

Анализ влияния геометрических параметров гнезда под установку прогрессивной потайной заклепки АНУ0348 на характеристики локального НДС в пластине с зенкованным отверстием

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

Проведен анализ влияния высоты и угла конусности пояска модифицированного зенкованного отверстия на характеристики локального НДС пластины с гнездом под установку прогрессивной потайной заклепки АНУ0348.

Ключевые слова: пластина с зенкованным отверстием, потайное гнездо, угол конусности пояска зенковки, высота пояска зенкованного отверстия, характеристики НДС, коэффициент концентрации, удельная энергия деформирования.

С точки зрения усталостной долговечности авиационных конструкций наибольшую опасность представляют концентраторы напряжений, возникающие в местах соединений потайными заклепками. Усталостные трещины в потайных заклепочных соединениях образуются, как правило, на контуре отверстий под крепежный элемент. Образование усталостных трещин обусловлено высоким уровнем локальных напряжений (концентрацией напряжений) в этих зонах [2].

Одним из способов повышения усталостной долговечности и ресурса заклепочных соединений элементов авиационных конструкций является применение прогрессивных потайных заклепок с компенсаторами для уменьшения отрицательного влияния потайных гнезд под закладные головки заклепок на характеристики усталостной долговечности соединений [3].

Целью данной работы является исследование влияния геометрических параметров потайного гнезда под установку потайной заклепки на характеристики локального НДС в пластине с зенкованным отверстием. В работе разработан метод анализа характеристик локального НДС пластины с модифицированным гнездом под установку прогрессивной потайной заклепки с компенсатором АНУ0348, не требующей фрезерования закладных головок после клепки [4]. Модификация гнезда заключается в замене цилиндрического пояска зенкованного отверстия, выполненного зенковкой 61905 согласно ТИ 36-21-86, коническим пояском для обеспечения требуемого качества внешней поверхности соединения и герметичности без уменьшения статической прочности и усталостной долговечности соединения.

Объект исследования – пластина из Д16АТ толщиной 2 мм (рис. 1) с зенкованным отверстием (рис. 2) под установку потайной заклепки диаметром 4 мм.

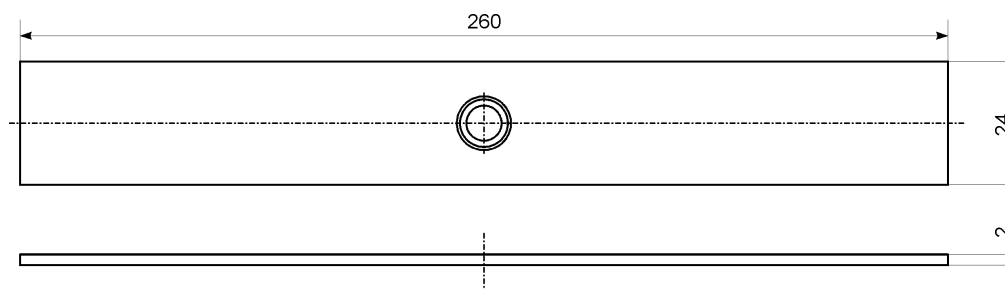


Рис. 1. Геометрические параметры пластины с зенкованным отверстием

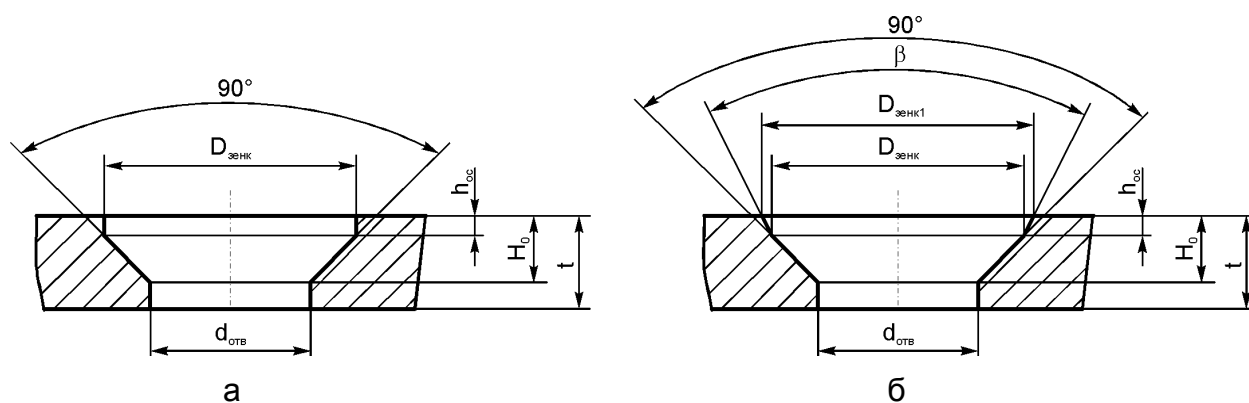


Рис. 2. Форма и геометрические параметры исследуемого зенкованного отверстия:

а — зенкованное отверстие, выполненное по ТИ 36-21-86;

б — модифицированное зенкованное отверстие под установку потайной заклепки АНУ0348

В работе рассмотрено влияние двух параметров: β — угла конусности пояска зенкованного отверстия и h_{oc} — высоты пояска зенкованного отверстия на характеристики локального НДС пластины.

Величины исследуемых геометрических параметров гнезда представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исследуемые геометрические параметры зенкованного отверстия

β , град	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
h_{oc} , мм	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5		

В качестве метода исследования выбран метод конечных элементов, реализованный в системе инженерного анализа ANSYS [5], хорошо зарекомендовавшей себя для решения задач механики деформируемого твердого тела.

Для определения влияния геометрических параметров потайного гнезда на параметры НДС пластины была разработана расчетная схема исследуемого образца. Учитывая геометрическую и силовую симметрию образца, а также изотропность свойств материала, из которого он изготовлен, моделировалась 1/4 часть модели. При этом действие отброшенных частей компенсировалось заданием соответствующих граничных условий симметрии. Расчетная схема пластины с зенкованым отверстием показана на рис. 3.

Согласно разработанной расчетной схеме с помощью системы ANSYS [5] была сформирована конечно-элементная модель пластины с зенкованым отверстием (рис. 4) из 8-узловых 3D элементов SOLID185, представленных в системе, которые в полной мере удовлетворяют условиям решаемой задачи. Для адекватной аппроксимации градиентов напряжений и деформаций в исследуемой зоне зенкованного отверстия была сформирована сетка размером 0,15 мм.

Расчеты проводились при уровнях растягивающих напряжений в сечении брутто 25, 50, 100, 125 и 150 МПа с последующей разгрузкой исследуемого образца пластины с зенкованым отверстием.

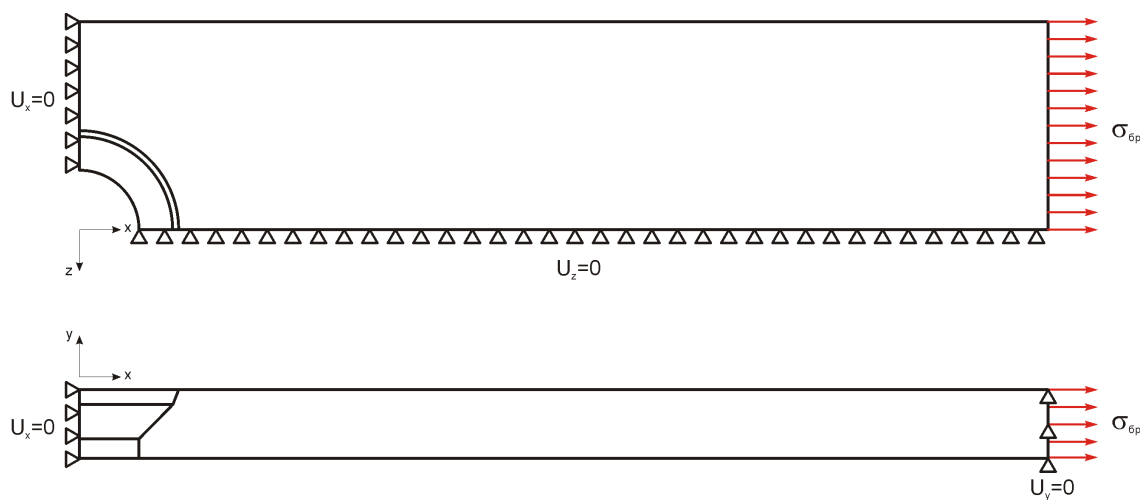
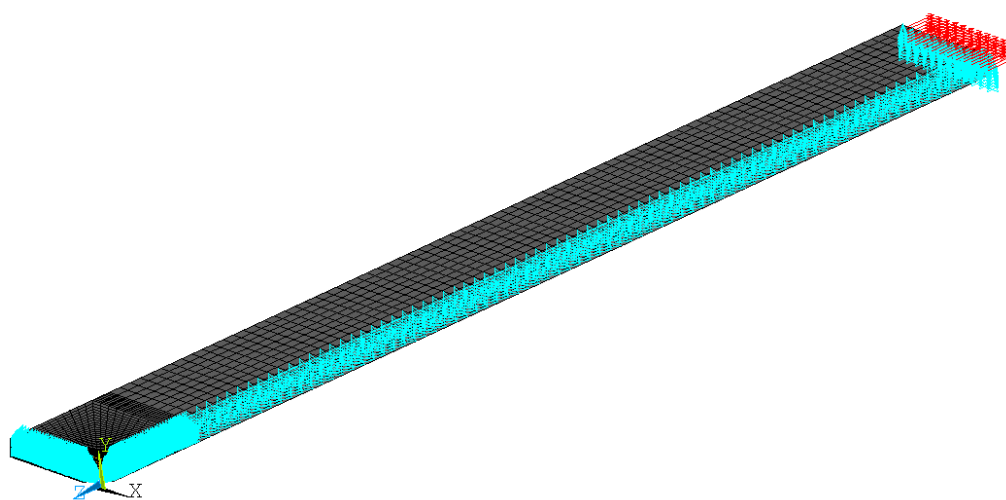
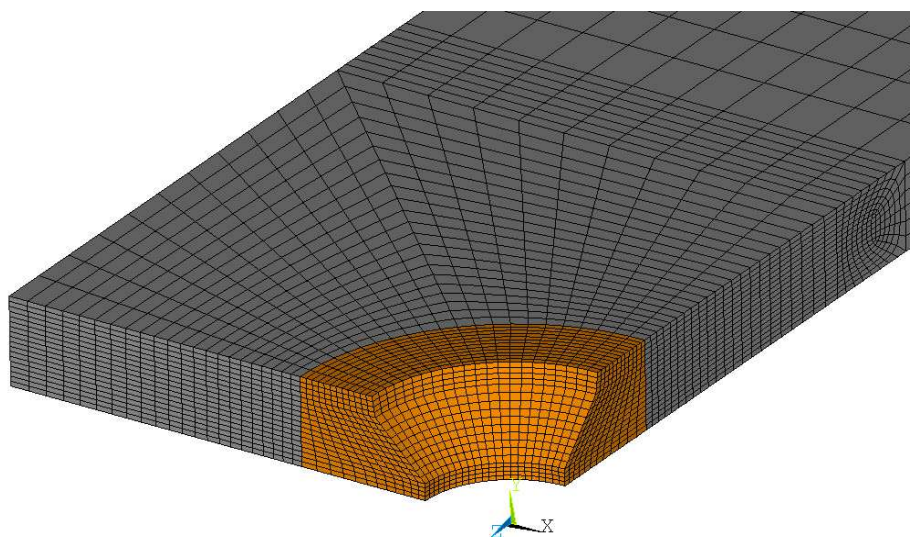


Рис. 3. Расчетная схема пластины с зенкованным отверстием



а



б

Рис. 4. Конечно-элементная модель пластины с зенкованным отверстием

При выборе модели поведения материала учитывали величины расчетных нагрузок, действующих на образец. Поскольку при данных уровнях нагрузок в локальных зонах образца возникают пластические деформации, то для описания закона поведения материала была выбрана полилинейная упругопластическая модель материала с кинематическим законом упрочнения. Кривая деформирования алюминиевого сплава Д16АТ [1] показана на рис. 5.

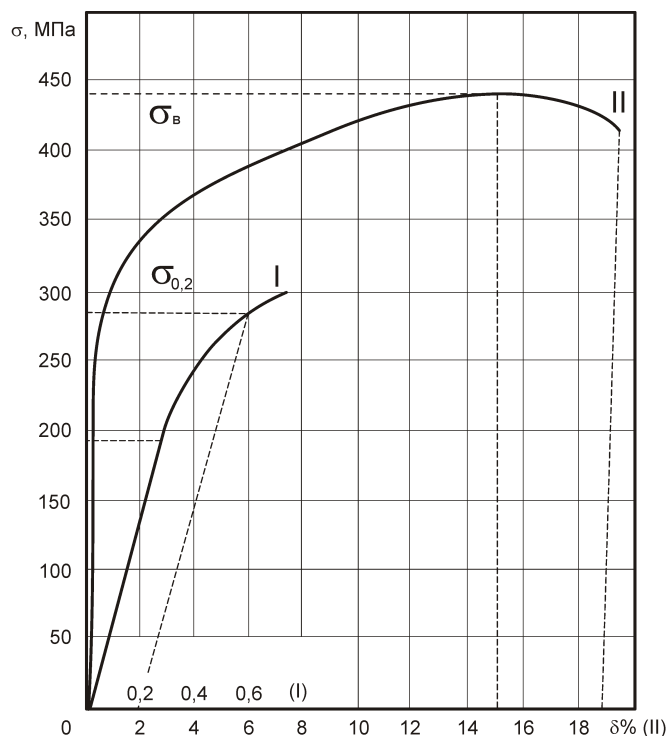


Рис. 5. Кривая деформирования алюминиевого сплава Д16АТ

Согласно результатам усталостных испытаний образцов пластин с цилиндрическим отверстием в ходе выполнения анализа влияния геометрических параметров зенкованного отверстия на характеристики НДС пластины рассматривались две зоны концентрации напряжений:

- 1) зона, расположенная на пересечении пояса зенковки с конической поверхностью зенкованного отверстия;
- 2) зона, находящаяся на пересечении цилиндрической поверхности отверстия и конической поверхности зенковки.

Эти зоны являются зонами вероятного усталостного разрушения из-за наличия геометрического концентратора напряжений. В них главные растягивающие напряжения и деформации достигают своего максимального значения, что подтверждают результаты расчета.

В качестве параметров, характеризующих локальное НДС, в указанных зонах были выбраны:

- 1) σ_1 – главные растягивающие напряжения;
- 2) $\varepsilon_{1упр}$ – главные растягивающие деформации (упругая составляющая);
- 3) w_1 – удельная энергия деформирования.

Анализ выбранных параметров, характеризующих локальное НДС пластины, проводился в сечении, перпендикулярном линии действия растягивающих усилий и проходящим через центр зенкованного отверстия.

На рис. 6 – 8 показан характер распределения главных растягивающих напряжений в рассматриваемых образцах, характеризующих локальное НДС в исследуемых зонах зенкованного отверстия.

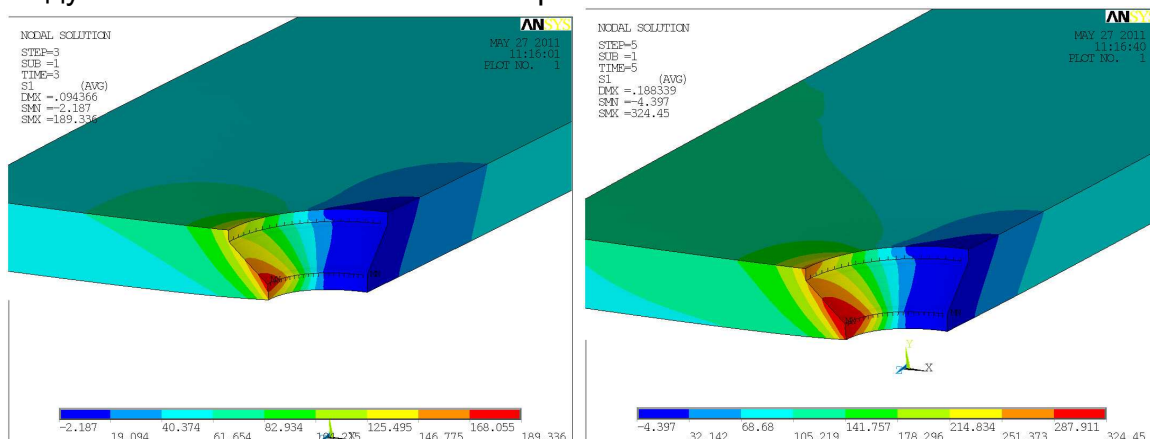


Рис. 6. Характер распределения главных растягивающих напряжений в пластине с высотой цилиндрического пояaska зенковки $h_{oc}=0,35$ мм

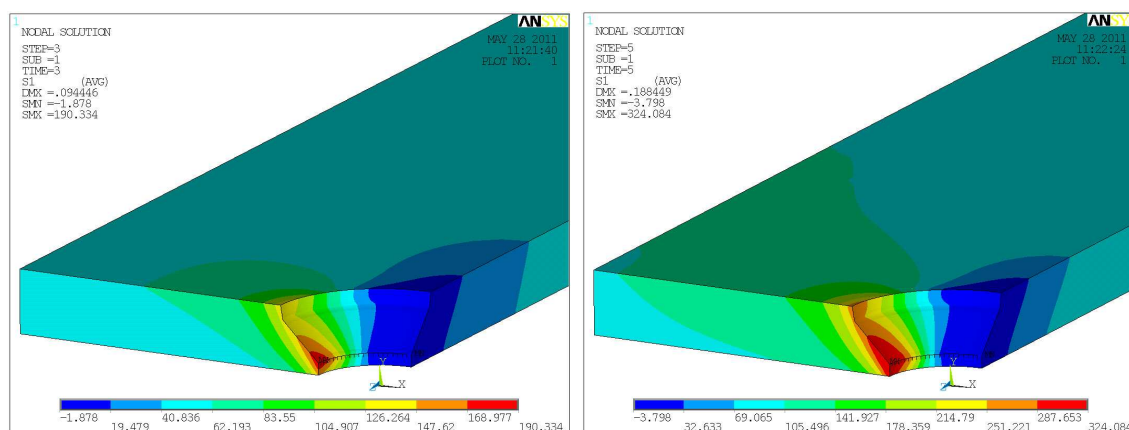


Рис. 7. Характер распределения главных растягивающих напряжений в пластине с модифицированным коническим пояaskом зенковки с углом конусности $\beta=20^\circ$ и высотой $h_{oc}=0,45$ мм

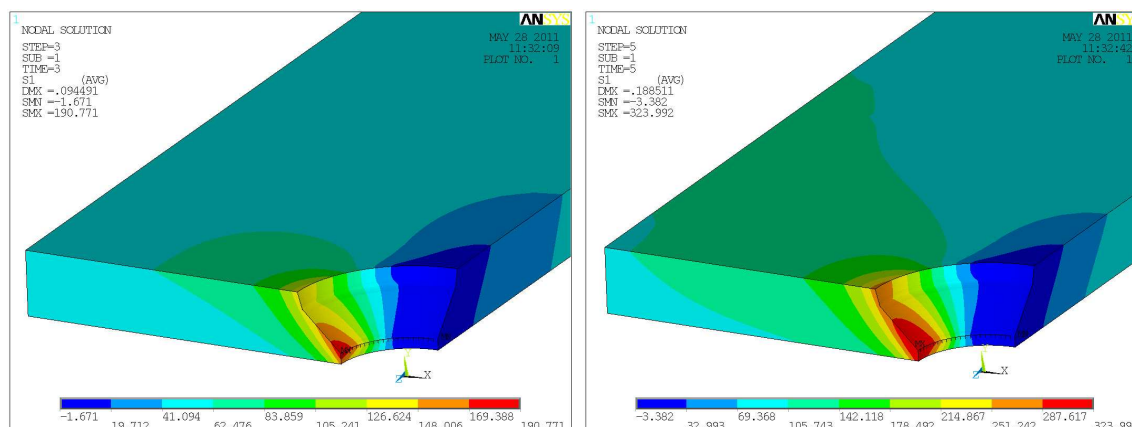


Рис. 8. Характер распределения главных растягивающих напряжений в пластине с модифицированным коническим пояaskом зенковки с углом конусности $\beta=30^\circ$ и высотой $h_{oc}=0,5$ мм

В процессе выполнения работы определены параметры локального НДС в сечении по оси отверстия для всех сочетаний исследуемых геометрических параметров зенковки с цилиндрическим и модифицированным пояском. Полученные параметры были приведены к отнулевому циклу нагружения с помощью формулы Одингга [2] для вычисления значений эквивалентного отнулевого цикла:

$$\sigma_{1\max}^0 = \sqrt{2\sigma_1^a \cdot \sigma_1^{\text{нагр}}}, \quad \varepsilon_{1\max}^0 = \sqrt{2\varepsilon_1^a \cdot \varepsilon_1^{\text{нагр}}}. \quad (1)$$

Удельная энергия деформирования эквивалентного отнулевого цикла определялась из соотношения

$$W_{1\max}^0 = \frac{\sigma_{1\max}^0 \cdot \varepsilon_{1\max}^0}{2}. \quad (2)$$

Проанализировано влияние угла конусности пояска зенкованого отверстия и его высоты на изменение коэффициента концентрации напряжений и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла по контуру зенкованого отверстия исследуемой пластины при различных уровнях нагружения (см. рис. 9 – 12).

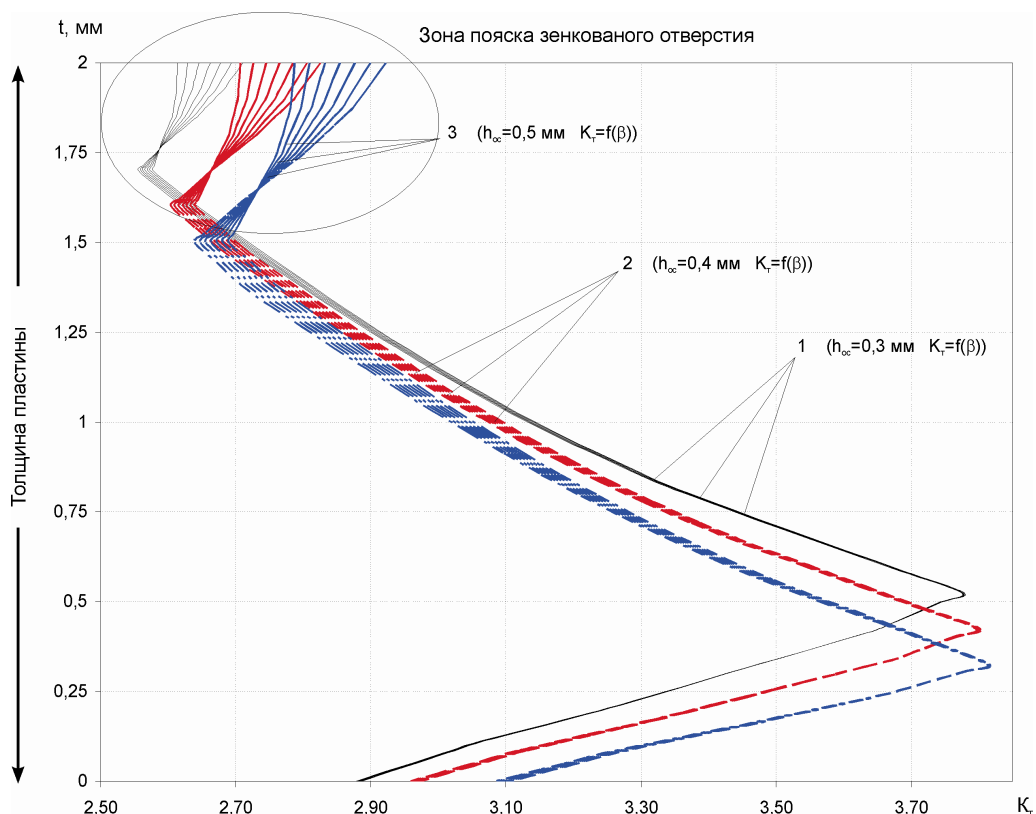


Рис. 9. Характер распределения коэффициента концентрации напряжений по контуру зенкованого отверстия при различных углах конусности пояска зенкованого отверстия и уровне нагружения 50 МПа:

- 1 — семейство кривых $K_T(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,3 мм;
- 2 — семейство кривых $K_T(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,4 мм;
- 3 — семейство кривых $K_T(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,5 мм

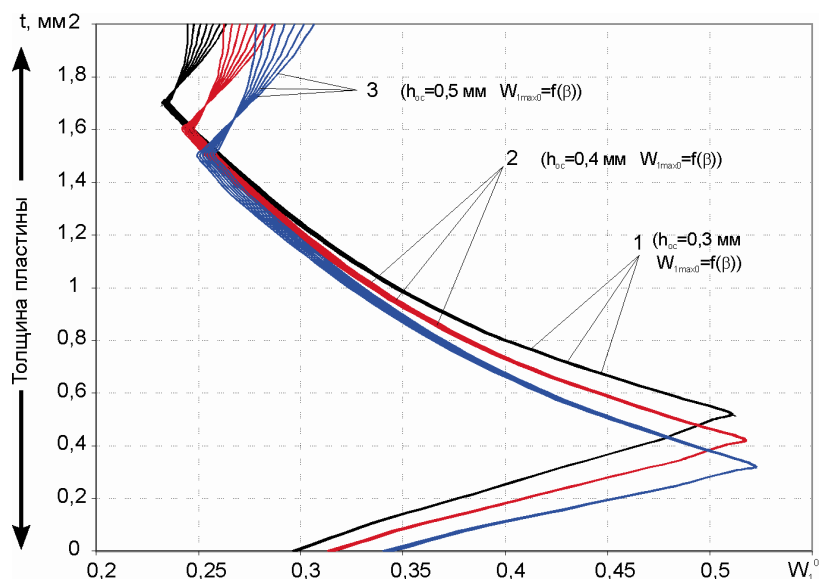


Рис. 10. Характер распределения удельной энергии деформирования по контуру зенкованного отверстия при различных углах конусности пояска зенкованного отверстия и уровне нагружения 50 МПа:

- 1 — семейство кривых $W_1^0(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,3 мм
- 2 — семейство кривых $W_1^0(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,4 мм
- 3 — семейство кривых $W_1^0(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,5 мм

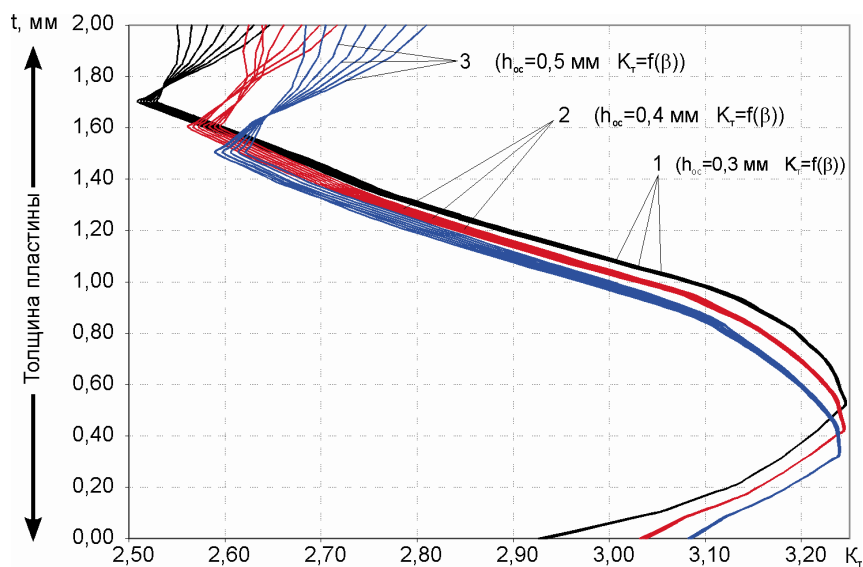


Рис. 11. Характер распределения коэффициента концентрации по контуру зенкованного отверстия при различных углах конусности пояска зенкованного отверстия и уровне нагружения 100 МПа:

- 1 — семейство кривых $K_t(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,3 мм
- 2 — семейство кривых $K_t(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,4 мм
- 3 — семейство кривых $K_t(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,5 мм

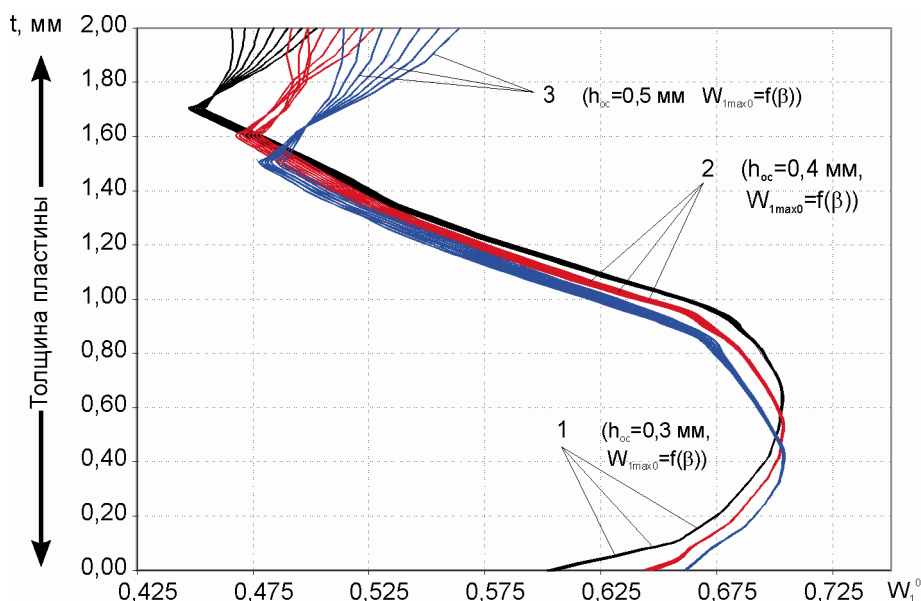


Рис. 12. Характер распределения удельной энергии деформирования по контуру зенкованого отверстия при различных углах конусности пояска зенкованого отверстия и уровне нагружения 100 МПа:

- 1 — семейство кривых $W_1^0(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,3 мм
- 2 — семейство кривых $W_1^0(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,4 мм
- 3 — семейство кривых $W_1^0(\beta)$ при диапазоне угла конусности β от 0 до 30° и высоте пояска зенковки 0,5 мм

На основе анализа полученных результатов определены максимальные значения коэффициента концентрации K_{Tmax} и удельной энергии деформирования W_{1max0} в зоне пояска зенкованого отверстия при различных уровнях нагрузки.

На рис. 13 – 20 показаны зависимости максимальных значений коэффициента концентрации и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла от угла конусности β и высоты пояска зенковки h_{oc} в зоне пояска зенкованного отверстия при уровнях нагружения 50 и 100 МПа.

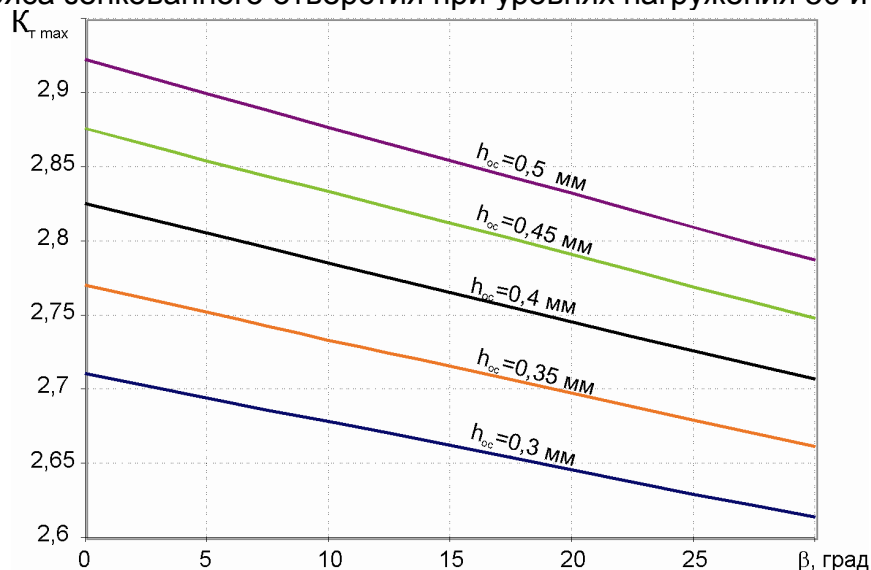


Рис. 13. Влияние угла конусности β на K_{Tmax} при различных значениях высоты пояска зенкованого отверстия и уровне нагружения образца 50 МПа

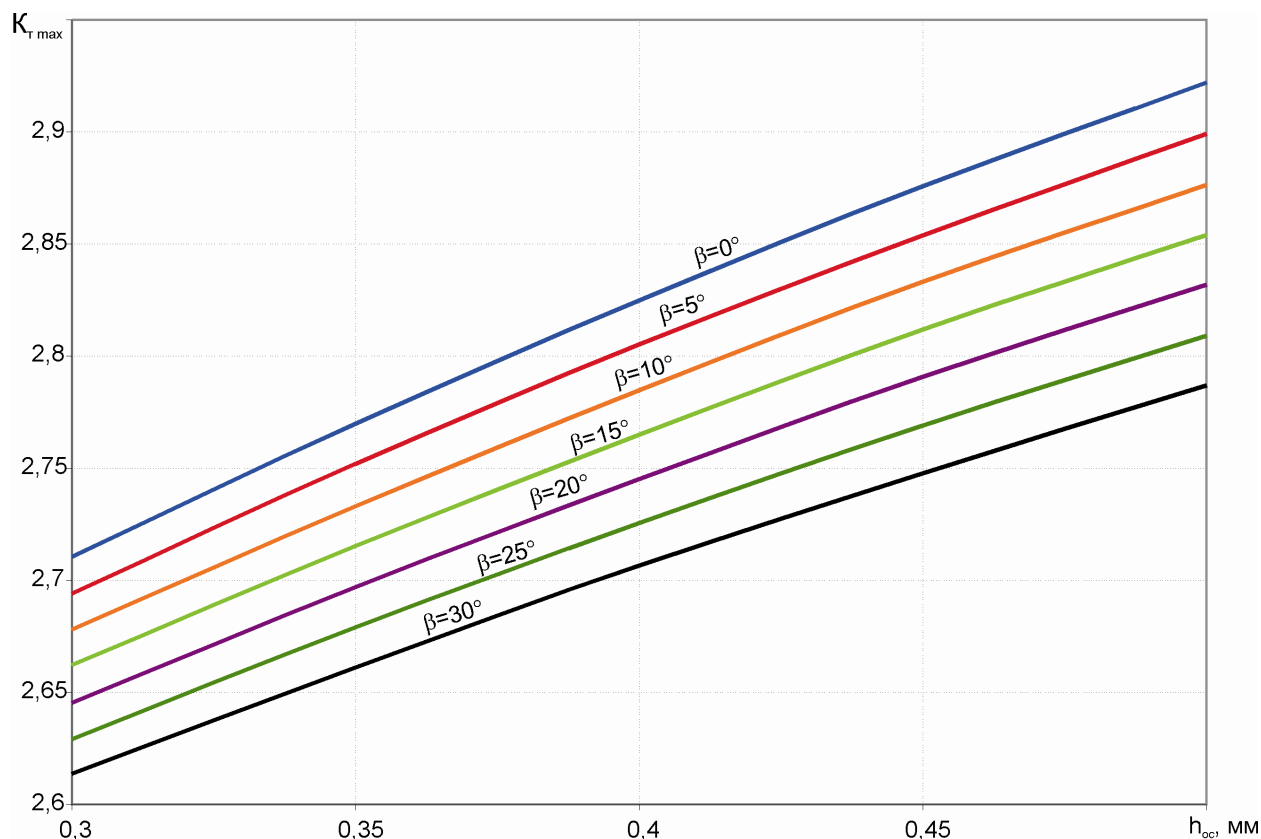


Рис. 14. Влияние высоты пояска зенкованного отверстия на K_{Tmax} при различных значениях угла конусности β и уровне нагружения образца 50 МПа

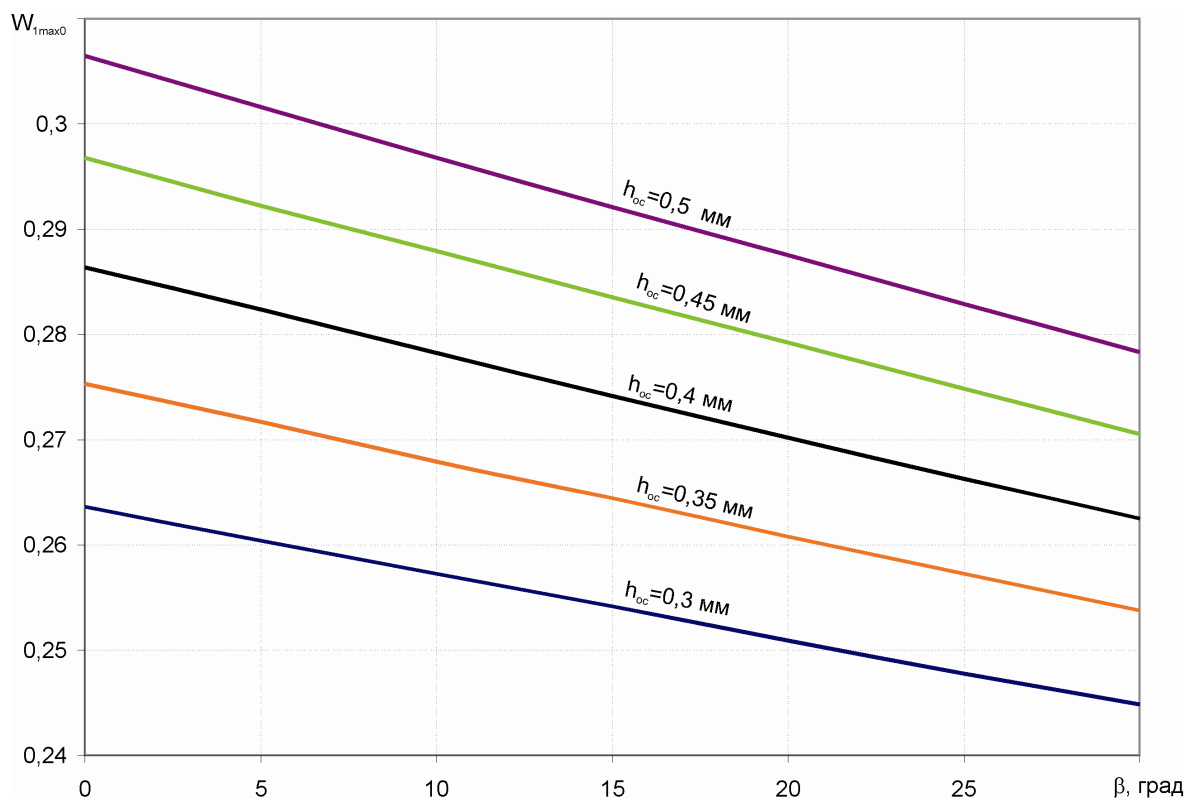


Рис. 15. Влияние угла конусности β на W_{1max0} при различных значениях высоты пояска зенкованного отверстия и уровне нагружения образца 50 МПа

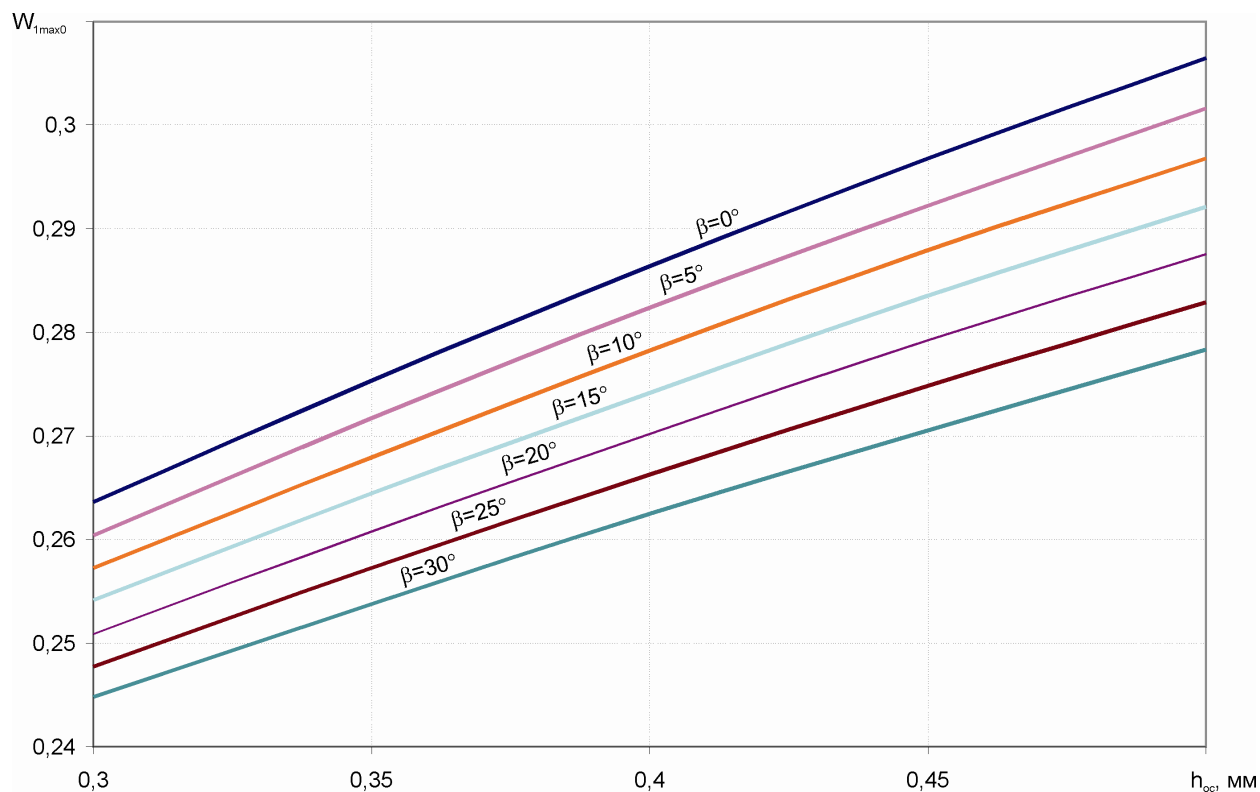


Рис. 16. Влияние высоты пояска зенкованного отверстия W_{1max0} при различных значениях угла конусности β и уровне нагружения образца 50 МПа

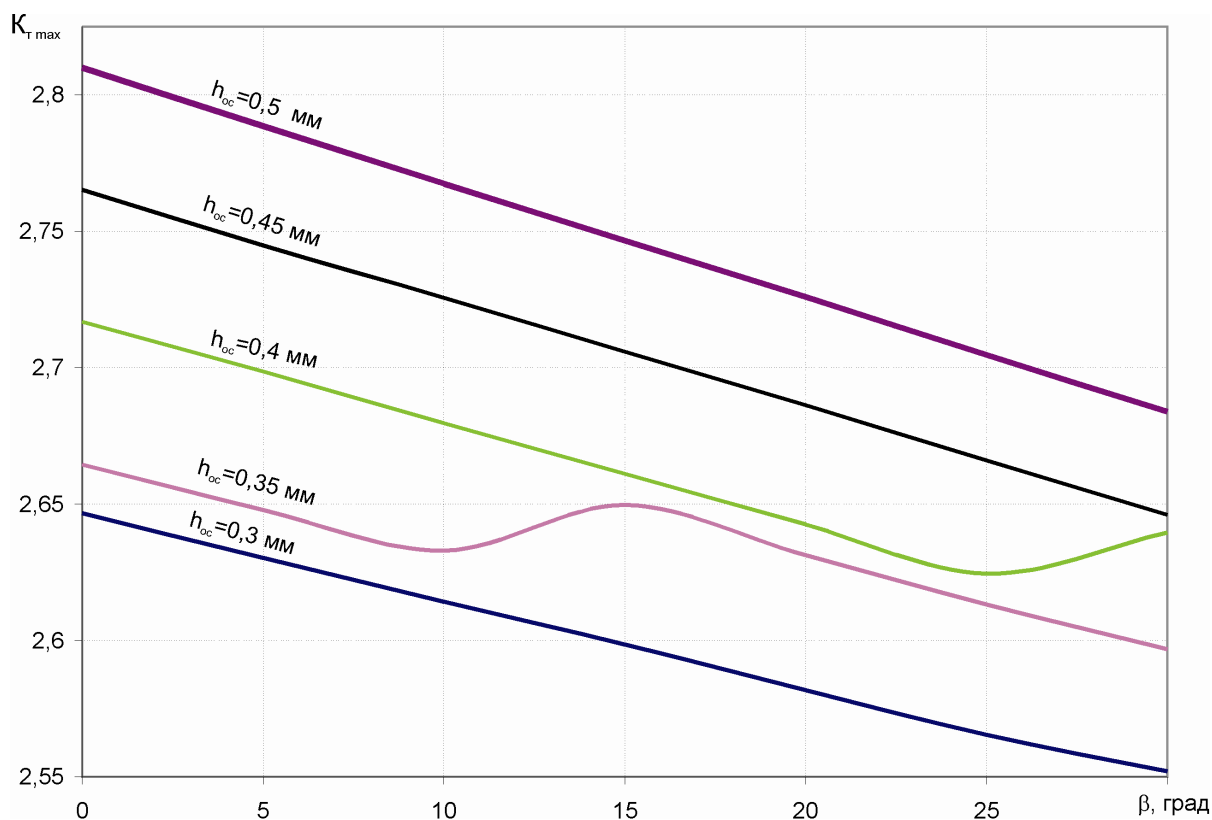


Рис. 17. Влияние угла конусности β на K_{Tmax} при различных значениях высоты пояска зенкованного отверстия и уровне нагружения образца 100 МПа

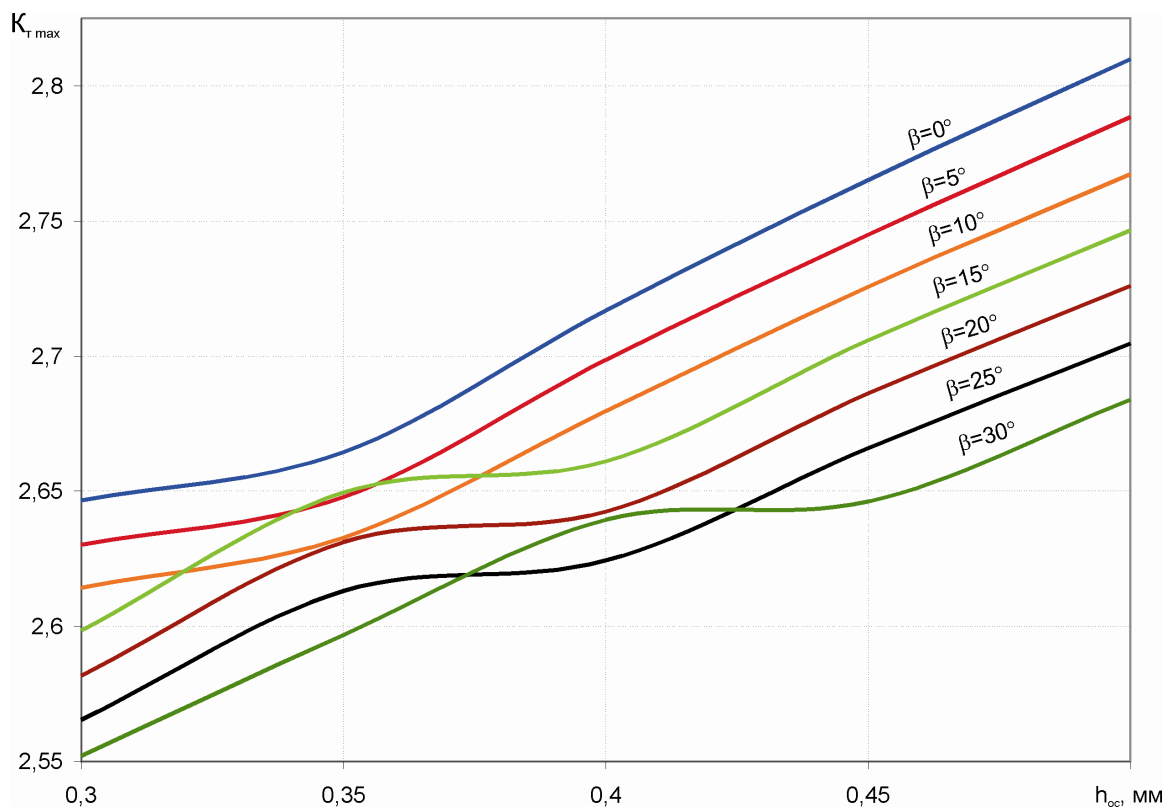


Рис. 18. Влияние высоты пояска зенкованного отверстия на $K_{тmax}$ при различных значениях угла конусности β и уровне нагружения образца 100 МПа

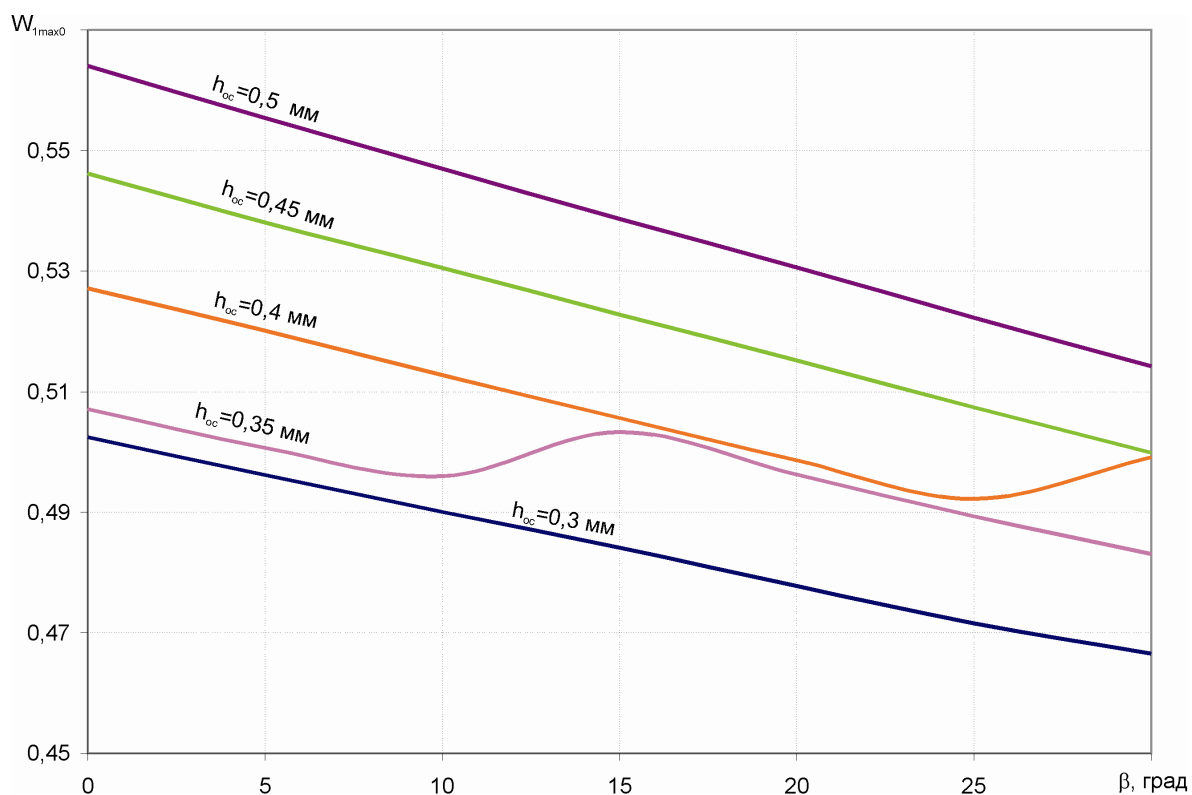


Рис. 19. Влияние угла конусности β на W_{1max0} при различных значениях высоты пояска зенкованного отверстия и уровне нагружения образца 100 МПа

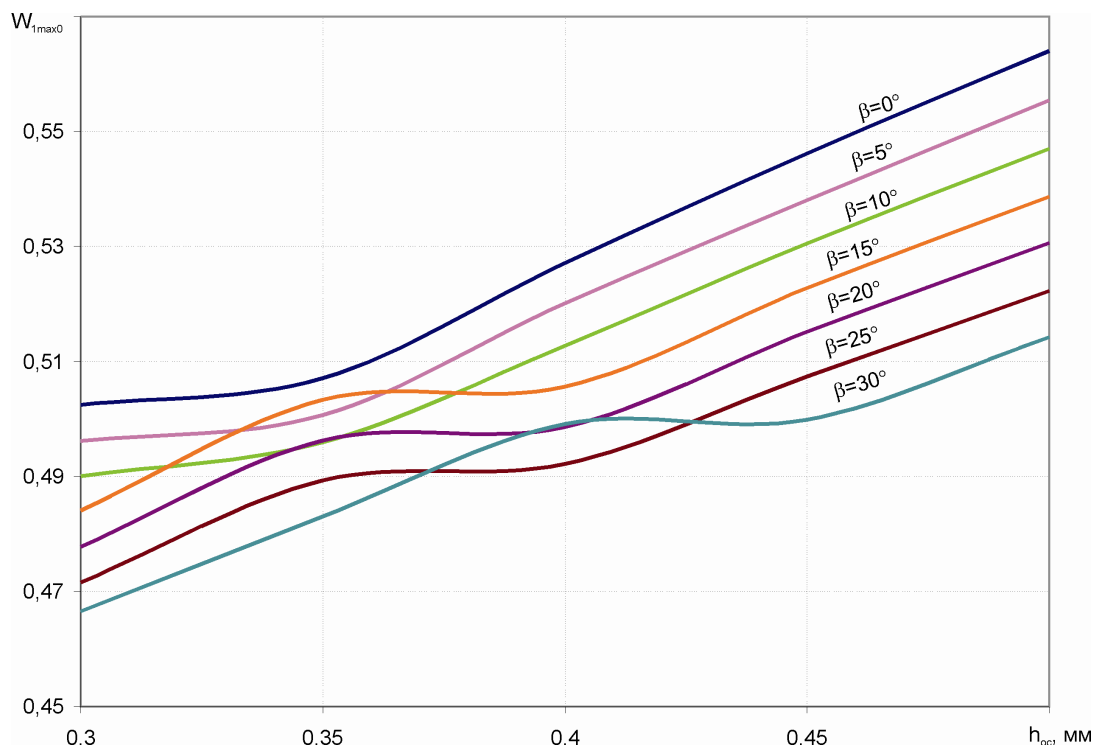


Рис. 20. Влияние высоты пояса зенкованого отверстия W_{1max0} при различных значениях угла конусности β и уровне нагружения образца 100 МПа

На рис. 21 – 22 изображены зависимости максимальных значений удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла от уровня нагружения при различных значениях угла конусности β и высоты пояса зенковки (0,35 мм и 0,5 мм) в зоне модифицированного пояса зенковки.

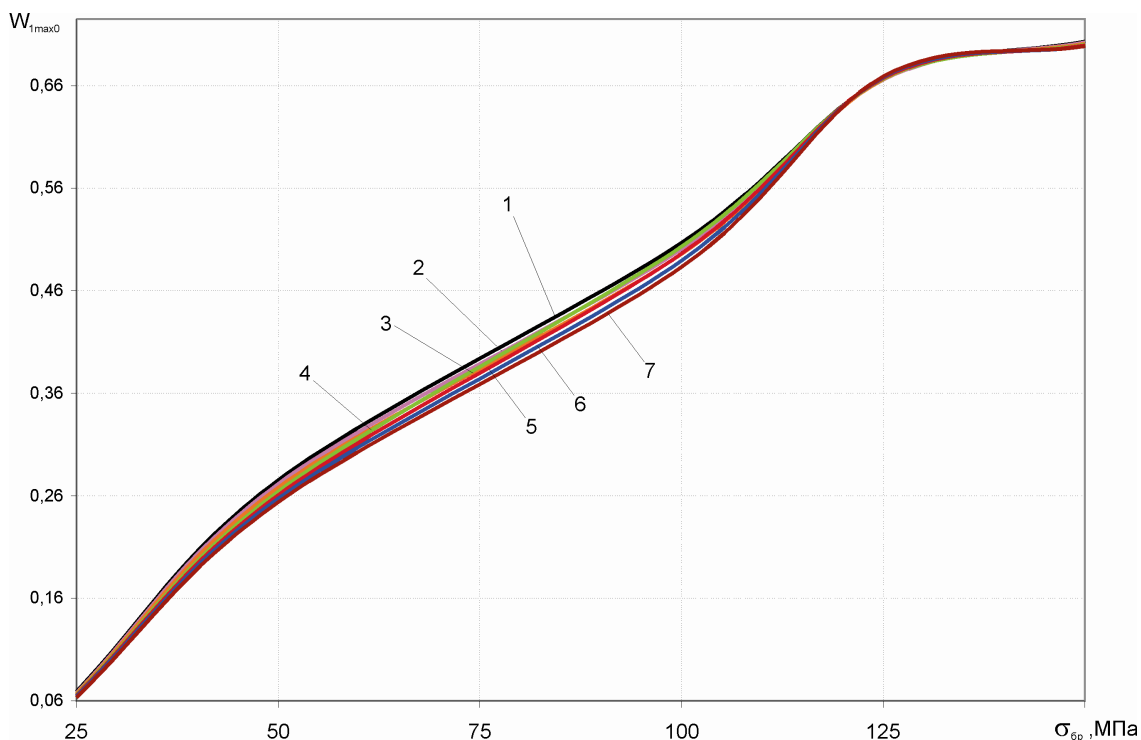


Рис. 21. Влияние уровня нагружения на максимальные значения удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла при различных значениях угла конусности β и высоты пояса зенкованого отверстия 0,35 мм

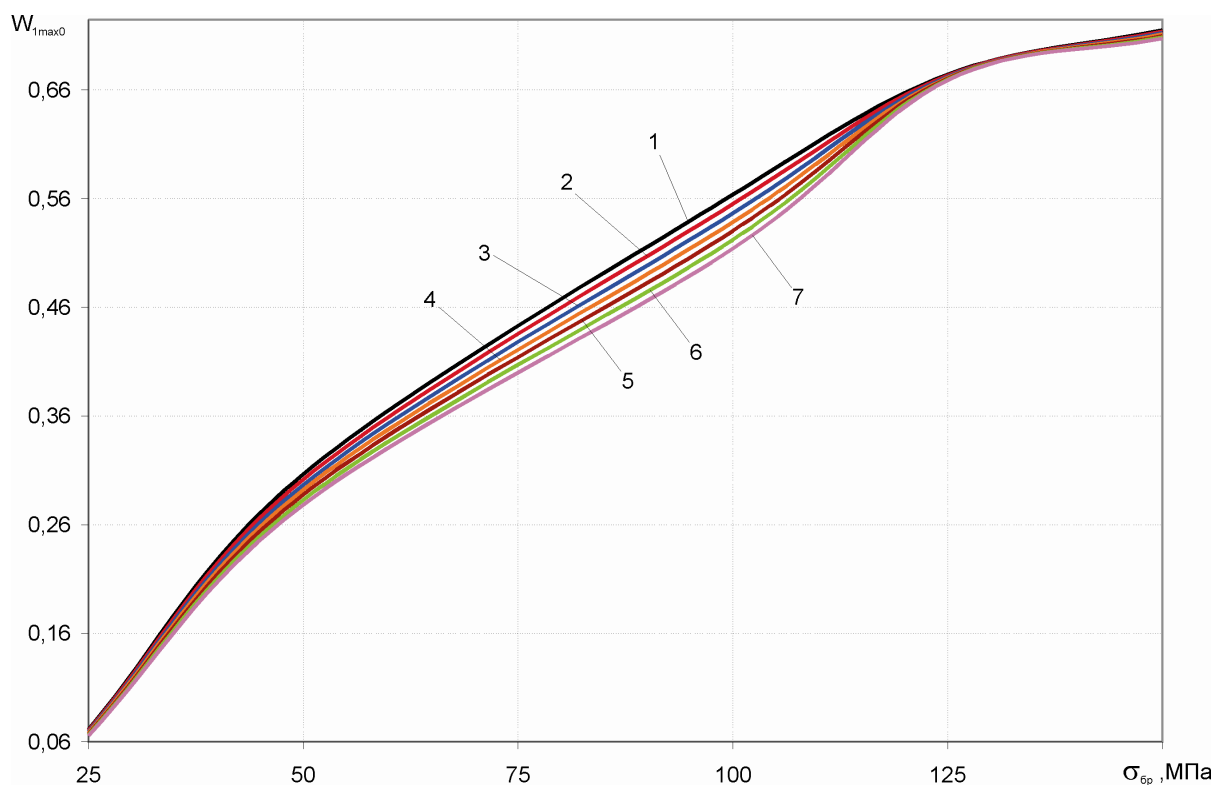


Рис. 22. Влияние уровня нагружения на максимальные значения удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла при различных значениях угла конусности β и высоты пояска зенкованного отверстия 0,5 мм

Анализ полученных результатов показал, что в зонах вероятного усталостного разрушения наблюдается концентрация напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования. Определено, что в зоне, расположенной на пересечении цилиндрической поверхности отверстия и конической поверхности зенковки, данные значения достигают своего максимума. Расчеты показали, что изменение высоты и угла конусности пояска модифицированного зенкованного отверстия не влияет на положение и максимальные значения коэффициента концентрации и удельной энергии деформирования в рассматриваемом сечении пластины.

В то же время определено, что значения коэффициента концентрации и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в зоне, расположенной на пересечении конической поверхности зенковки и модифицированного пояска зависят от значений исследуемых геометрических параметров модифицированного пояска зенкованного отверстия. Определено, что максимальные значения коэффициента концентрации и удельной энергии деформирования возрастают при увеличении высоты пояска зенкованного отверстия и уменьшаются при увеличении угла конусности пояска для всех случаев нагружения.

Результаты проведенных исследований рекомендуется использовать при разработке потайного гнезда с модифицированным пояском для установки прогрессивной потайной заклепки с компенсатором АНУ0348.

Выводы

1. Разработан метод анализа влияния геометрических параметров гнезда под установку прогрессивной потайной заклепки АНУ0348 на характеристики локального НДС в пластине с зенкованым отверстием.

2. Проведен анализ влияния высоты h_{oc} и угла конусности β пояска модифицированного зенкованого отверстия на характеристики локального НДС пластины с гнездом под установку прогрессивной потайной заклепки АНУ0348.

3. Определено, что геометрические параметры модифицированного пояска зенкованого отверстия не влияют на положение и величину максимального коэффициента концентрации и максимальное значение удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла всего сечения исследуемой пластины на всех уровнях нагружения.

4. Анализ полученных результатов показал, что в исследуемой зоне, расположенной на пересечении конической поверхности зенковки и модифицированного пояска, характеристики НДС существенно зависят от геометрических параметров пояска зенкованого отверстия на всех уровнях нагружения образца.

5. Максимальное значение коэффициента концентрации напряжений в диапазоне изменения высоты пояска от 0,3 до 0,5 мм при рассматриваемом диапазоне углов конусности от 0° до 30° и уровнях нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 25, 50$ и 100 МПа уменьшается в 1,037...1,048 раза соответственно, при уровнях нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 125, 150$ МПа – в 1,003...1,007 раза соответственно.

6. Максимальное значение коэффициента концентрации напряжений в диапазоне изменения угла конусности от 0° до 30° при рассматриваемом диапазоне высот пояска зенковки от 0,3 до 0,5 мм и уровнях нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 25, 50$ и 100 МПа возрастает в 1,066...1,078 соответственно, при уровнях нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 125, 150$ МПа – в 1,009...1,018 раза соответственно.

7. Максимальное значение удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в диапазоне изменения высоты пояска от 0,3 до 0,5 мм при рассматриваемом диапазоне углов конусности от 0° до 30° и уровнях нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 25, 50$ и 100 МПа уменьшается в 1,077...1,101 раза соответственно, при уровнях нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 125, 150$ МПа – в 1,004...1,011 раза соответственно.

8. Максимальное значение удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в диапазоне изменения угла конусности от 0° до 30° при рассматриваемом диапазоне высот пояска зенковки от 0,3 до 0,5 мм и уровнях нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 25, 50$ и 100 МПа возрастает в 1,102...1,163 раза соответственно, при уровнях нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 125, 150$ МПа – в 1,002...1,024 раза соответственно.

9. Максимальное значение удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла при постоянной высоте пояска в рассматриваемом диапазоне изменения угла конусности от 0° до 30° , в диапазоне уровней нагружения от 25 до 150 МПа возрастает от 4 до 10 раз соответственно для всего диапазона углов конусности модифицированного пояска зенковки.

Список литературы

1. Авиационные материалы: в 8 т. / под общ. ред. д-ра техн. наук Р.Е. Шалина. – М.: ОНТИ, 1982. – Т.4: Алюминиевые и бериллиевые сплавы. – 627 с.

2. Воробьев А.З., Б.И. Олькин, В.Н. Стебнев и др. Соппротивление усталости элементов конструкций / Воробьев А.З., Б.И. Олькин, В.Н. Стебнев и др.– М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
3. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций / А.Г. Гребеников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 532 с.
4. Кива Д.С. Разработка прогрессивной потайной заклепки с коническим компенсатором для выполнения соединений силовых элементов крыла. Кива Д.С., Бычков С.А., Гребеников А.Г., Василевский Е.Т., Дмитренко Д.Ю. // Открытые информационные и компьютерные технологии: Вып. 37.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2007. - С. 183 - 201.
5. ANSYS Analysis Guide. Structural Analysis Guide. Chapter 8. Nonlinear structural analysis. 001087. 4th Edition. SAS IP©.

Рецензент: кандидат технических наук, доцент Василевский Е.Т.,
Государственное предприятие «АНТОНОВ»

Поступила в редакцию 18.02.11

Аналіз впливу геометричних параметрів гнізда під встановку прогресивної потайної заклепки АНУ0348 на характеристики локального НДС в пластині із зенкованим отвором

Проведено аналіз впливу висоти і кута конусності пояса модифікованого зенкованого отвору на характеристики локального НДС пластини з гніздом під установку прогресивної потайної заклепки АНУ0348.

Ключові слова: пластина з зенкованим отвором, потайне гніздо, кут конусності пояса зенковки, висота пояса зенкованого отвору, характеристики НДС, коефіцієнт концентрації, питома енергія деформування.

Analysis of geometry influence of socket intended for installation of advanced countersunk rivet АНУ0348 upon characteristics of local deformation mode of plate having enlarged hole

The analysis concerning influence of height and taper angle of fascia of modified enlarged hole upon characteristics of local mode of deformation of plate with socket intended for installation of advanced countersunk rivet АНУ0348 was done.

Keywords: plate with enlarged hole, countersunk socket, taper angle of fascia, enlarged hole fascia height, characteristics of local mode of deformation, concentration factor, deformation specific energy.