

Исследование влияния конструктивных параметров на характеристики локального НДС при растяжении пластины с функциональным отверстием

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

Анализ конструкций с использованием метода конечных элементов (МКЭ) является в настоящее время фактически мировым стандартом для прочностных и других видов расчета конструкций. Основой этого служит универсальность МКЭ, позволяющая единым способом рассчитывать различные конструкции с разными свойствами материалов.

Система NASTRAN предназначена для решений широкого спектра задач, связанных с расчетом долговечности элементов конструкции; оптимизации конструкции; расчетом на прочность конструкций, подверженных статическим и динамическим нагрузкам; расчетом тепловых воздействий; расчетом на устойчивость, а также для решения контактных задач.

В работе [1] проанализировано влияние конструктивных параметров пластины с различным типом отверстий на коэффициент концентрации напряжений, однако необходимо определить влияние параметров пластины с отверстием на коэффициент концентрации деформаций и удельную энергию деформирования, которые являются также важными характеристиками для прогнозирования усталостной долговечности элементов конструкций [3].

Целью данной работы является анализ характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) пластины с функциональным отверстием различных типов (цилиндрическим, цилиндроконическим, цилиндроконическим пояском).

Для расчета НДС пластины с отверстием система NASTRAN позволяет применить такую последовательность действий:

1. Разработка физической модели элемента конструкции и её материала.
2. Разработка конечно-элементной модели пластины с отверстием.
3. Приложение внешней нагрузки к элементу конструкции и задание граничных условий.
4. Расчет характеристик локального НДС элемента конструкции.
5. Анализ характеристик локального НДС элемента конструкции (k_σ – коэффициент концентрации напряжений (брутто); k_ε – коэффициент концентрации деформаций (брутто); $\sigma \times \varepsilon$ – удельная энергия деформирования) и их графическое представление.

Разработка физической модели пластины с функциональным отверстием

Модель пластины с отверстием, нагруженной растягивающими усилиями, показана на рис.1.

В силу симметрии пластины математическую модель, которая будет применяться для конечно-элементного анализа, можно представить в виде, изображенном на рис.2.

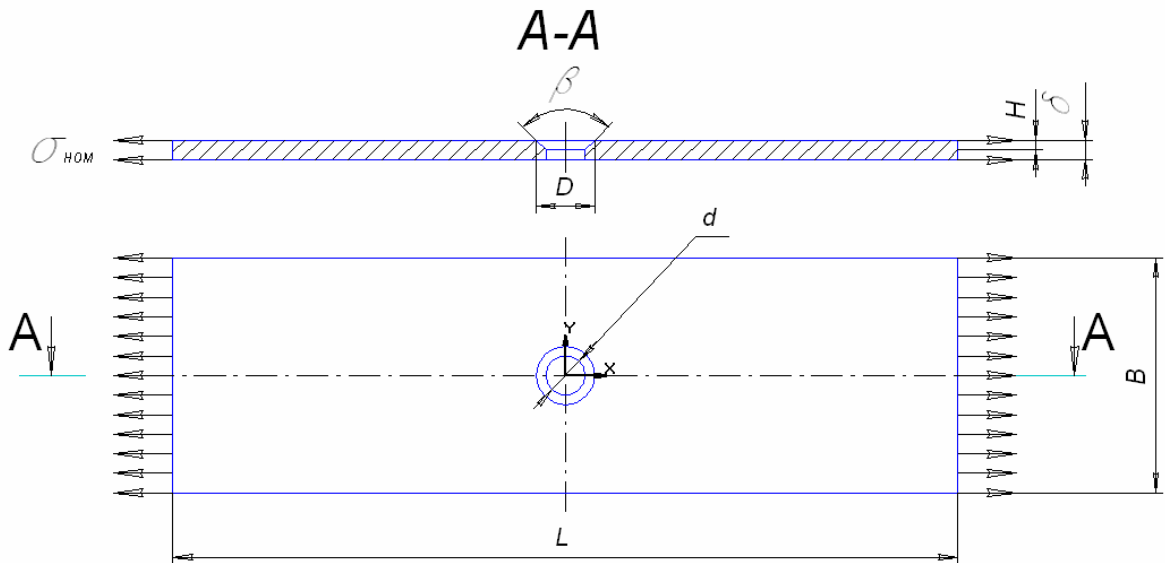


Рисунок 1 - Модель пластины с отверстием цилиндроконического типа

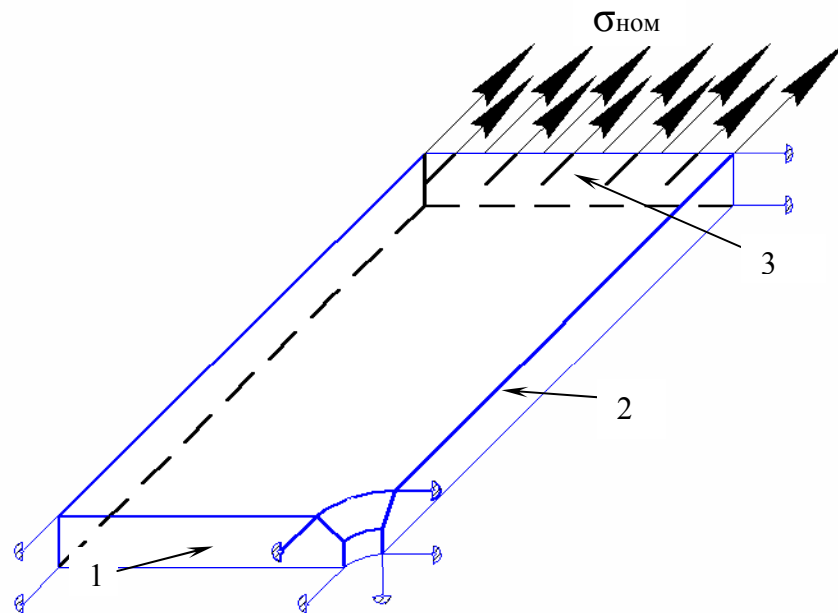


Рисунок 2 - Эквивалентная модель пластины для расчета НДС

Для определения физического закона деформирования создана твердотельная модель пластины. Материал пластины - сплав 1163АТ. Механические характеристики материала приведены в таблице.

σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{пц}$, МПа	E, МПа	μ	G, МПа
430	300	265	72000	0,3	27000

Диаграмма растяжения сплава 1163АТ показана на рис.3:

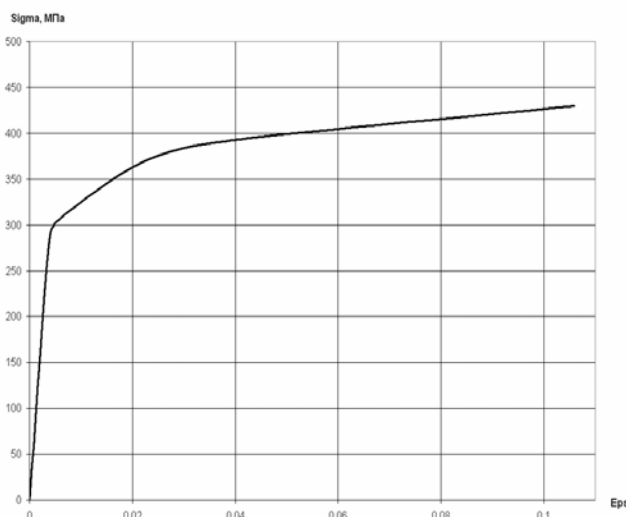


Рисунок 3 - Диаграмма растяжения сплава 1163 АТ

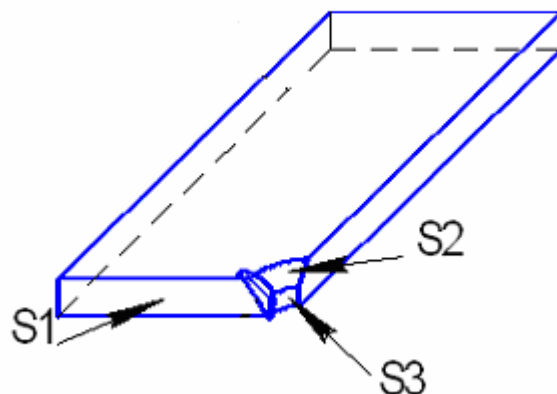


Рисунок 4 - Зона максимальных напряжений пластины

Разработка конечно-элементной модели пластины с функциональным отверстием

Исходя из построенной геометрической модели рассматриваемой пластины и основываясь на экспериментальных данных, допустим, что зона максимальных напряжений находится на образующей отверстия, как показано на рис.4.

Так как выбор типов конечных элементов (КЭ) и их плотности разбиения оказывает значительное влияние на точность аппроксимации поля напряжений и потребляемое процессорное время, то целесообразно увеличить плотность разбиения на поверхностях, граничащих с зоной максимальной концентрации напряжений (поверхности S1, S2, S3 - см. рис.4) [2].

Выберем тип разбиения на конечные элементы **HEX MESHING** (гексаэдральный тип КЭ) и размер конечных элементов в зоне концентрации напряжений 0,25 мм (рис. 5).

Приложение нагрузок к элементу конструкции и граничные условия

Необходимо задать кинематические и статические граничные условия с учетом симметрии данной задачи.

Для задания граничных условий воспользуемся расчетной схемой, изображенной на рис.2.

Наложим связи на поверхности 1 и 2, а к поверхности 3 приложим нормальную нагрузку, равную $\sigma_{ном}$ (рис. 6).

В результате построения конечно-элементной модели пластины с отверстием, приложения всех граничных условий модель готова для выполнения расчета характеристик локального НДС.

Выберем тип расчета **NONLINEAR STATIC** (нелинейный статический расчет), исходя из статического характера прикладываемой нагрузки и нелинейности поведения материала.

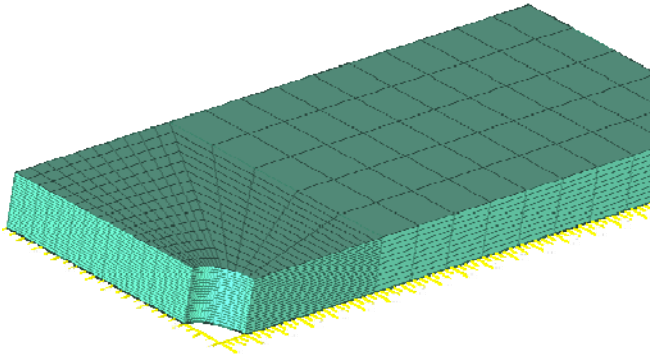


Рисунок 5 - Конечно-элементная модель пластины с отверстием

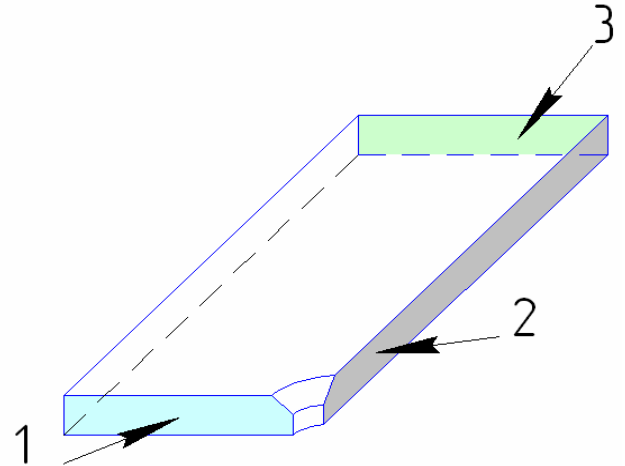


Рисунок 6 - Поверхности, необходимые для задания граничных условий

В результате расчета можно оценить значение коэффициентов концентрации напряжений и деформаций в зоне отверстия, которые определяются по следующим формулам:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{экв}}}{\sigma_{\text{ном}}}, k_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\text{экв}}}{(\sigma_{\text{ном}}/E)}, \text{ где}$$

E - модуль упругости материала пластины; $\sigma_{\text{экв}}$ - эквивалентные локальные напряжения в зоне отверстия; $\varepsilon_{\text{экв}}$ - эквивалентные локальные деформации в зоне отверстия; $\sigma_{\text{ном}}$ - напряжения брутто в сечении.

Определим характеристики локального НДС для следующих вариантов исполнения отверстий по изложенному выше алгоритму:

- 1) цилиндрическое отверстие;
- 2) цилиндроконическое отверстие;
- 3) цилиндроконическое отверстие с цилиндрическим пояском;

Проведем анализ влияния следующих параметров на характеристики локального НДС пластины с отверстием:

- отношения B/d пластины с цилиндрическим отверстием;
- величин номинального напряжения $\sigma_{\text{бр}}$;
- углов зенковки β отверстия пластины;
- глубин зенковки H пластины с цилиндроконическим отверстием;

- диаметра цилиндрического пояска для третьего варианта исполнения отверстия.

Исследование влияния отношения B/d пластины с цилиндрическим отверстием на характеристики локального НДС

Исходные данные:

$L = 200$ мм; $B = 60$ мм; $\delta = 5$ мм; $B/d = 2...7$; $\sigma_{\text{НОМ}} = 50...200$ МПа.

Поварьируем параметр d (диаметр отверстия), при постоянной толщине пластины B для цилиндрического отверстия.

Обработав результаты расчетов, построим графики зависимости величин характеристик локального НДС k_ε , k_σ , $\sigma_{\text{ХЭ}}$ от отношения B/d и от величины нагрузки (рис. 7 – 9 соответственно).

Проанализировав данные, полученные при расчете, можно сделать вывод: при увеличении отношения B/d от 2 до 7 при $\sigma_{\text{НОМ}}=100$ МПа k_σ уменьшается от 3,22 до 3,05, k_ε уменьшается от 5,61 до 2,89, $\sigma_{\text{ХЭ}}$ уменьшается от 2,51 до 1,21.

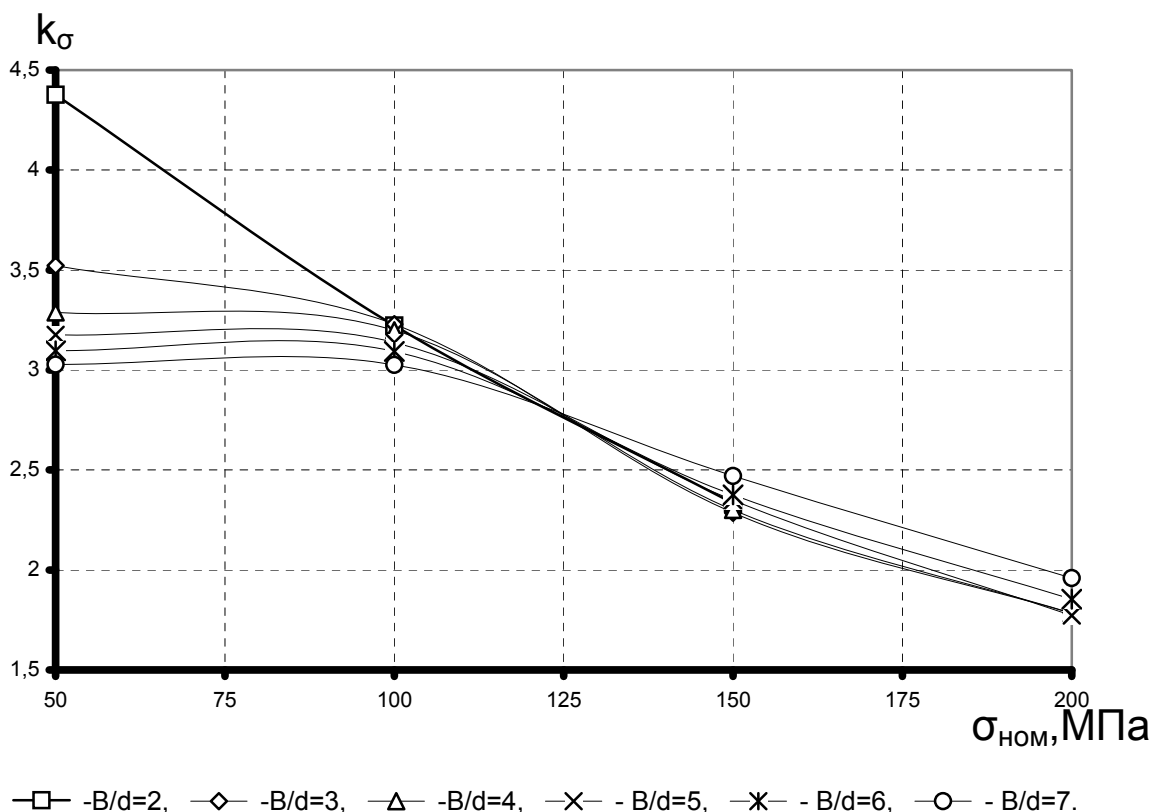


Рисунок 7 - Влияние уровня нагружения и отношения B/d на коэффициент концентрации напряжений k_σ

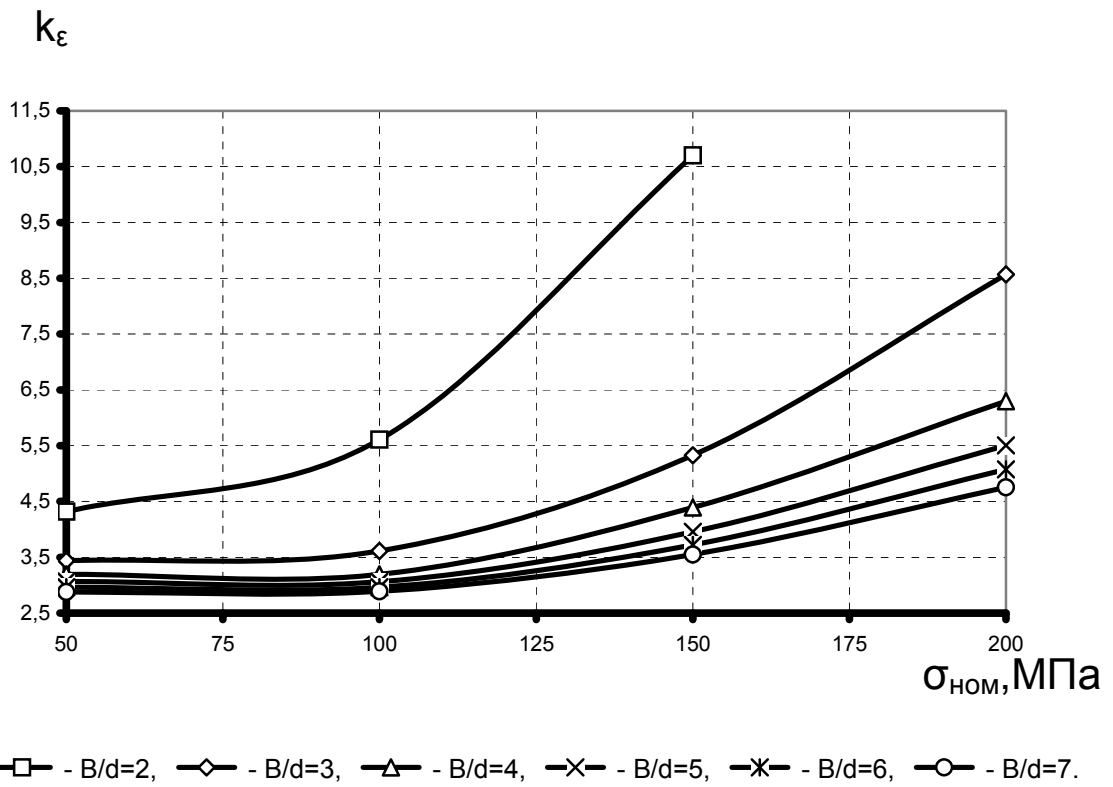


Рисунок 8 - Влияние уровня нагружения и отношения V/d на коэффициент концентрации деформаций k_ϵ

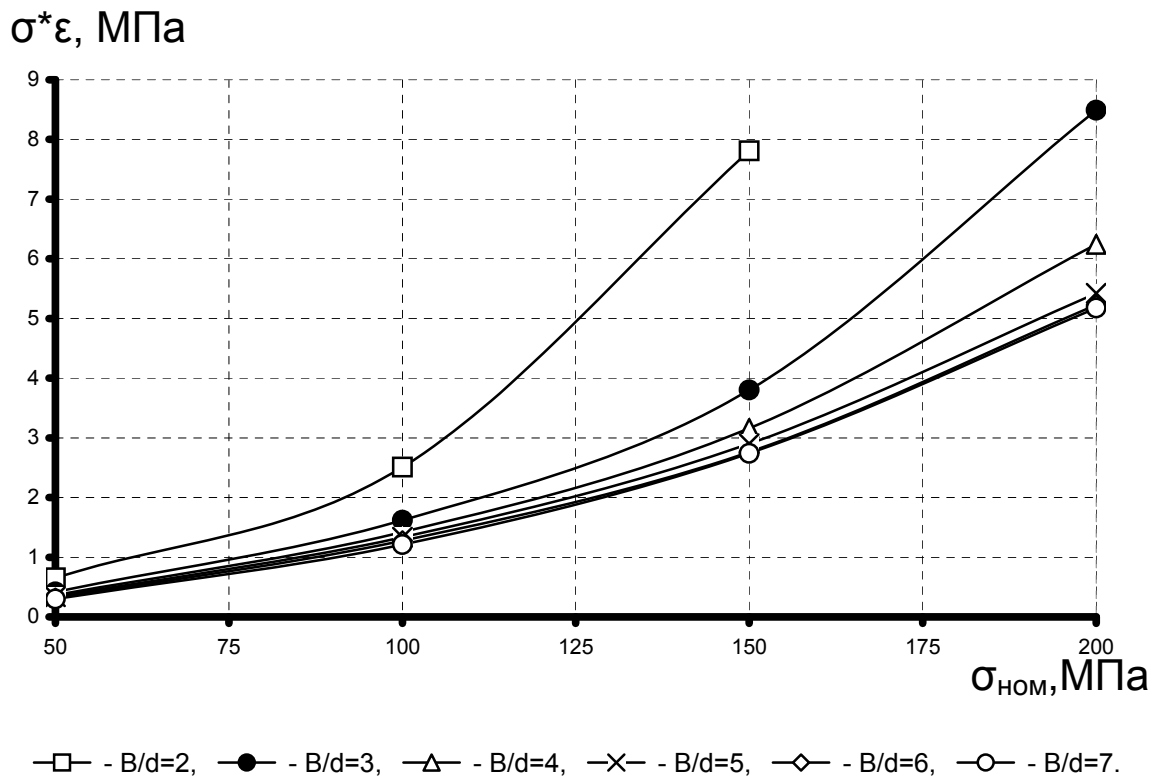


Рисунок 9 - Влияние уровня нагружения и отношения V/d на удельную энергию деформирования $\sigma^*\epsilon$

Исследование влияния величины номинального напряжения на характеристики локального НДС пластины с отверстием

Исходные данные:

$L = 200 \text{ мм}$; $B = 60 \text{ мм}$; $\delta = 5 \text{ мм}$; $B/d = 6$; $D = 12 \text{ мм}$; $\beta = 90^\circ$; $\sigma_{\text{ном}} = 50 \dots 200 \text{ МПа}$.

Рассмотрим три случая – пластина с цилиндрическим отверстием, пластина с цилиндроконическим отверстием, пластина с цилиндроконическим отверстием с цилиндрическим пояском.

Модель пластины с различным типом отверстий, конечно-элементная модель и характер распределения нормальных напряжений показаны на рис. 10 а, б, в- 12 а, б, в.

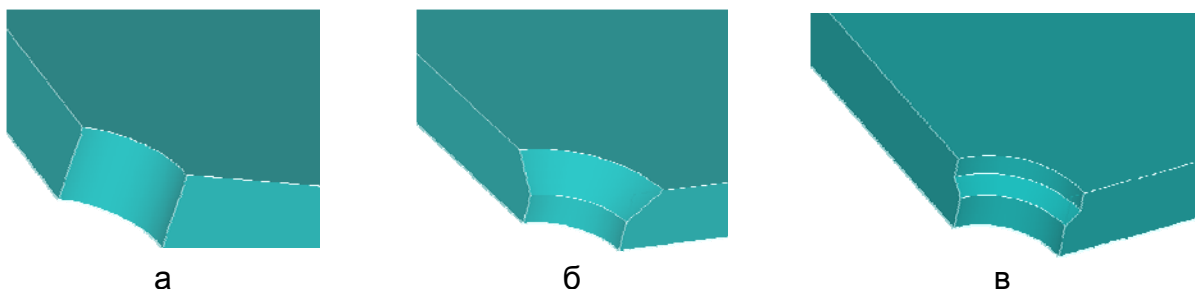


Рисунок 10 - Варианты исполнения отверстий: а - 1-й тип(цилиндрическое отверстие); б - 2-й тип (цилиндроконическое отверстие); в - 3-й тип (цилиндроконическое отверстие с цилиндрическим пояском)

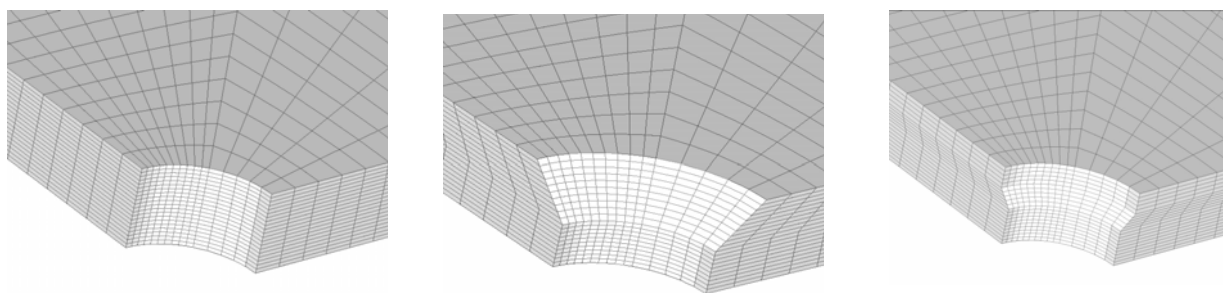


Рисунок 11 - Конечно-элементная модель пластины с отверстием: а - 1-й тип(цилиндрическое отверстие); б - 2-й тип (цилиндроконическое отверстие); в - 3-й тип (цилиндроконическое отверстие с цилиндрическим пояском)

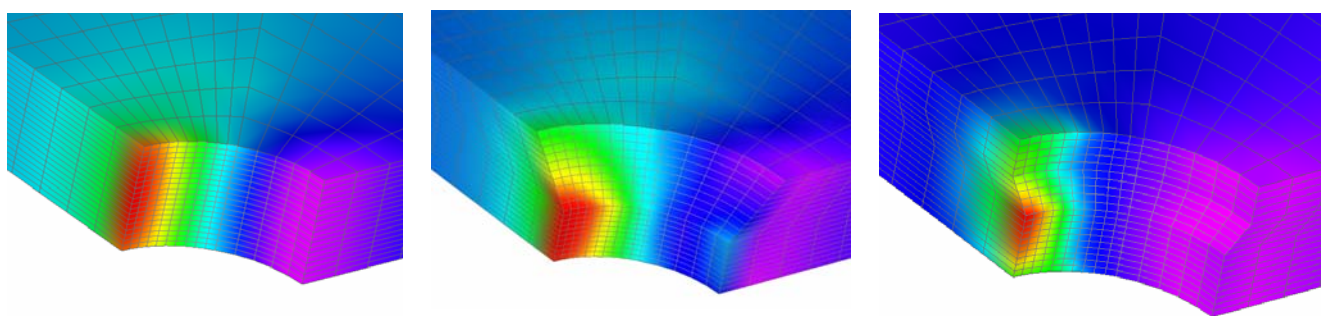


Рисунок 12 - Характер распределения нормальных напряжений в пластине с отверстием при $\sigma_{\text{ном}}=100 \text{ МПа}$: а - 1-й тип(цилиндрическое отверстие); б - 2-й тип (цилиндроконическое отверстие); в - 3-й тип (цилиндроконическое отверстие с цилиндрическим пояском)

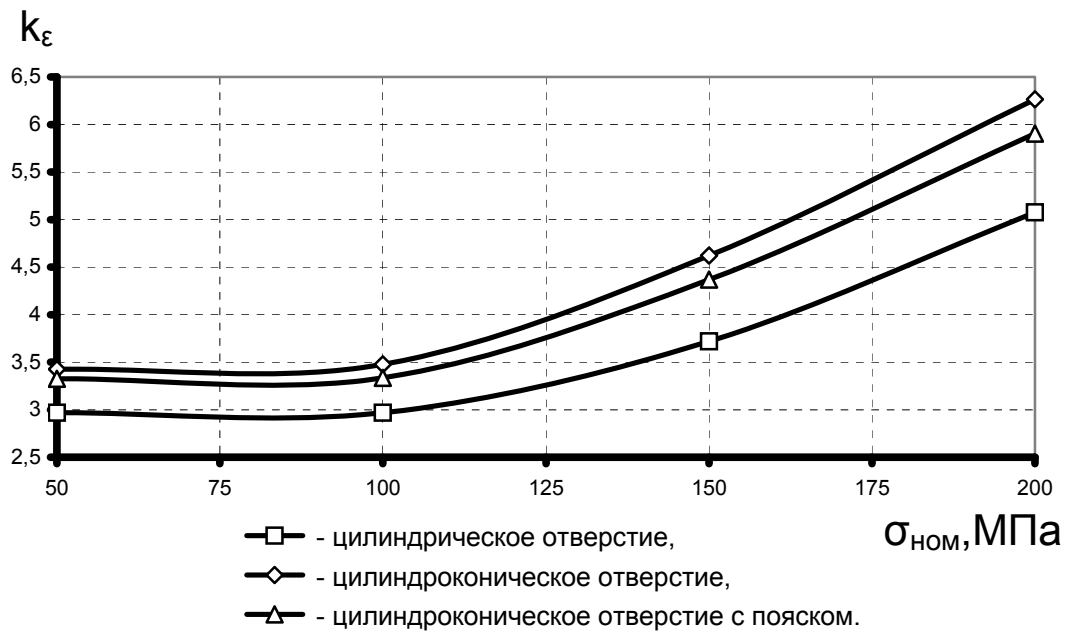


Рисунок 13 - Влияние уровня нагружения и типа отверстия на коэффициент концентрации деформаций k_ϵ

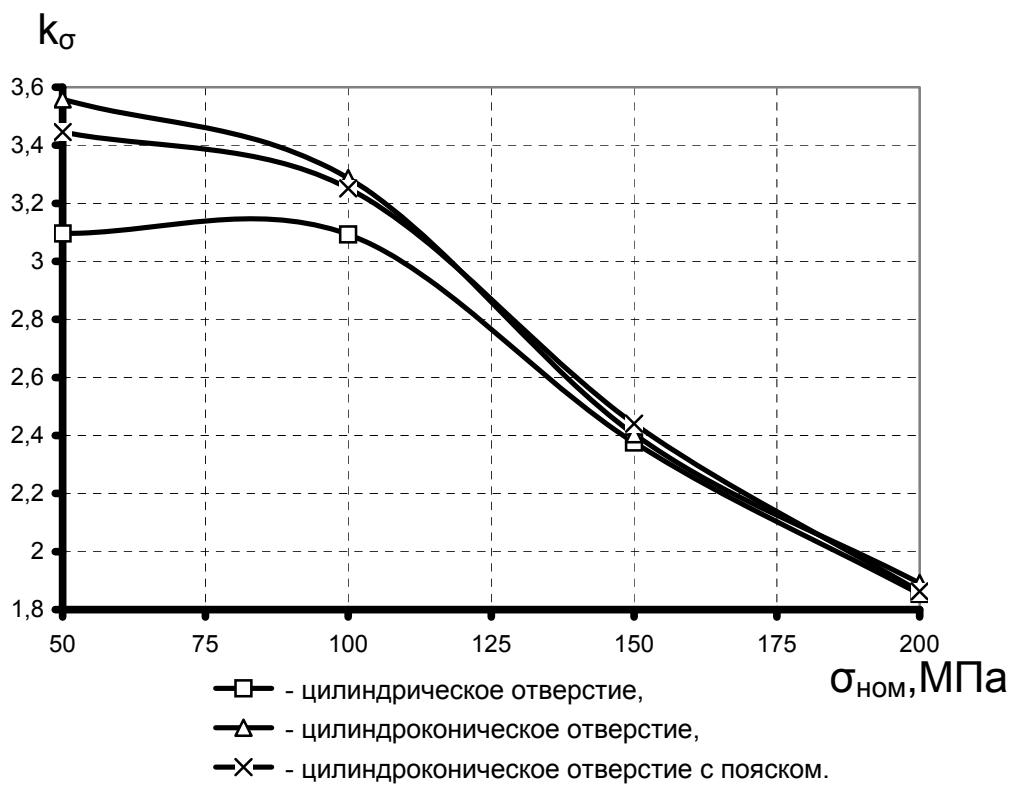


Рисунок 14 - Влияние уровня нагружения и типа отверстия на коэффициент концентрации напряжений k_σ

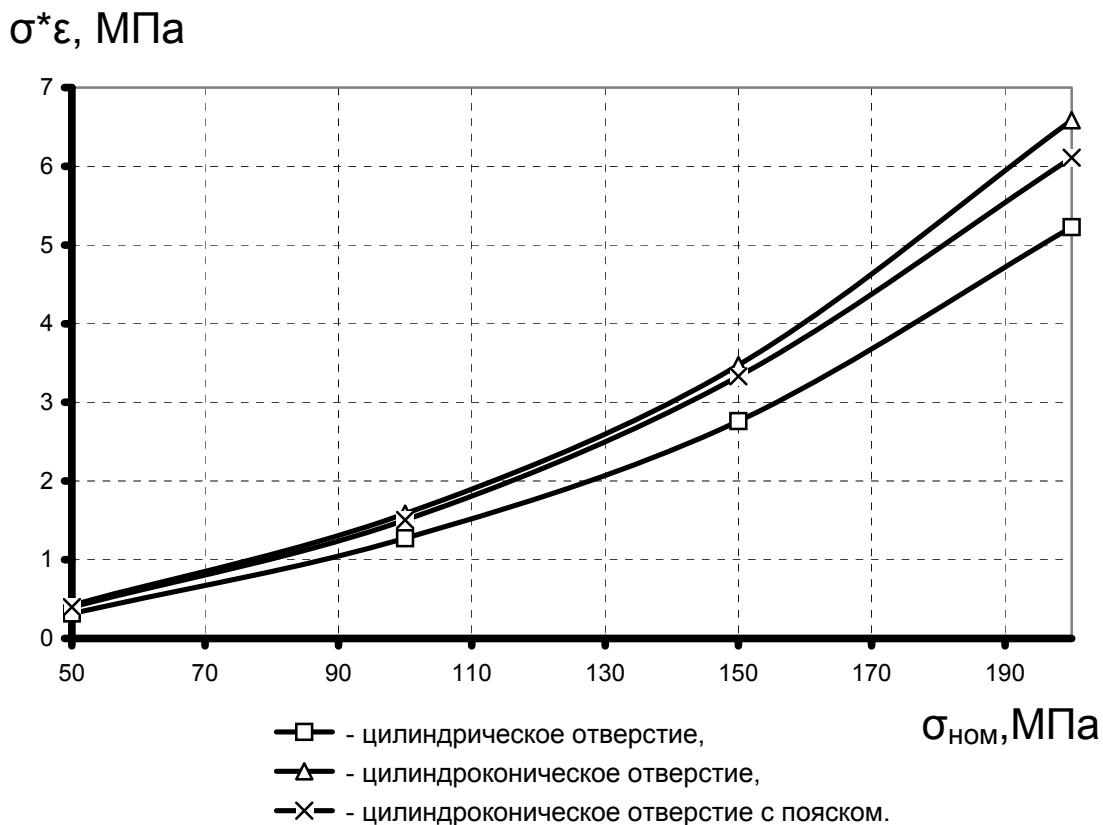


Рисунок 15 - Влияние уровня нагружения и типа отверстия на удельную энергию деформирования $\sigma^*\epsilon$

По результатам расчетов, построены графики зависимости величин характеристик локального НДС k_ϵ , k_σ , $\sigma^*\epsilon$ от величины $\sigma_{НОМ}$ во всех трех случаях (рис. 13 – 15 соответственно).

Проанализировав данные, полученные при расчете, можно сделать вывод: при увеличении уровня нагружения от 50 до 200 МПа в цилиндрическом отверстии k_σ уменьшается от 3,096 до 1,854, k_ϵ увеличивается от 2,966 до 5,076, $\sigma^*\epsilon$ увеличивается от 0,32 до 5,23; в цилиндрикоконическом отверстии k_σ уменьшается от 3,558 до 1,892, k_ϵ увеличивается от 3,427 до 6,264, $\sigma^*\epsilon$ увеличивается от 0,423 до 6,584; в цилиндрикоконическом отверстии с пояском k_σ уменьшается от 3,446 до 1,863, k_ϵ увеличивается от 3,326 до 5,904, $\sigma^*\epsilon$ увеличивается от 0,398 до 6,109.

Исследование влияния глубины зенковки на характеристики локального НДС пластины с цилиндрикоконическим отверстием

Задачей данного расчета является нахождение величины оптимальной глубины зенковки.

Исходные данные

$L = 200$ мм; $B = 60$ мм; $d = 10$ мм; $\delta = 5$ мм; $\beta = 90^\circ$; $H = 0 \dots 3.5$ мм.

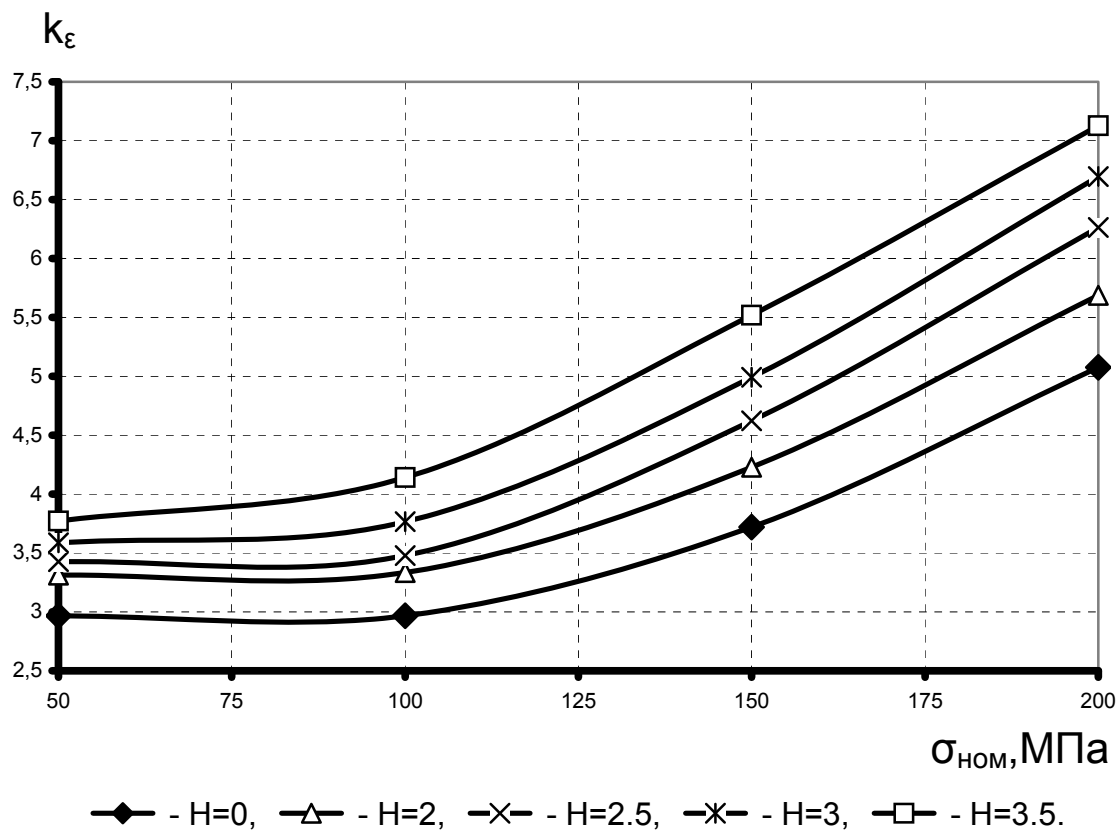


Рисунок 16 - Влияние уровня нагружения и глубины зенковки на коэффициент концентрации деформаций k_ϵ

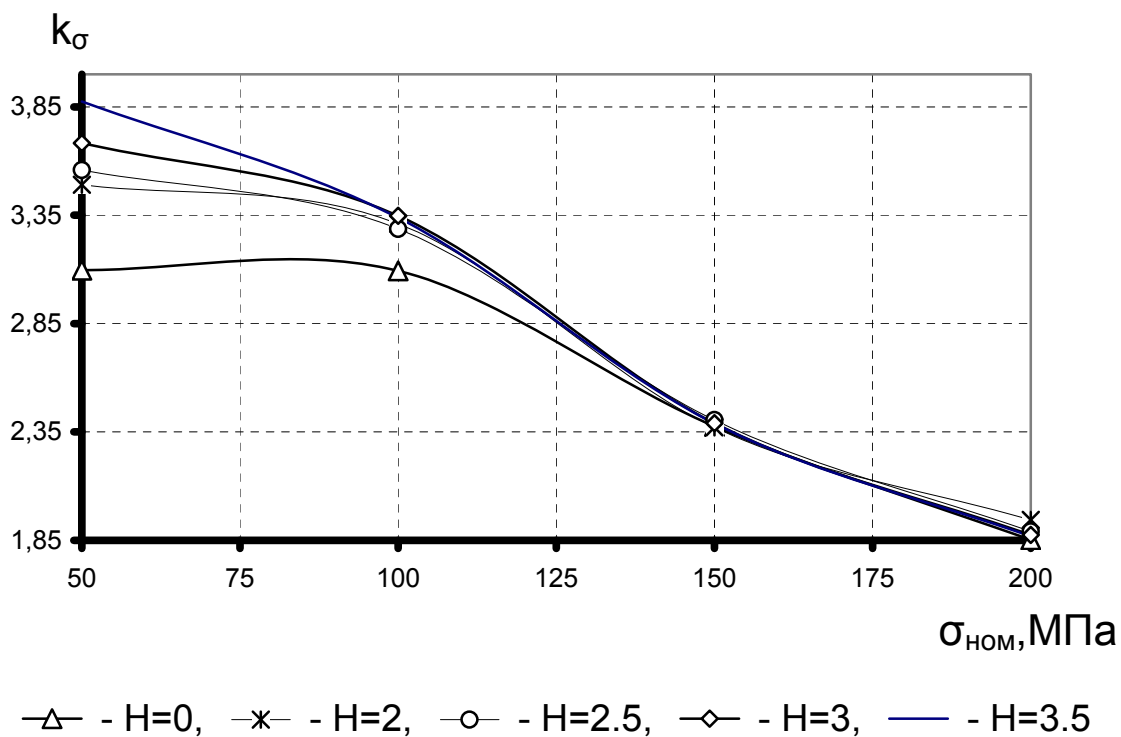


Рисунок 17 - Влияние уровня нагружения и глубины зенковки на коэффициент концентрации напряжений k_σ

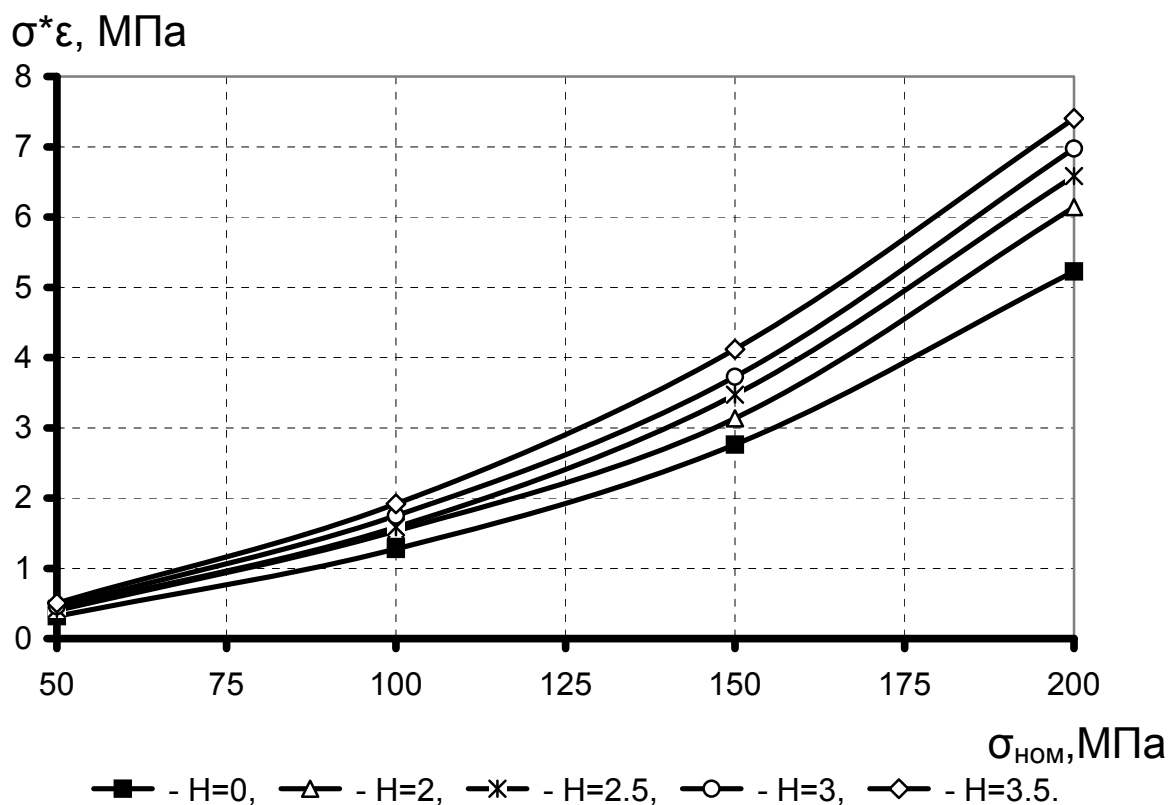


Рисунок 18 - Влияние уровня нагружения и глубины зенковки на удельную энергию деформирования $\sigma^*\epsilon$

По результатам расчетов построены графики зависимости характеристик локального НДС конструкции от глубины зенковки и величины приложенной нагрузки (рис. 16 – 18).

Проанализировав данные, полученные при расчете, можно сделать вывод: при увеличении глубины зенковки от 0 до 3,5 мм при $\sigma_{\text{НОМ}}=100$ МПа ко увеличивается от 3,31 до 3,339, $k\epsilon$ увеличивается от 3,334 до 4,14, $\sigma^*\epsilon$ увеличивается от 1,53 до 1,92.

Исследование влияния угла зенковки на характеристики локального НДС пластины с цилиндрическим отверстием

Задачей данного расчета является нахождение величины оптимального угла зенковки.

Исходные данные

$$L = 200 \text{ мм}; B = 60 \text{ мм}; d = 10 \text{ мм}; \delta = 5 \text{ мм}; H = 2.5 \text{ мм}; \beta = 30 \dots 120^\circ.$$

По результатам расчетов построены графики зависимости характеристик локального НДС конструкции от угла зенковки и величины приложенной нагрузки (рис. 19 - 21).

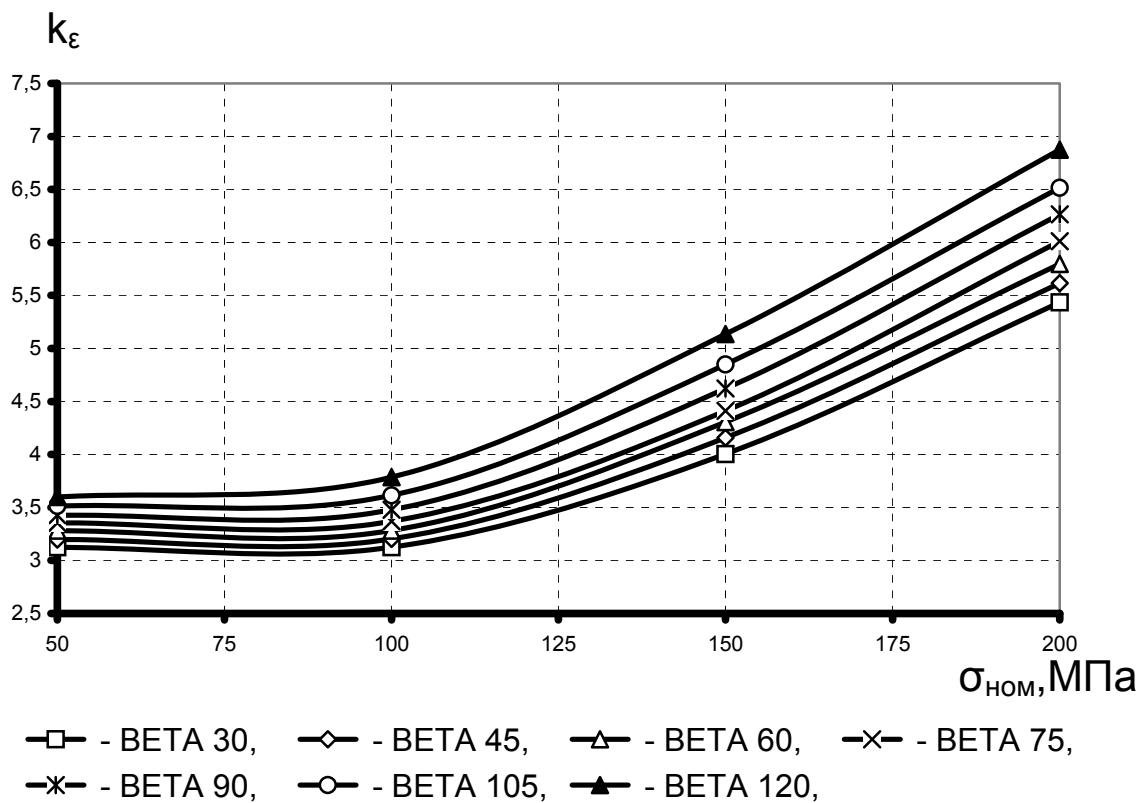


Рисунок 19 - Влияние уровня нагружения и угла зенковки на коэффициент концентрации деформаций k_ϵ

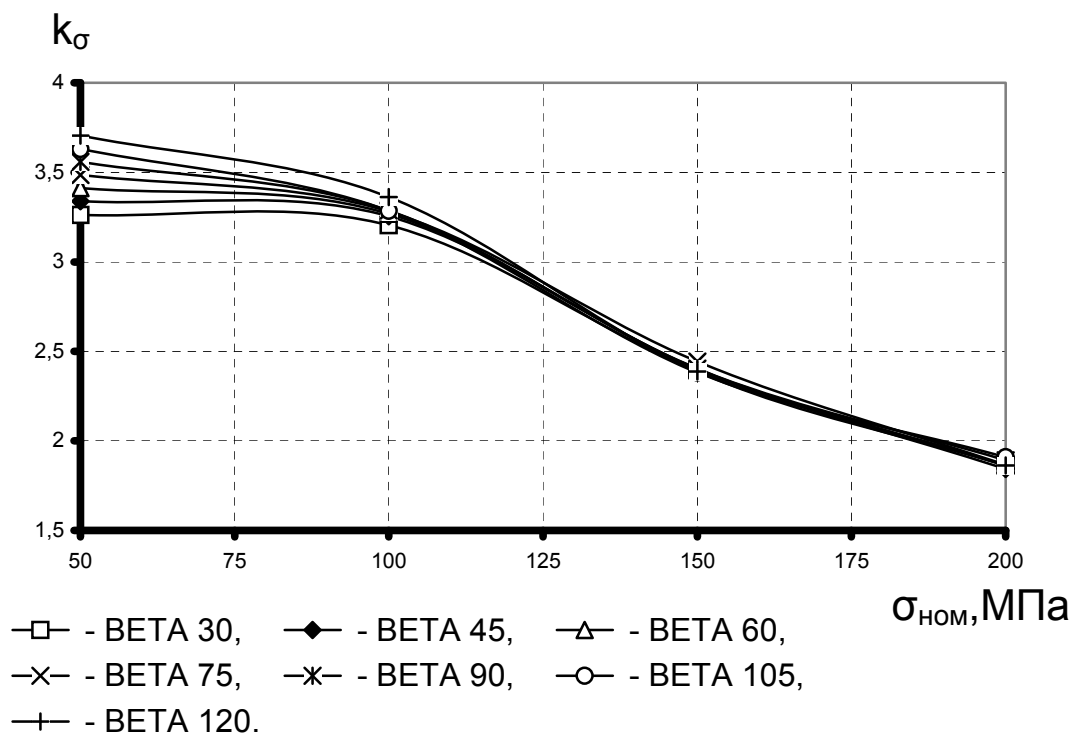


Рисунок 20 - Влияние уровня нагружения и угла зенковки на коэффициент концентрации напряжений k_σ

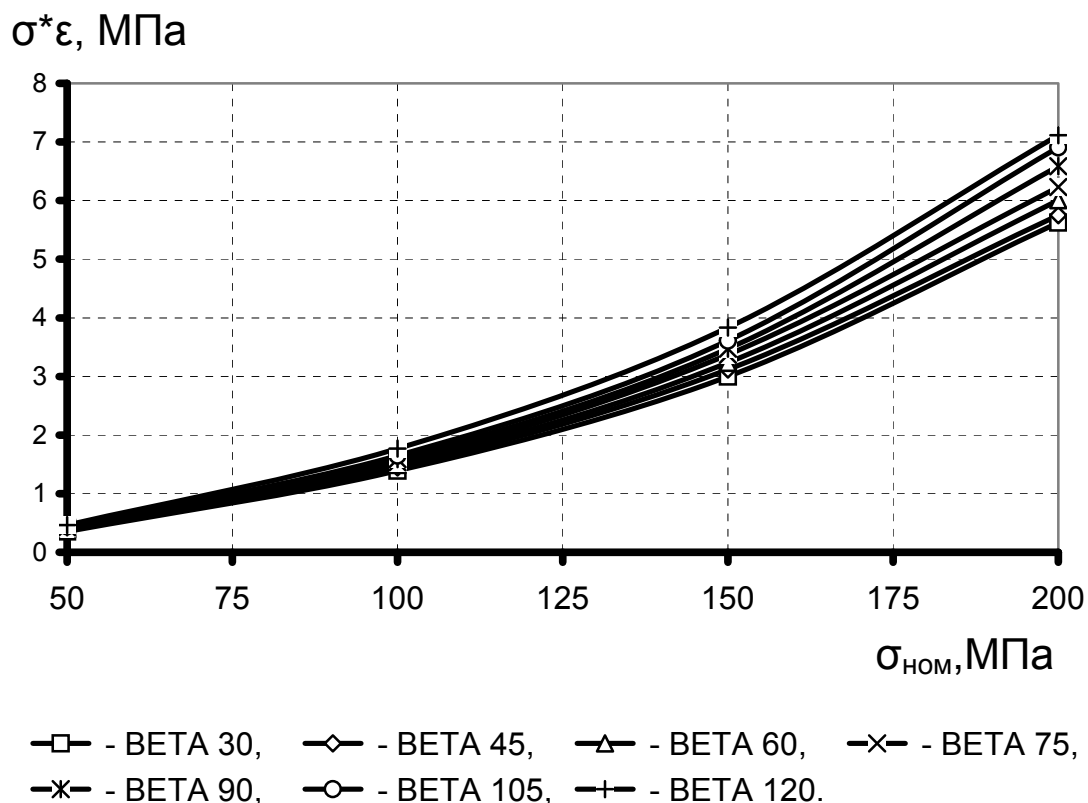


Рисунок 21 - Влияние уровня нагружения и угла зенковки на удельную энергию деформирования $\sigma^*\epsilon$

Проанализировав данные, полученные при расчетах, можно сделать вывод: при увеличении угла зенковки от 30 до 120° при $\sigma_{НОМ}=100$ МПа $k\sigma$ увеличивается от 3,205 до 3,362, $k\epsilon$ увеличивается от 3,125 до 3,79, $\sigma^*\epsilon$ увеличивается от 1,39 до 1,77.

Исследование влияния диаметра цилиндрического пояска на характеристики локального НДС пластины с цилиндрическим отверстием с цилиндрическим пояском

Задачей данного расчета является нахождение величины оптимального диаметра цилиндрического пояска

Исходные данные:

$L = 200$ мм; $B = 60$ мм; $d = 10$ мм; $\delta = 5$ мм; $H = 2.5$ мм; $D = 11 \dots 14$ мм; $\beta = 90^\circ$.

По результатам расчетов построены графики зависимости характеристик локального НДС пластины с цилиндрическим отверстием с цилиндрическим пояском от диаметра цилиндрического пояска и величины приложенной нагрузки (рис.22 -24).

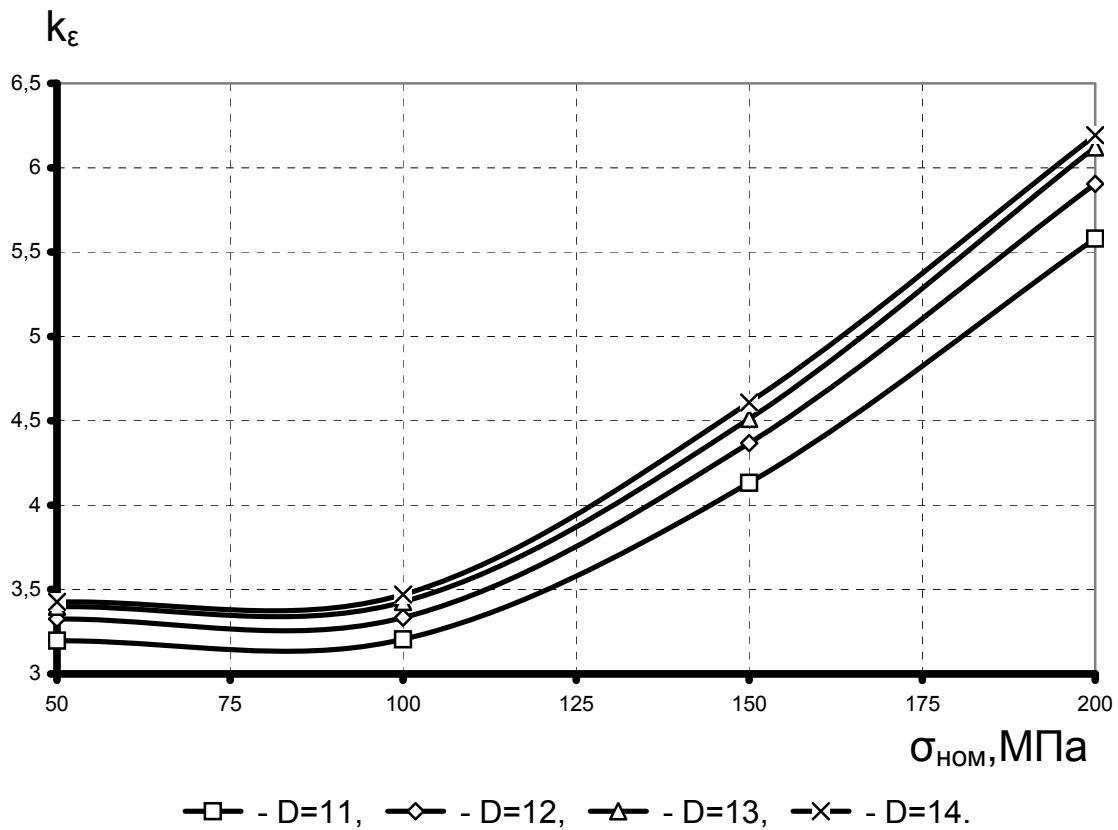


Рисунок 22 - Влияние уровня нагружения и диаметра цилиндрического пояска на коэффициент концентрации деформаций k_ϵ

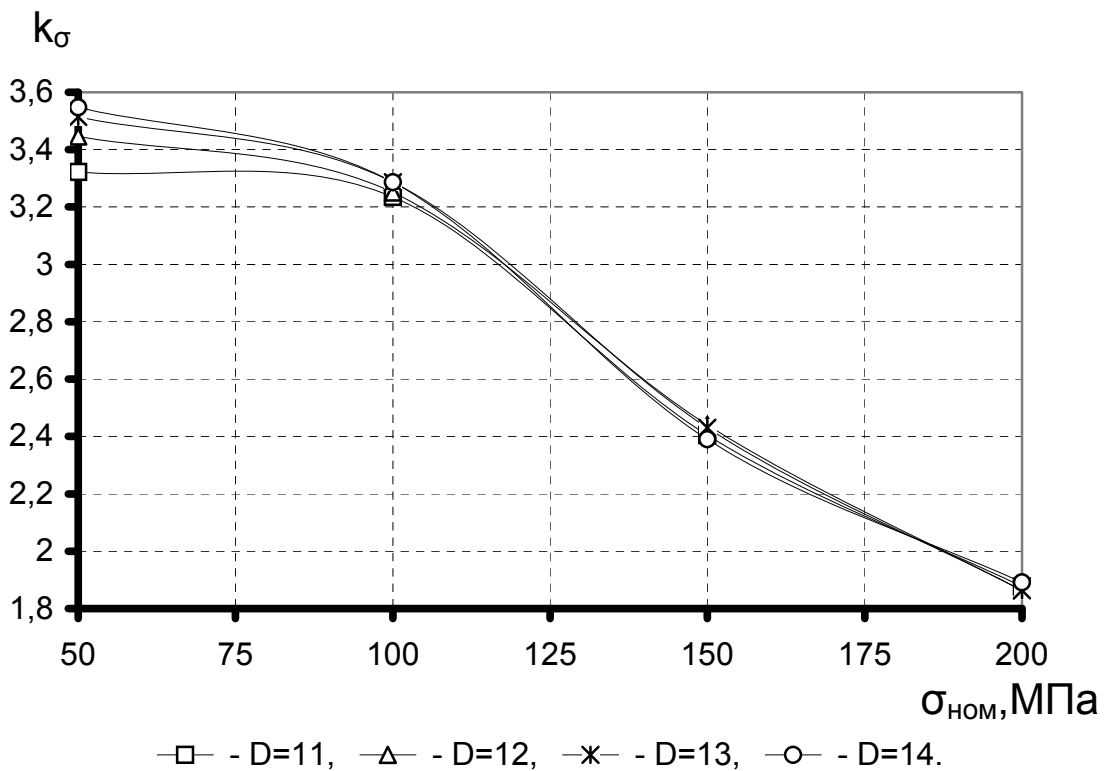


Рисунок 23 - Влияние уровня нагружения и диаметра цилиндрического пояска на коэффициент концентрации напряжений k_σ

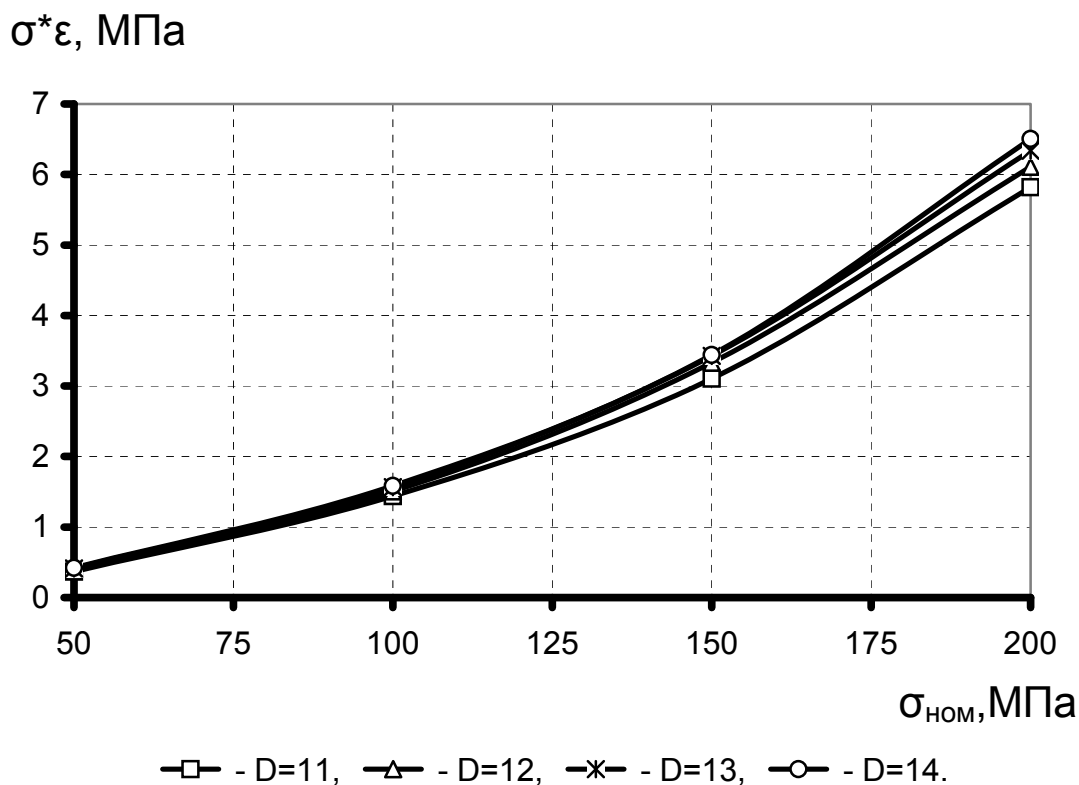


Рисунок 24 - Влияние уровня нагружения и диаметра цилиндрического пояска на удельную энергию деформирования $\sigma^*\epsilon$

Проанализировав данные, полученные при расчетах, можно сделать вывод: при увеличении диаметра цилиндрического пояска от 11 до 14 мм при $\sigma_{НОМ}=100$ МПа $k\sigma$ увеличивается от 3,24 до 3,29, $k\epsilon$ увеличивается от 3,204 до 3,47, $\sigma^*\epsilon$ увеличивается от 1,44 до 1,58.

Выводы

Разработан метод расчета НДС пластины с функциональным отверстием в системе MSC/Nastran.

Проанализированы возможности системы MSC/Nastran по расчету нелинейных статических задач методом конечных элементов.

Определено влияние конструктивных параметров пластины с отверстием различного типа на характеристики локального НДС.

Полученные результаты расчета являются основой для прогнозирования характеристик сопротивления усталости конструктивных элементов с отверстиями.

Список литературы

1.Гребеников А.Г., Дыбский П.А., Даниленко О.Г. Исследование концентрации напряжений в пластине с цилиндрическим отверстием методом конечных элементов в системе ANSYS 5.3. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Нац. аэрокосм. Ун-т «ХАИ». – Вып.1

2.Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC.visualNASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2004, - 704с.

3. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций.- Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 532 с.