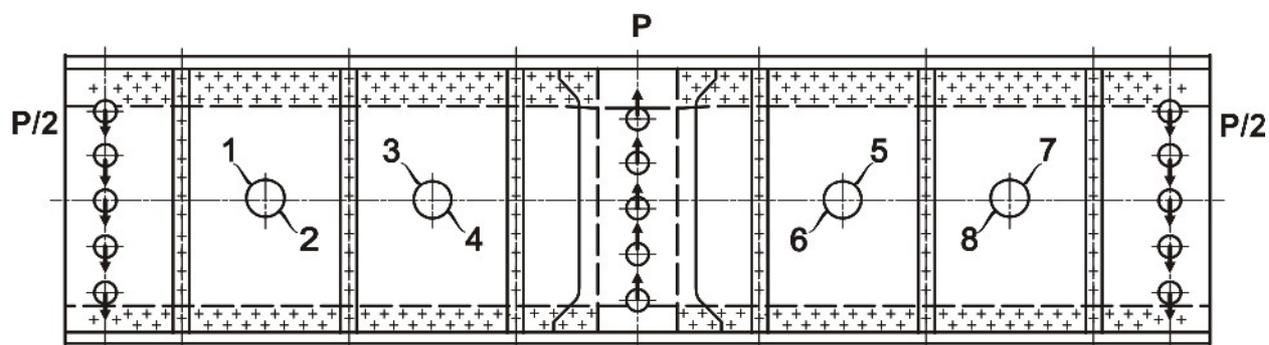


Рис. 4. Очередность появления усталостных трещин в зоне круговых вырезов в стенке экспериментального отсека лонжерона.

По полученным результатам испытаний экспериментального образца была построена зависимость влияния максимальных касательных напряжений "брутто" в стенке на долговечность в зоне выреза. На рис. 5 представлено влияние максимальных касательных напряжений "брутто" в стенке на долговечность в зоне выреза при различных диаметрах выреза, полученных в работе [6].

Для определения значений касательных напряжений была применена зависимость, основанная на теории тонкостенных балок:

$$\tau = Q / h_{y\delta} (\delta_{\tilde{n}} + F_{\tilde{n}\delta} / t),$$

где: Q - действующая перерезывающая сила;
 $h_{y\delta}$ - расстояние между центрами тяжести поясов;
 $\delta_{\bar{n}}$ - толщина стенки;
 $F_{\bar{n}\delta}$ - площадь поперечного сечения подкрепляющей стойки;
 t - шаг между стойками.

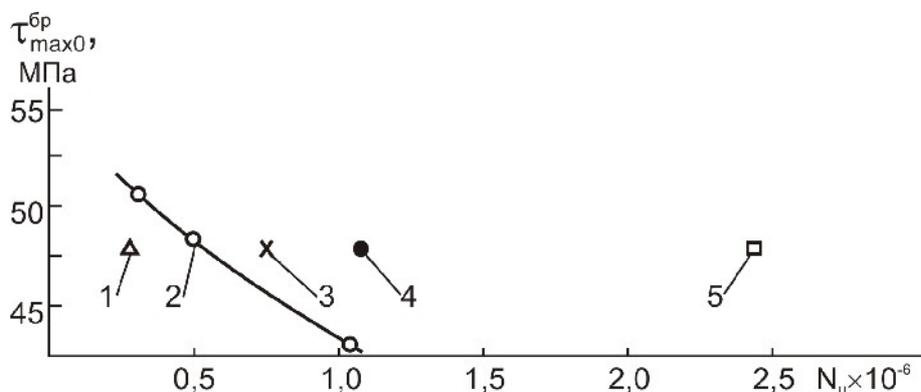


Рис. 5. Влияние максимальных касательных напряжений "брутто" в стенке на долговечность в зоне выреза при различных диаметрах выреза, полученных в работе [6]:
 1 - $\varnothing=100$ мм; 2 - $\varnothing=50$ мм; 3 - $\varnothing=24$ мм; 4 - $\varnothing=14$ мм; 5 - $\varnothing=6$ мм

Данная зависимость учитывает условие равенства внешних и внутренних усилий, а также влияния подкрепляющих стоек путем увеличения толщины стенки за счет площади и расположения подкрепляющих стоек.

Для определения значений и характера распределения действующих касательных напряжений ранее применялась зависимость, в соответствии с гипотезой плоских сечений,

$$\tau = QS / J_x b ,$$

где: Q - действующая перерезывающая сила;
 S - статический момент отбрасываемой части;
 J_x - момент инерции сечения;
 b - ширина сечения.

Эта зависимость учитывала геометрические особенности сечения, его инерционные и статические моментные характеристики.

Однако представленные выше зависимости являются упрощенными допущениями своих теорий и не учитывают многих факторов, влияющих на действующие касательные напряжения.

Целью данной статьи является разработка метода исследования характеристик локального напряженно-деформируемого состояния стенки экспериментального отсека лонжерона в зоне кругового выреза с помощью МКЭ, реализованного в САЕ - системе ANSYS.

Учитывая разработанный ранее метод определения характеристик общего НДС отъемной части крыла с помощью системы ANSYS [3], разработан метод исследования характеристик локального НДС стенки отсека лонжерона в зоне кругового выреза с помощью модуля системы ANSYS.

Метод включает в себя следующие этапы:

1. Определение характеристик общего НДС в элементах отъемной части крыла.
2. Выделение исследуемого отсека лонжерона.
3. Определение характера распределения напряжений, действующих по границам выделенного отсека лонжерона при различных расчетных случаях.
4. Импортирование модели исследуемого отсека лонжерона без выреза в САЕ-систему.
5. Разработка расчетной схемы исследуемого отсека, задание нагрузок, действующих в рассматриваемом отсеке лонжерона.
6. Задание характеристик деформирования применяемых конструкционных материалов для элементов конструкции исследуемого отсека.
7. Создание конечно-элементной модели исследуемого отсека лонжерона без выреза в стенке с помощью САЕ-системы.
8. Расчет и анализ характеристик локального НДС исследуемого отсека лонжерона без выреза в стенке с помощью САЕ-системы.
9. Параметрическое моделирование кругового выреза в зоне его расположения в исследуемом отсеке лонжерона.
10. Импортирование исследуемого отсека лонжерона с вырезом в стенке в САЕ-систему.
11. Разработка расчетной схемы исследуемого отсека, задание нагрузок, действующих в рассматриваемом отсеке лонжерона с вырезом в стенке.
12. Создание конечно-элементной модели исследуемого отсека лонжерона с вырезом в стенке с помощью САЕ-системы.
13. Расчет характеристик локального НДС исследуемого отсека лонжерона с вырезом в стенке с помощью САЕ-системы.
14. Сравнительный анализ полученных характеристик локального НДС исследуемых отсеков лонжерона без выреза и с вырезом в стенке: главных напряжений, деформаций; касательных напряжений; удельной энергии деформирования; коэффициентов концентрации напряжений и деформаций.
15. Исследование влияния конструктивных параметров в зоне кругового выреза на характеристики локального НДС.

В данной работе определяли характеристики локального НДС описанных экспериментальных отсеков лонжеронов в зоне круговых вырезов с помощью САЕ-системы ANSYS. Исследование проводили для одной консоли в силу симметричности нагружения и распределения напряжений, действующих в образцах.

Аналитические эталоны исследуемых образцов отсеков лонжерона без выреза и с вырезом создаем в интегрированной компьютерной системе CAD/CAM/CAE CATIA V5R16. Эти эталоны создаются параметрическими согласно геометрическим размерам, описанным выше. В зоне соединений конструкция образцов отсеков лонжеронов омоноличивается. На рис. 6 представлены аналитические эталоны образцов отсека лонжерона без выреза и с круговыми неусиленными вырезами в стенке.

После создания аналитических эталонов импортируем их в систему ANSYS Workbench с помощью расширения для импортирования *.stp. В данной работе было выбрано это расширение, так как файлы с ним точно переносят геометриче-

ские параметры импортируемых объектов всех типов (твердые тела, поверхности, кривые, точки и т. д.) в другие системы.

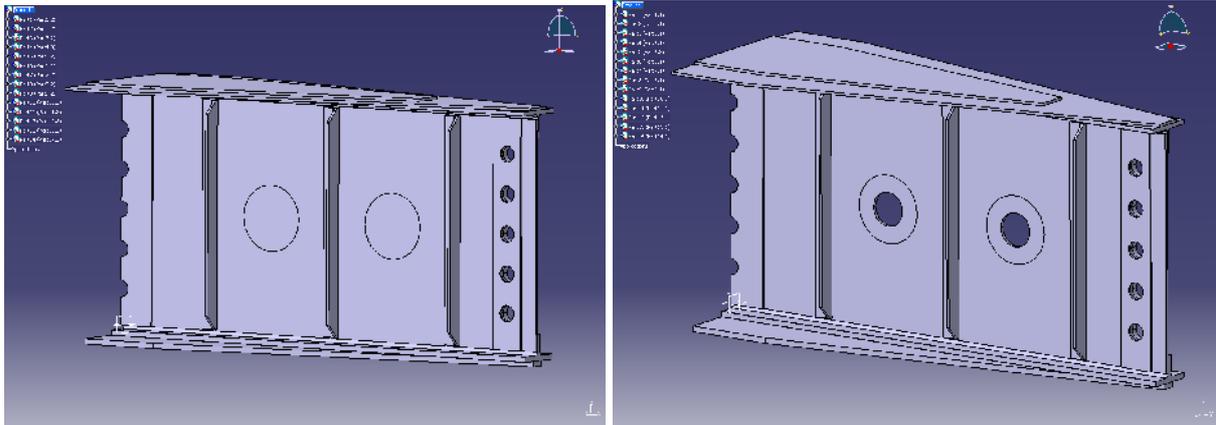


Рис. 6. Аналитические эталоны образцов отсека лонжерона без выреза и с круговыми неусиленными вырезами в стенке

Расчетной моделью отсеков образцов лонжерона являются трехмерные объекты, представляющие собой пространственные балки, которые закреплены с одного торца жесткой заделкой, а с другого конца загружены силой Q_z , действующей по высоте стенки. Зоной исследования служит стенка в зоне кругового выреза. Исследование характеристик НДС поясов, подкрепляющих стоек, накладок не является целью данной работы. В зоне круговых вырезом имеет место объемное НДС, описываемое несколькими компонентами вектора напряженности. На рис. 7 представлена расчетная схема отсека лонжерона с круговым вырезом в стенке. Расчетная схема отсека лонжерона без выреза выполнена по подобию расчетной схемы приведенной на рис. 7.

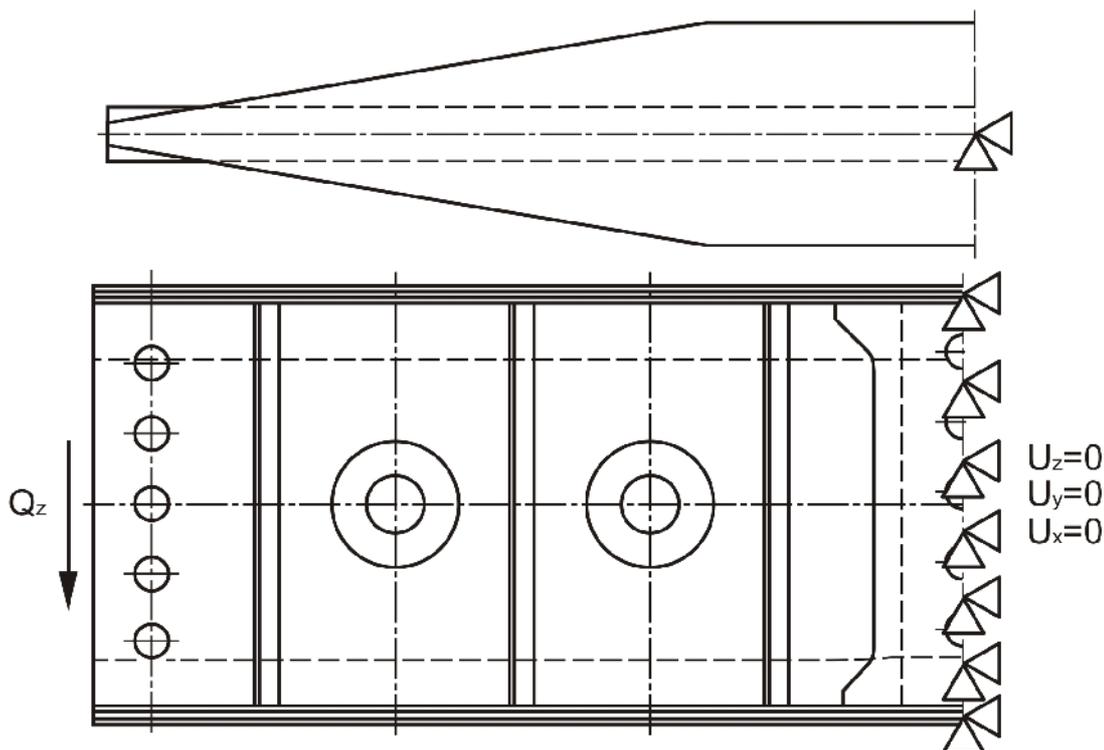


Рис. 7. Расчетная схема отсека лонжерона с круговым вырезом в стенке

Задаем характеристики деформирования применяемых конструкционных материалов (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики деформирования применяемых конструкционных материалов

| Материал | Предел прочности при растяжении, МПа | Предел текучести, МПа | Модуль упругости, МПа | Относительное удлинение, % |
|----------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| Д16-Т | 420 | 300 | 72000 | 10 |
| Д16АТ | 470 | 330 | 72000 | 10 |
| Д16АТВ | 435 | 335 | 72000 | 10 |

В САЕ-системе проводим разбиение импортированных моделей на конечные элементы автоматически, задавая длину элементов. Образец отсека лонжерона без вырезов разбивается следующим образом: пояса, стенка, накладки на пояса, накладки стенки и подкрепляющие стойки разбиваются на элементы длиной 5 мм. В образце отсека лонжерона с вырезами пояса, накладки на пояса, накладки стенки и подкрепляющие стойки разбиваются на элементы длиной 6 мм, стенка разбивается на элементы длиной 5 мм, исследуемая зона - на элементы длиной 1мм, внутренняя поверхность выреза по толщине стенки (глубине выреза) - разбивается на элементы длиной 0,25 мм.

В результате, получается следующее количество узлов и элементов: в отсеке лонжерона без отверстий в стенке:

- количество узлов в отсеке – 91841;
- количество элементов в отсеке – 166158;

в отсеке лонжерона с отверстиями в стенке:

- количество узлов в отсеке – 258784;
- количество элементов в отсеке – 271371;

Связи между элементами устанавливаются автоматически. На рис. 8 представлена конечно-элементная модель образца участка лонжерона без круговых вырезов в стенке, на рис. 9 - конечно-элементная модель образца участка лонжерона с круговыми вырезами в стенке, на рис. 10 представлена конечно-элементная модель исследуемого участка стенки отсека лонжерона в зоне кругового выреза.

Задаем значения нагрузки Q_z . Во время усталостных испытаний натуральных образцов экспериментальных отсеков лонжерона с неусиленными круговыми вырезами диаметром 50 мм, расположенными на продольной оси отсека, при различных уровнях циклического нагружения значение максимальной нагрузки P_{\max} составляло 220000 Н, коэффициент асимметрии цикла R составлял 0,48, а значение $Q_{\max 0}$ составляло 83900 Н.

Проведя пересчет в эквивалентный отнулевой цикл по формуле Одингга, которая находит широкое применение при пересчете циклов и хорошо согласуется с экспериментальными данными, получим: минимальная нагрузка $P_{\min} = 90200$ Н, амплитудная нагрузка $P_a = 64900$ Н, значение P_{\max} при нулевом цикле $P_{\max 0} = 168986$ Н. Откуда следует, что усилие $Q_z = P_{\max 0} / 2 = 84493$ Н.

Учитывая полученный результат, принимаем следующие значения нагрузок: 94500 Н; 87500 Н; 84500 Н; 77000 Н; 70000 Н для проведения расчета в системе ANSYS.

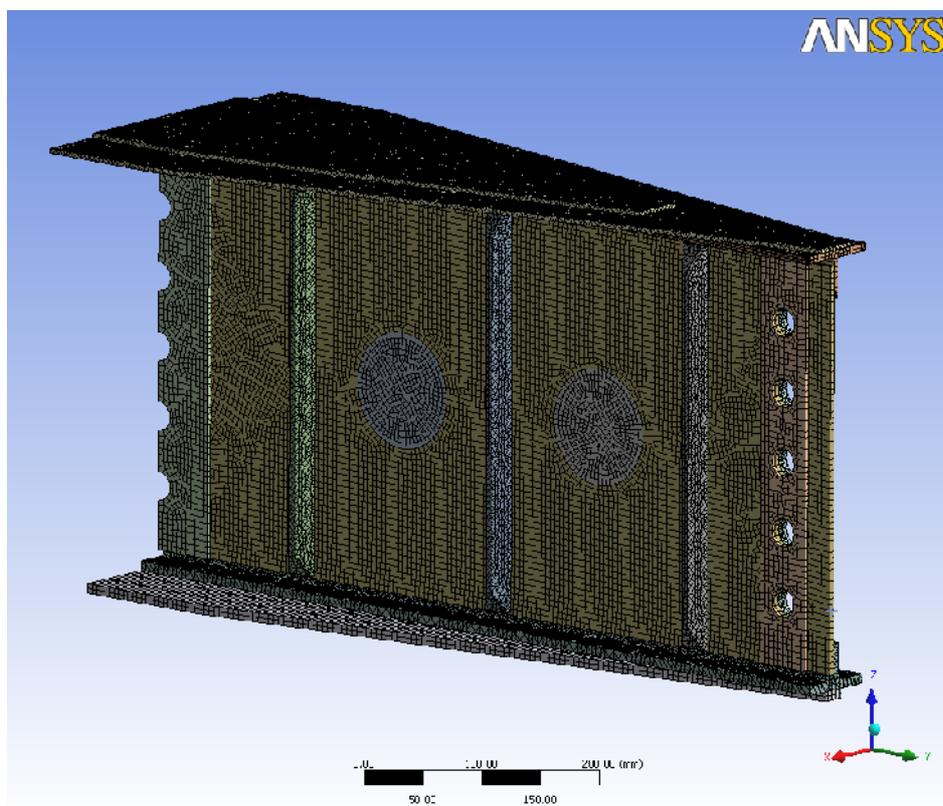


Рис. 8. Конечно-элементная, модель отсека лонжерона без круговых вырезов в стенке

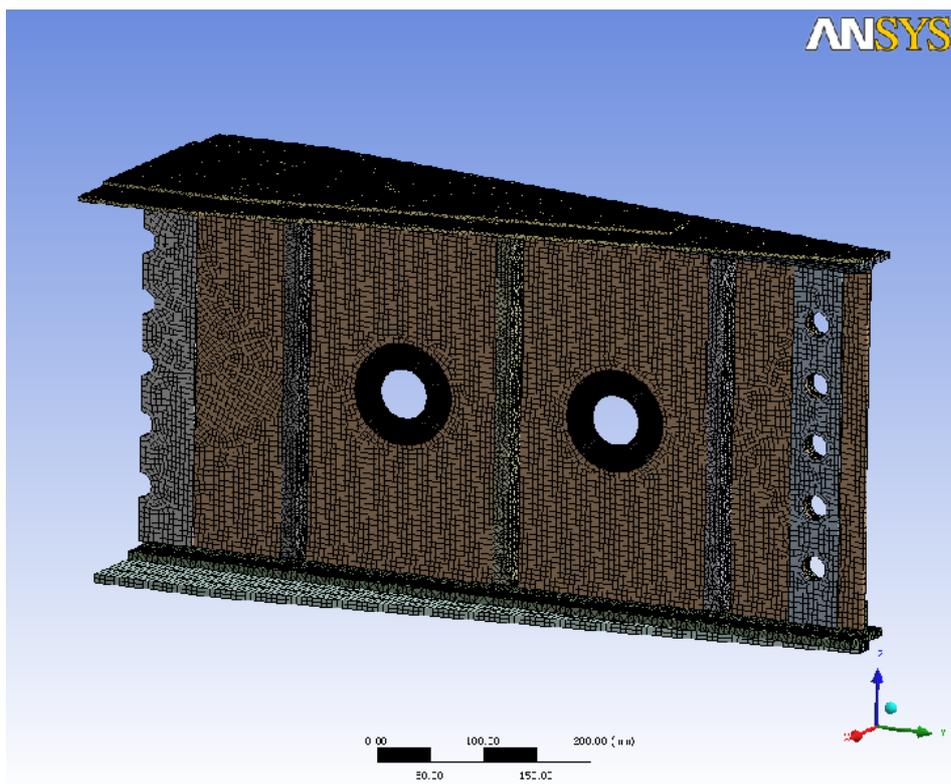


Рис. 9. Конечно-элементная, модель отсека лонжерона с круговыми вырезами в стенке

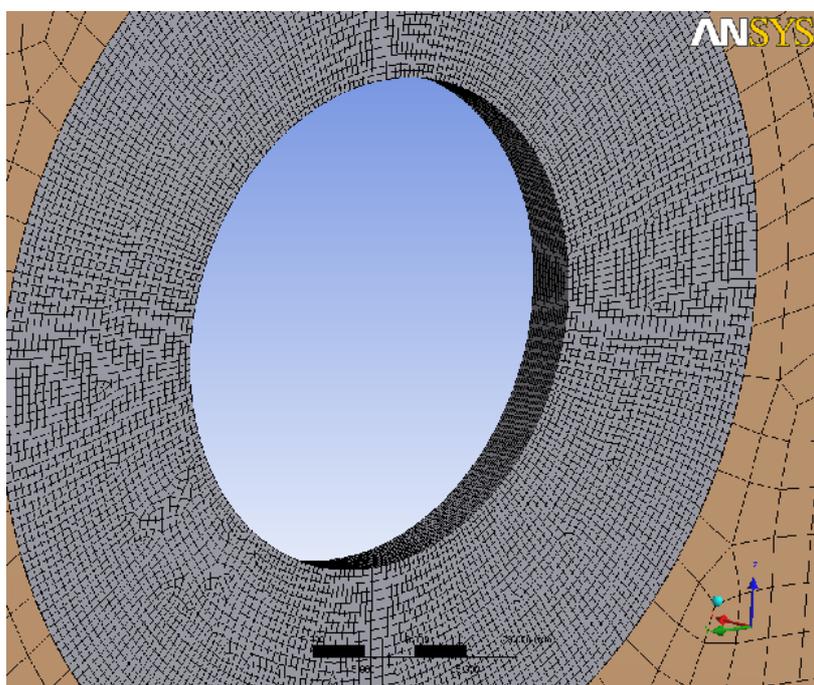


Рис. 10. Конечно-элементная модель исследуемого участка стенки отсека лонжерона в зоне кругового выреза

Задачей исследования НДС образца отсека лонжерона без круговых вырезов является определение характера распределения следующих характеристик: напряжений σ_1 ; максимальных касательных напряжений τ_{\max} ; касательных напря-

жений τ_{ZY} , действующих в плоскости стенки; эквивалентных напряжений σ_e . В задачу исследования входило также сравнение характера распределения касательных напряжений, полученных по теории тонкостенных балок, касательных напряжений в соответствии с гипотезой плоских сечений и максимальных касательных напряжений полученных с помощью системы ANSYS.

Исследование проводилось в сечении, которое при испытании натуральных образцов являлось критическим. На рис. 11 данное сечение представлено как сечение А-А.

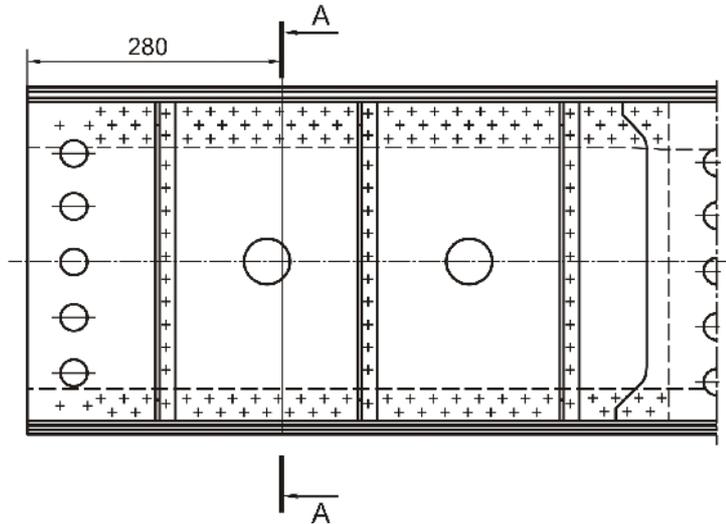


Рис. 11. Расчетное сечение исследуемых экспериментальных отсеков образцов

На рис. 12 показан характер изменения напряжений σ_1 , σ_e по высоте расчетного сечения отсека лонжерона без вырезов, на рис. 13 - характер изменения напряжений τ_{max} , τ_{ZY} по высоте расчетного сечения отсека лонжерона без вырезов.

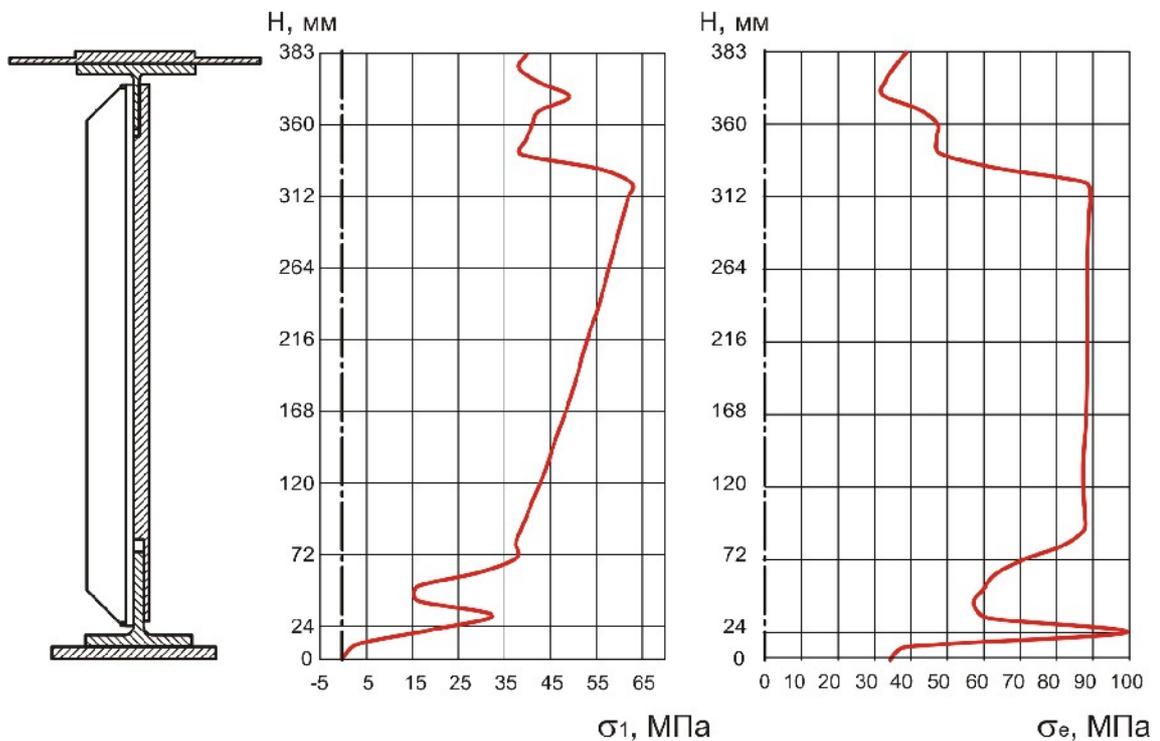


Рис. 12. Характер изменения напряжений σ_1 , σ_e по высоте расчетного сечения от-сека лонжерона без вырезов

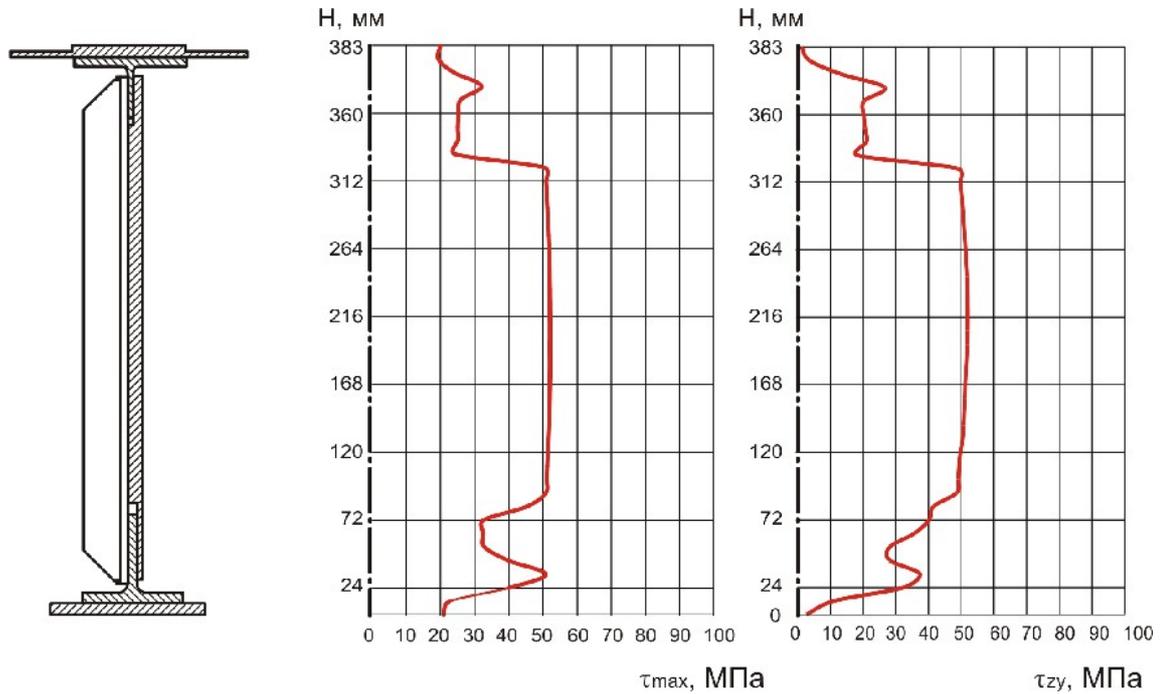


Рис. 13. Характер изменения напряжений σ_1 , σ_e по высоте расчетного сечения от-сека лонжерона без вырезов

На рис. 14 представлен характер распределения касательных напряжений, полученных по теории тонкостенных балок, касательных напряжений в соответствии с гипотезой плоских сечений и максимальных касательных напряжений, полученных с помощью системы ANSYS.

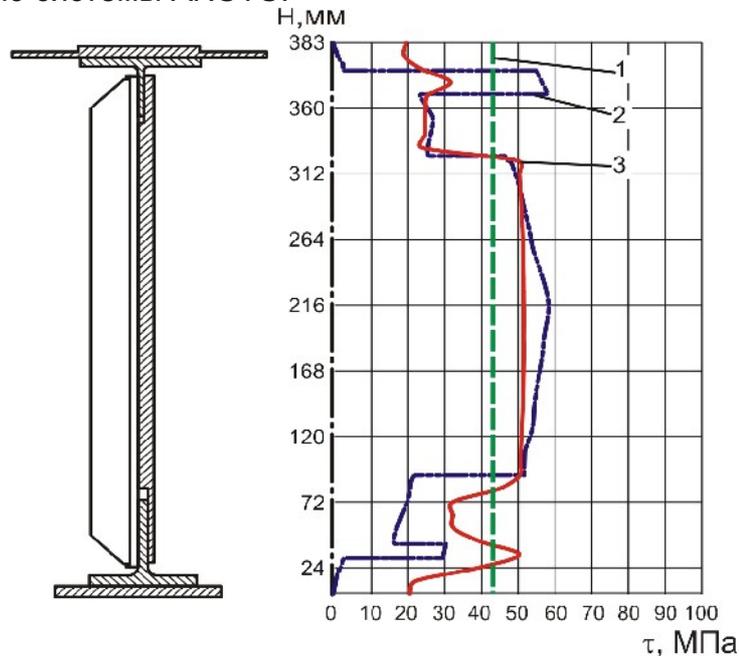


Рис. 14. Характер распределения касательных напряжений, полученных по теории тонкостенных балок, касательных напряжений в соответствии с гипотезой плоских

сечений и максимальных касательных напряжений, полученных с помощью системы ANSYS

На рис. 14 1 – характер распределения касательных напряжений полученных по теории тонкостенных балок; 2 – характер распределения касательных напряжений, полученных в соответствии с гипотезой плоских сечений; 3 – характер распределения касательных напряжений, полученных с помощью системы ANSYS.

Сравнивая характер распределения касательных напряжений в сечении экспериментального отсека лонжерона без круговых вырезов можно сделать следующие выводы:

1. Определение действующих касательных напряжений по теории тонкостенных балок не учитывает конструктивно-технологические нерегулярности исследуемых отсеков. Данный метод определения касательных напряжений не принимает во внимание влияние изгибающих усилий, возникающих под воздействием поперечной силы, разность жесткостных характеристик конструкции отсека, а учитывает только влияние подкрепляющих стоек и не рассматривает взаимное влияние поясов и стенки.

2. Определение действующих касательных напряжений в соответствии с гипотезой плоских сечений учитывает конструктивно-технологические нерегулярности исследуемых отсеков, их инерционные и статические моментные характеристики сечения, изменение жесткости конструкции по высоте, но не учитывает влияние изгибающих усилий, возникающих в отсеках, а также взаимное влияние основных силовых элементов конструкции отсеков лонжеронов.

3. Определение касательных напряжений, действующих в отсеке лонжерона с помощью системы ANSYS, позволяет учесть жесткостные характеристики, взаимное влияние основных силовых элементов. Определение характеристик НДС с помощью системы ANSYS принимает во внимание одновременное воздействие на отсек поперечной силы и изгибающего момента, с учетом сложных конструктивно-технологических параметров конструкции.

Данные выводы подтверждают рациональность применения МКЭ, реализованного в системе ANSYS, для определения характеристик локального НДС экспериментальных отсеков лонжерона в зоне круговых вырезов.

Дальнейшим этапом было определение и исследование характеристик НДС отсеков лонжеронов с круговыми вырезами, определение точек с наибольшей концентрацией напряжений в зоне кругового выреза, величин коэффициентов концентрации напряжений и деформаций.

В качестве критериев для анализа НДС отсека лонжерона с круговыми вырезами в данной работе, рассмотрены следующие параметры:

- коэффициенты концентрации напряжений $k_{\sigma 1}$ и деформаций $k_{\varepsilon 1}$;
- максимальные главные напряжения σ_1 ;
- минимальные главные напряжения σ_2 ;
- максимальные главные деформации ε_1 ;
- максимальная удельная энергия деформирования w_1 .

Согласно теории Мора, вытекающих из нее гипотезы максимальных касательных напряжений и гипотезы энергии формоизменения переход из упругого состояния в пластичное происходит, когда величина интенсивности напряжений достигает предела текучести [5]. Максимальные значения интенсивности напряжений не достигли предела текучести, а это значит, что исследования проводились в зоне упругости материала. При нагружении образца отсека лонжерона с круговыми вырезами на контуре каждого из вырезов возникли два пика растягивающих и

два пика сжимающих напряжений. Они расположены в поперечных сечениях, проходящих через центр отверстия под углом $\pm 45^\circ$ к направлению касательных напряжений. На рис. 15 показан характер распределения интенсивности напряжений в зоне кругового выреза отсека лонжерона. Данный характер распределения подтверждает правильность расчета в системе ANSYS.

Дальнейшие исследования были проведены только для одного контура кругового выреза образца, в котором растягивающие напряжения σ_1 достигли максимального значения. На рис. 16 этот контур обозначен флажком.

На рис.16,17 представлен характер распределения напряжений σ_1 по первому и второму контурам круговых вырезов в стенке отсека лонжерона, на рис.18, 19 - характер распределения напряжений σ_2 по первому и второму контурам круговых вырезов в стенке отсека лонжерона.

Анализ результатов полученных характеристик локального НДС отсека лонжерона в зоне кругового выреза осуществляем путем сравнения соответствующих значений коэффициентов концентрации напряжений, деформаций, а также величин максимальных и минимальных главных напряжений, деформаций и энергии деформирования. Анализ указанных параметров проводим в точках возникновения максимальных значений главных напряжений и деформаций. Для исследования характеристик НДС в зоне кругового выреза было выбрано два направления исследования L1 и L2. Направление исследования L1 – это направление по глубине отверстия, где нулевой точкой отсчета была взята сторона стенки без стоек, а направление L2 - по поверхности стенки, в котором за нулевую точку отсчета была принята точка пересечения L1 и L2. На рис. 18 представлены направления L1 и L2, по которым производилось исследование характеристик локального НДС стенки отсека лонжерона в зоне кругового выреза.

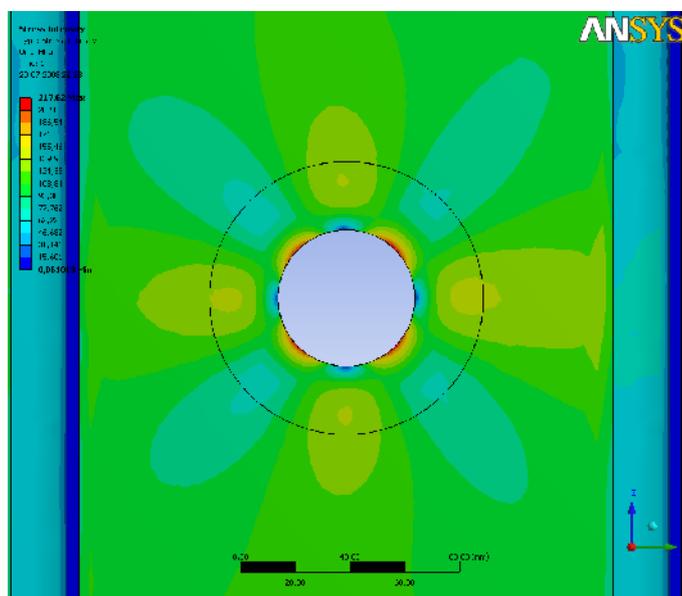


Рис. 15. Характер распределения интенсивности напряжений в зоне кругового выреза отсека лонжерона

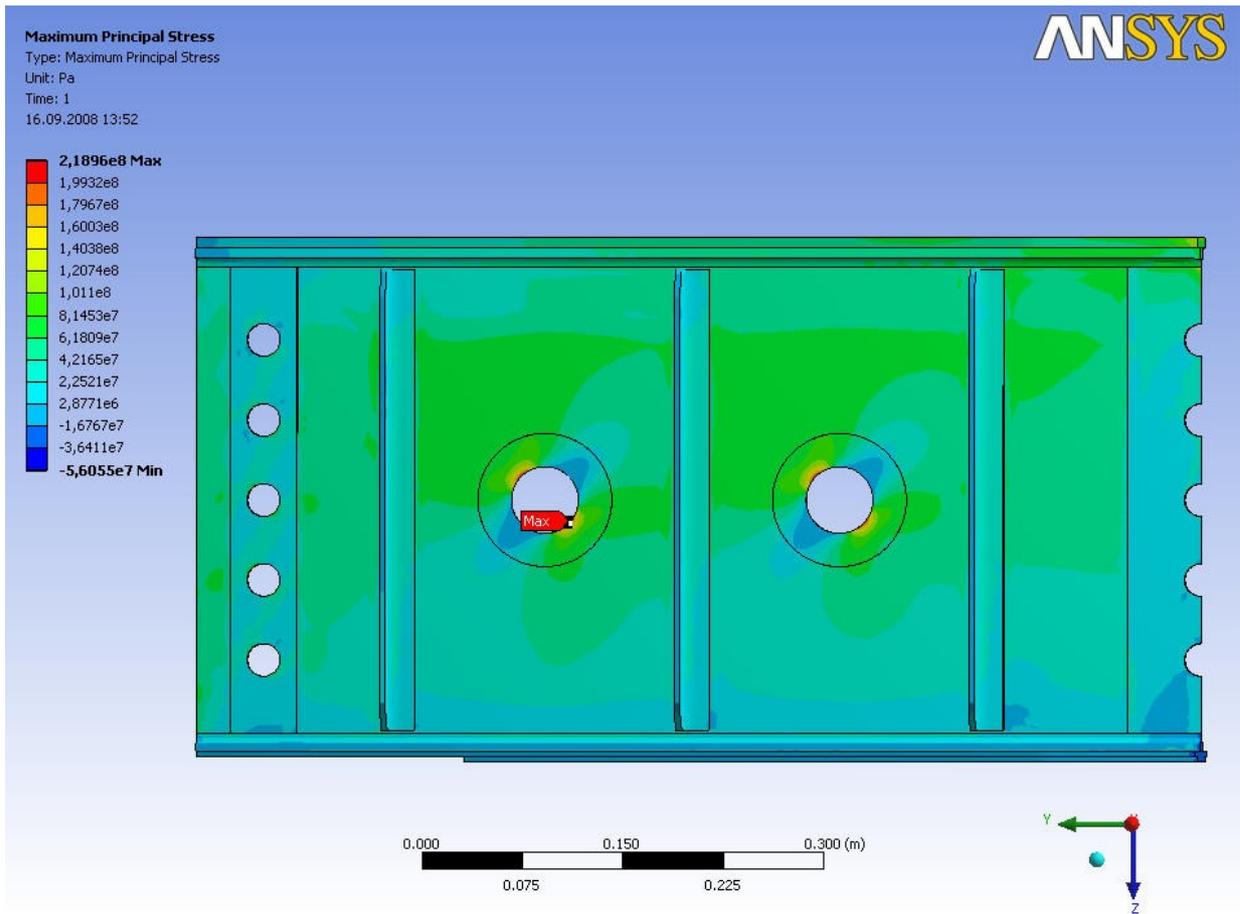


Рис. 16. Характер распределения напряжений σ_1 по первому и второму контурам круговых вырезов в стенке отсека лонжерона

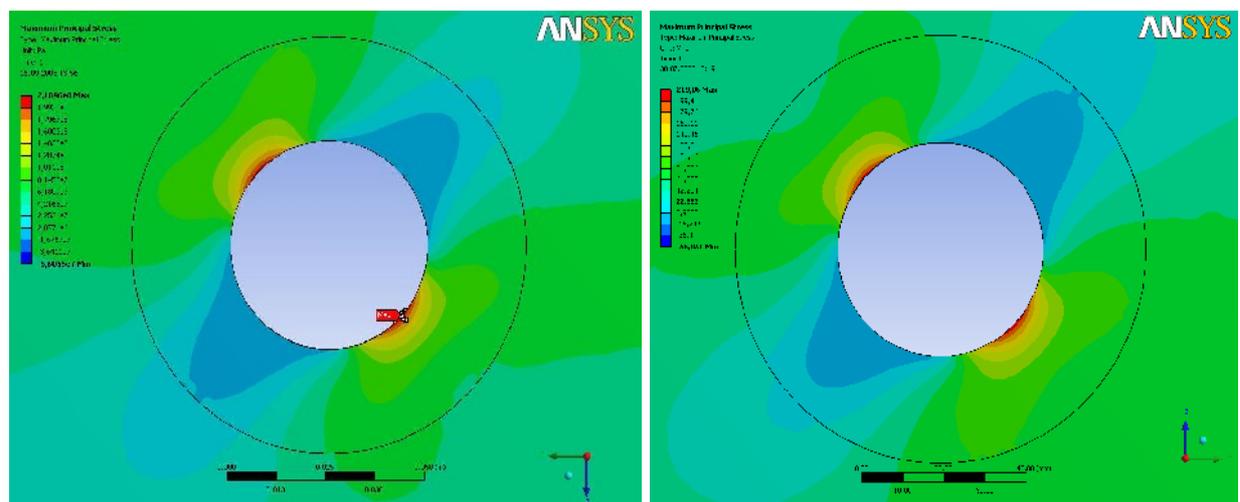


Рис. 17. Характер распределения напряжений σ_1 по первому и второму контурам круговых вырезов в стенке отсека лонжерона.

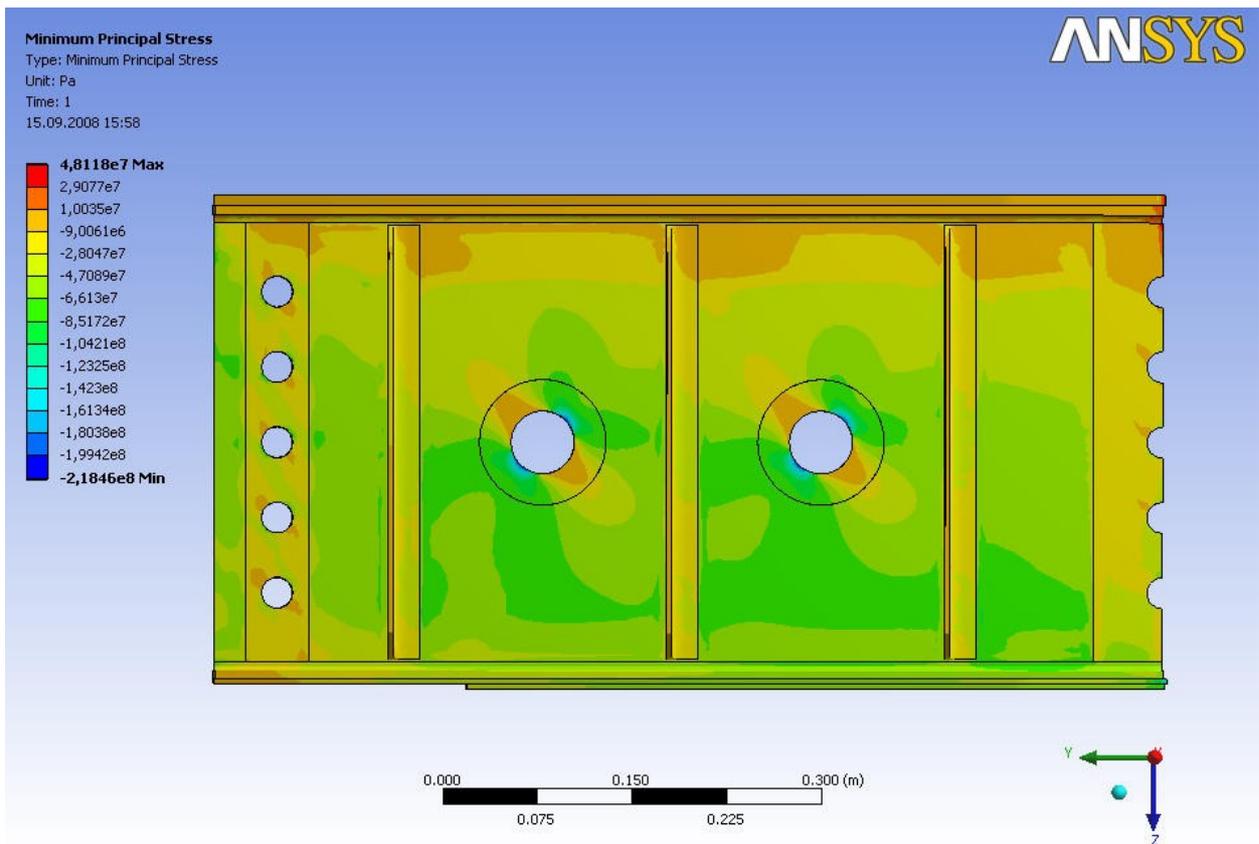


Рис. 18. Характер распределения напряжений σ_2 по первому и второму контурам круговых вырезов в стенке отсека лонжерона

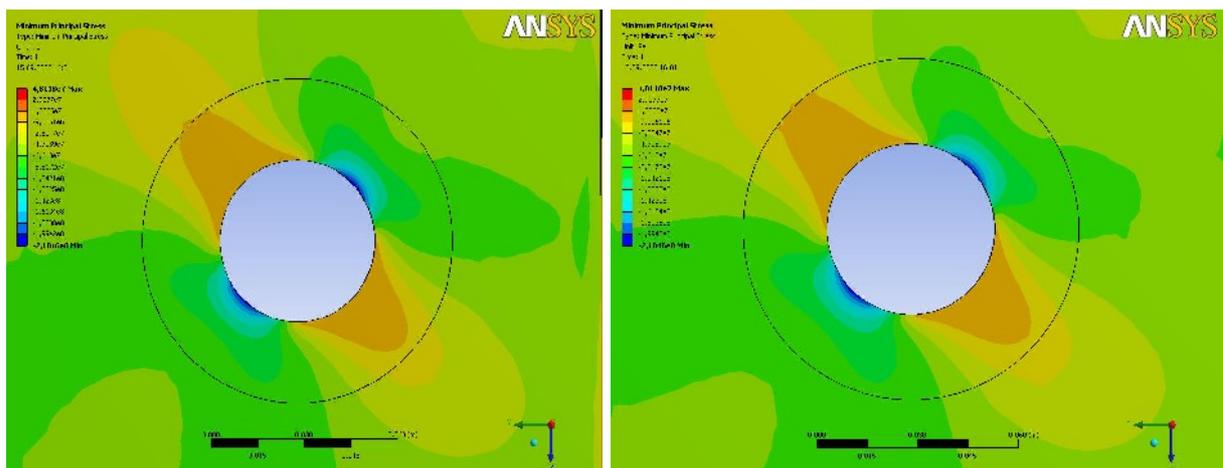


Рис. 19. Характер распределения напряжений σ_2 по первому и второму контурам круговых вырезов в стенке отсека лонжерона.

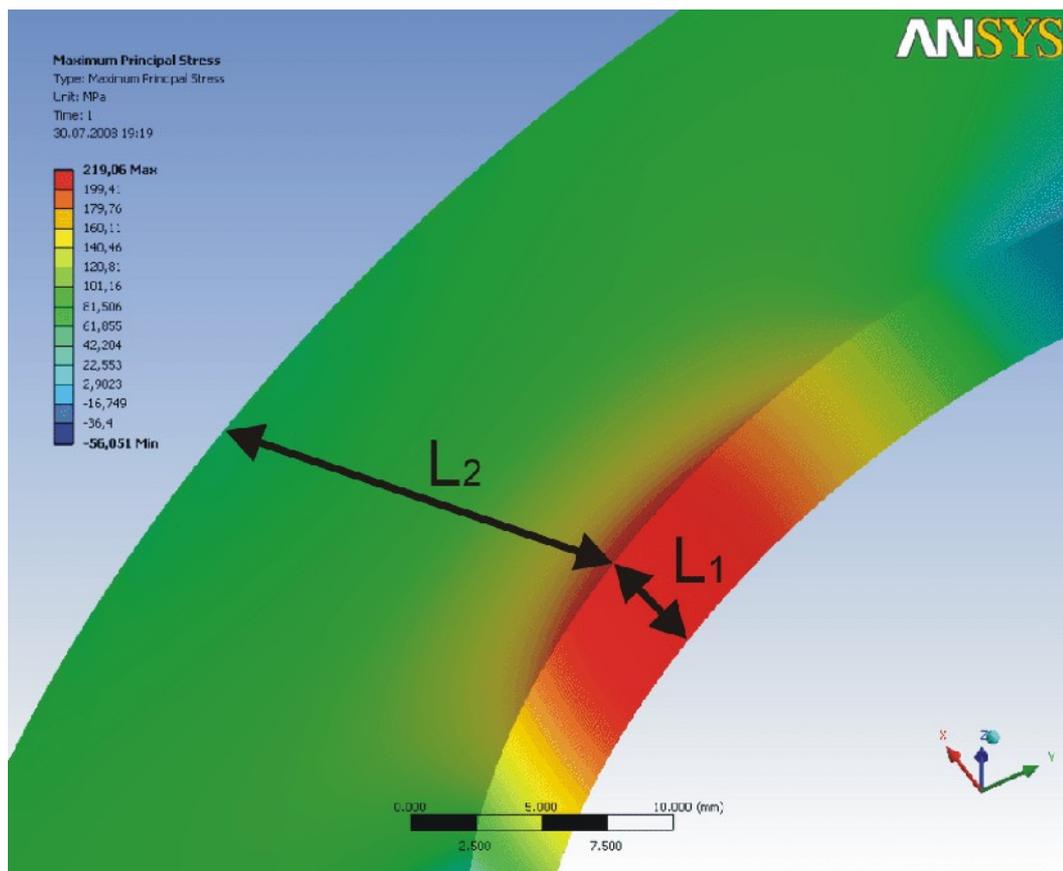


Рис. 20. Направления L1 и L2, по которым производилось исследование характеристик локального НДС стенки отсека лонжерона в зоне кругового выреза

По значениям, полученным в результате конечно-элементного расчета, были построены графические зависимости исследуемых критериев при различных уровнях нагрузки Q_z . Полученные графические зависимости представлены на рис. 21 - 24.

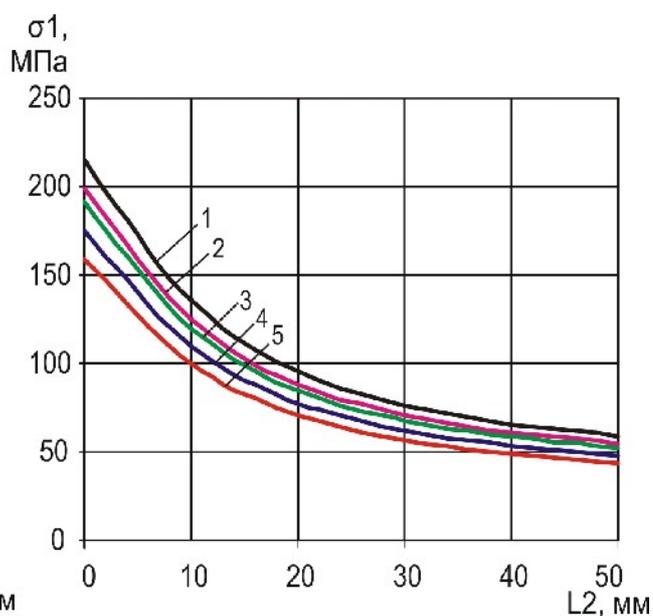
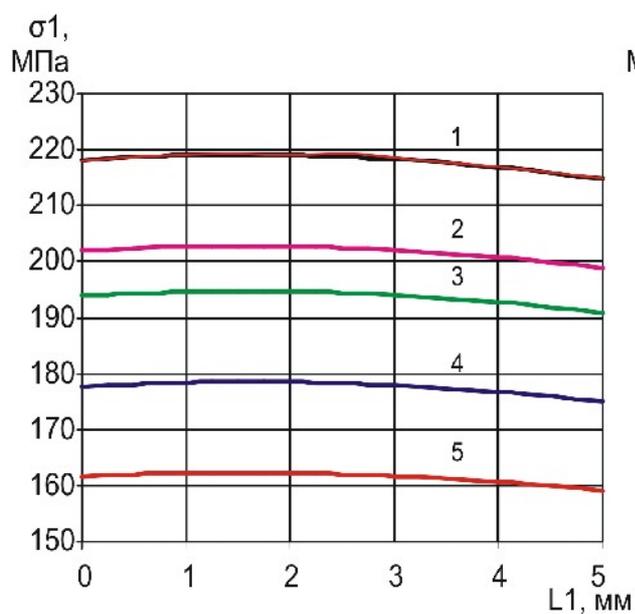


Рис. 21. Характер изменения напряжений σ_1 по направлениям L1 и L2 при различных уровнях нагрузки Q_z :
 1 – 94500 Н; 2 – 87500 Н; 3 – 84500 Н; 4 – 77000 Н; 5 – 70000 Н

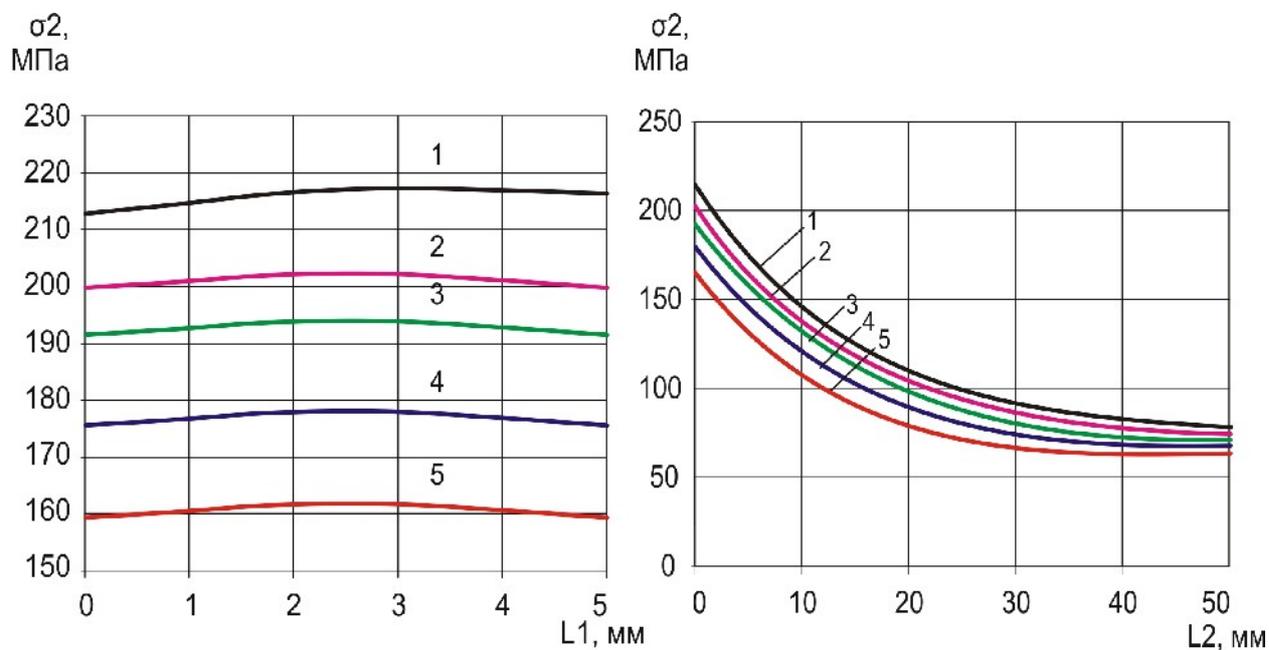


Рис. 22. Характер изменения напряжений σ_2 по направлениям L1 и L2 при различных уровнях нагрузки Q_z :
 1 – 94500 Н; 2 – 87500 Н; 3 – 84500 Н; 4 – 77000 Н; 5 – 70000 Н

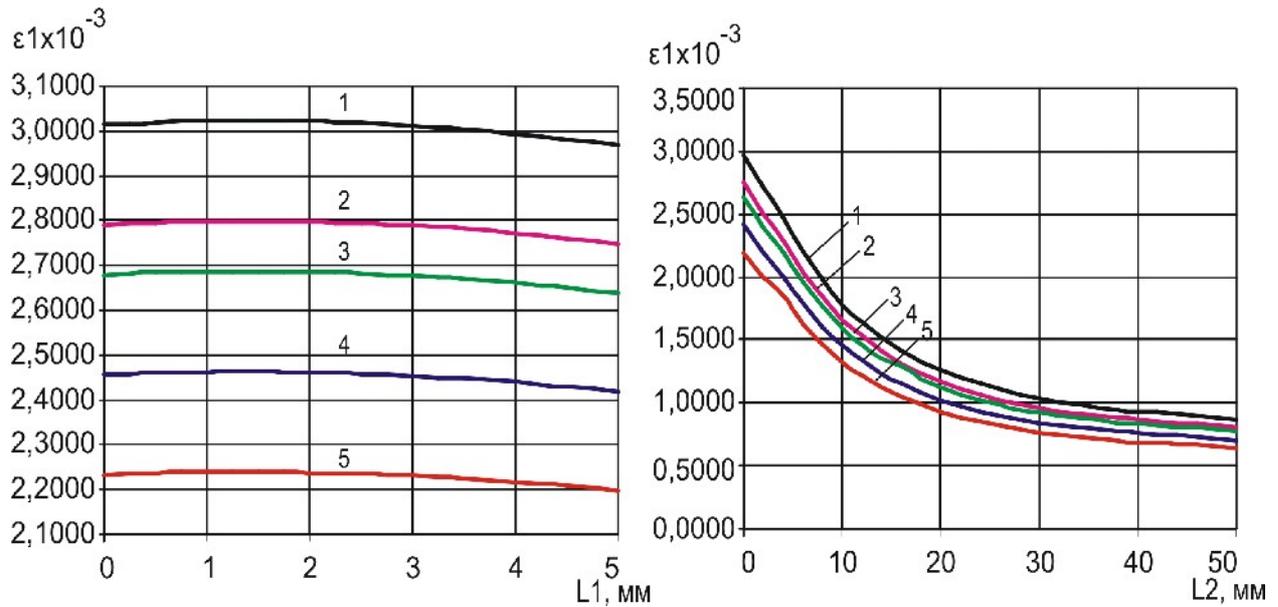


Рис. 23. Характер изменения деформаций ϵ_1 по направлениям L1 и L2 при различных уровнях нагрузки Q_z :
 1 – 94500 Н; 2 – 87500 Н; 3 – 84500 Н; 4 – 77000 Н; 5 – 70000 Н

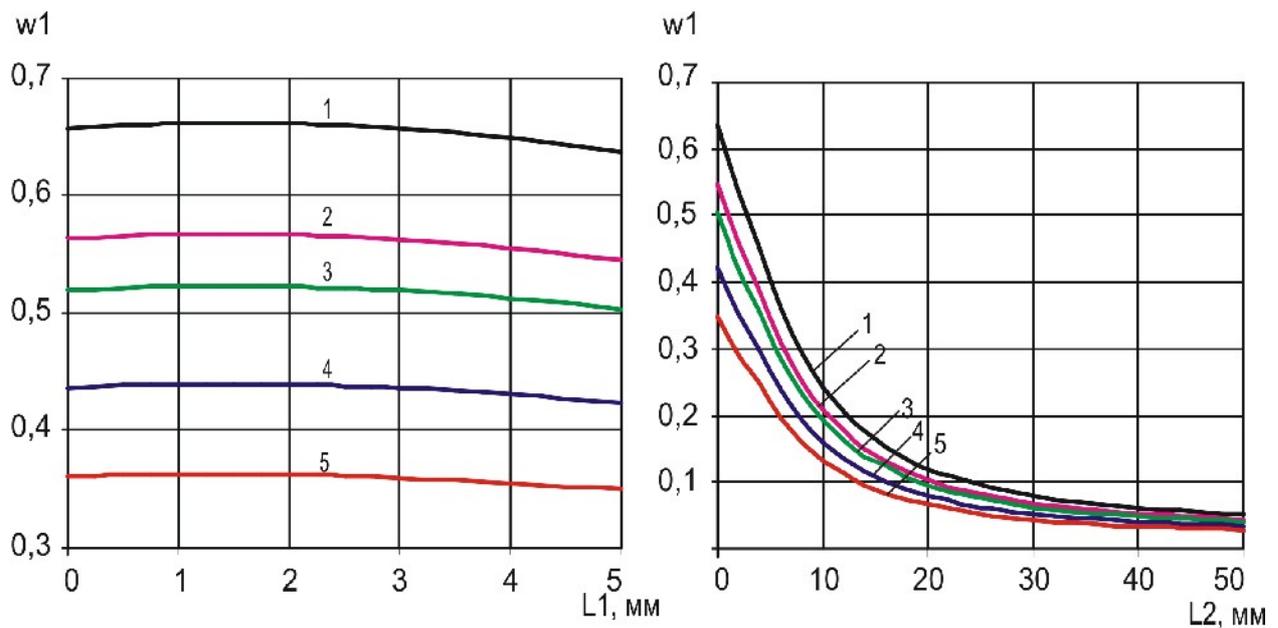


Рис. 24. Характер изменения удельной энергии деформирования w_1 по направлениям L1 и L2 при различных уровнях нагрузки Q_z :
 1 – 94500 Н; 2 – 87500 Н; 3 – 84500 Н; 4 – 77000 Н; 5 – 70000 Н

Максимальные значения исследуемых критериев, полученных в результате конечно-элементного расчета образца участка лонжерона с неусиленным круговым вырезом в стенке, приведены табл. 2 – 7. Коэффициенты концентрации получены из зависимостей:

$$K_{\sigma 1} = \frac{\sigma_{1\bar{E}}}{\sigma_{1i}}, \quad K_{\varepsilon 1} = \frac{\varepsilon_{1\bar{E}}}{\varepsilon_{1i}}, \quad \varepsilon_{1i} = \frac{\sigma_{1i}}{E},$$

где: $\sigma_{1\bar{E}}$ - значение напряжений в отсеке лонжерона с круговыми вырезами;

σ_{1i} - значение напряжений в отсеке лонжерона без вырезов;

$\varepsilon_{1\bar{E}}$ - значение деформаций в отсеке лонжерона с круговыми вырезами;

E - модуль упругости материала стенки отсека лонжерона.

Таблица 2

Значения максимальных коэффициентов концентрации напряжений

| K σ_{1max} | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Q _z =94500 Н | Q _z =87500 Н | Q _z =84500 Н | Q _z =77500 Н | Q _z =70000 Н |
| 4.19 | 4.20 | 4.19 | 4.19 | 4.19 |

Таблица 3

Значения максимальных коэффициентов концентрации деформации

| K ε_{1max} | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Q _z =94500 Н | Q _z =87500 Н | Q _z =84500 Н | Q _z =77500 Н | Q _z =70000 Н |
| 4.16 | 4.17 | 4,16 | 4,16 | 4,17 |

Таблица 4

Значения максимальных напряжений σ_1

| Σ_{1max} , МПа | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Q _z =94500 Н | Q _z =87500 Н | Q _z =84500 Н | Q _z =77500 Н | Q _z =70000 Н |
| 219,06 | 202,83 | 194,72 | 178,49 | 162,27 |

Таблица 5

Значения максимальных напряжений σ_2

| Σ_{2max} , МПа | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Q _z =94500 Н | Q _z =87500 Н | Q _z =84500 Н | Q _z =77500 Н | Q _z =70000 Н |
| 217.14 | 202,28 | 194,18 | 178,01 | 161,82 |

Таблица 6

Значения максимальных деформаций ε_1

| ε_{1max} , $\times 10^{-3}$ | | | | |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Q _z =94500 Н | Q _z =87500 Н | Q _z =84500 Н | Q _z =77500 Н | Q _z =70000 Н |
| 3,0225 | 2,7986 | 2,6866 | 2,4628 | 2,2389 |

Таблица 7

Значения максимальной удельной энергии деформирования w_1

| W_{1max} | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $Q_z = 94500 \text{ Н}$ | $Q_z = 87500 \text{ Н}$ | $Q_z = 84500 \text{ Н}$ | $Q_z = 77500 \text{ Н}$ | $Q_z = 70000 \text{ Н}$ |
| 0,6621 | 0,5676 | 0,5231 | 0,4395 | 0,3633 |

Таким образом, из вышепредставленных таблиц видно, что максимальные коэффициенты концентрации напряжения и деформации составляют 4,20 и 4,17 соответственно, максимальные значения главных напряжений - 219,6 и 217,14 МПа, максимальное значение удельной энергии деформирования в зоне кругового выреза - 0,6621.

Выводы:

1. Разработан метод исследования характеристик локального НДС конструкции стенки экспериментального образца отсека лонжерона в зоне кругового выреза с учетом взаимного влияния основных силовых элементов.

2. Проведена сравнительная оценка определения касательных напряжений с учетом различных теорий. Определение характеристик локального НДС с помощью МКЭ реализованного в системе ANSYS, позволяет учесть конструктивно-технологические нерегулярности конструкции; ее сложнонагруженное состояние обладает большей информативностью и точностью.

3. Определены характеристики локального НДС в критическом сечении: коэффициенты концентрации напряжения и деформации, значения главных напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования. Установлено, что с учетом взаимного влияния основных силовых элементов конструкции образца отсека лонжерона, а также сложного нагружения в зоне кругового выреза коэффициент концентрации напряжения $K_{\sigma_{1MAX}} = 4,20$, коэффициент концентрации деформации $K_{\epsilon_{1MAX}} = 4,17$.

4. Зоны вероятного усталостного разрушения образцов совпадают с зонами максимальных значений напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования образцов отсеков, исследуемыми с помощью системы ANSYS. Зоны появления усталостных трещин в экспериментальных образцах совпадают с зонами максимальных значений напряжений σ_1 .

5. Учитывая все вышеизложенное, разработанный метод можно применять для определения характеристик локального НДС в зоне вырезов при проектировании конструкции лонжеронов.

Список литературы

1. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций / А.Г. Гребеников. - Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 532 с.
2. Классификация элементов основной силовой конструкции лонжеронов крыла, определяющих его долговечность / Е.Т. Василевский, А.Г. Гребеников, В.Н. Николаенко, С.В. Трубаев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 38. – Х., 2008. – С. 35 - 52.
3. Метод определения характеристик общего НДС отъемной части крыла с помощью системы ANSYS/ А.Г. Гребеников, Ю.Н. Геремес, С.П. Светличный,

- Ю.А. Яковлев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 39. – Х., 2008. – С. 37 - 51.
4. Абрамов В.И. Проектировочный расчет на сдвиг тонкостенных балок. / В.И. Абрамов // Теория и практика проектирования пассажирских самолетов. – М.: Наука. – 1976.– С. 270 – 277.
 5. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. М.: Гл. ред. физ. мат. лит. изд-ва «Наука», 1967. – 552 с.
 6. Гребеников А.Г. Технология исследования усталостной долговечности отсеков сборных лонжеронов с отверстиями и вырезами в стенках / А.Г. Гребеников, А.М. Тимченко, С.В. Трубаев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4. – Х., 1999. – С. 253 – 265.
 7. Гребеников А.Г. Влияние глубины зенкования на концентрацию напряжений и долговечность пластины с отверстием при нагружении ее сдвигом / А.Г. Гребеников, В.В. Звягинцев, Э.Н. Румянцев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2. – Х., 1998 – С. 48 – 63.
 8. Сопротивление усталости элементов конструкции / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебнев и др. - М.: Машиностроение, 1990. - 240 с.
 9. Анализ напряженно-деформированного состояния авиационных конструкций с помощью системы ANSYS: / А.Г. Гребеников, С.П. Светличный, В.Н. Король, В.Н. Анпилов. учеб. пособие. В двух частях Х.: Нац. Аэрокосм. ун-т «ХАИ», CADFEM GmbH, АНТО "КНК," 2002; ч.1. - 310 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. зав. каф. А.Г. Гребеников, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.