

УДК 629.7.02

Е. Т. Василевский, А. Г. Гребеников, А. М. Гуменный,
С. П. Светличный, В. Ф. Семенов

Метод определения влияния конструктивно-технологических параметров на характеристики локального НДС пластины с отверстием при нагружении ее сдвигом

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,
Государственное предприятие «Антонов»*

Показано, что для пластины с отверстием при нагружении ее сдвигом в диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 50 до 200 МПа применение кольцевого обжатия на глубину 0,3 мм способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 2,2 – 1,03 раза. При этом величины максимальных главных растягивающих деформаций и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла уменьшаются в 1,8 – 1,03 раза и 3,9 – 1,05 раза соответственно.

Ключевые слова: чистый сдвиг, метод конечных элементов, локальное напряженно-деформированное состояние, главные растягивающие напряжения эквивалентного отнулевого цикла, удельная энергия деформирования

В конструкции планера самолета стенки лонжеронов, шпангоутов и нервюр нагружаются сдвигом. В них выполняют отверстия различного диаметра и функционального назначения, в зоне которых возникает концентрация напряжений и деформаций (рис. 1). Для прогнозирования усталостной долговечности в зоне отверстий необходимо определить характеристики локального НДС в этих конструктивных элементах.

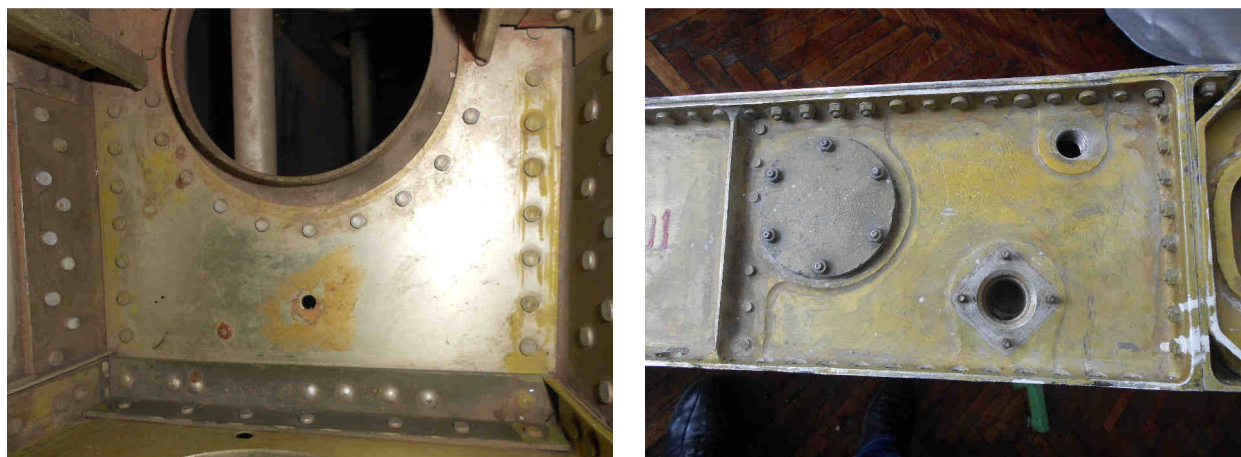


Рис. 1. Функциональные отверстия в конструктивных элементах планера самолета

Целью работы является исследование влияния диаметра отверстия и глубины двухстороннего обжатия на характеристики локального НДС пластины с отверстием в условиях сдвига. Объектом исследования является квадратная пластина с центральным отверстием толщиной 5 мм, нагруженная по контуру сдвигающими усилиями (рис. 2). Диаметр отверстия принят равным 5, 8 и 16 мм. В качестве метода повышения усталостной долговечности рассмотрено кольцевое обжатие пластины в зоне отверстия на радиусе 8 мм на глубину 0,1; 0,2 и 0,3 мм

соответственно. Геометрические размеры обжимок показаны на рис. 3. При нагружении пластины с отверстием сдвигающими усилиями в ней реализуется двухосное напряженное состояние с величиной касательных напряжений $\tau_{\text{бр}} = 50, 100, 130, 150$ и 200 МПа. Материал пластины – алюминиевый сплав 1163 со следующими механическими характеристиками: модуль упругости $E = 72000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, предел текучести $\sigma_T = 265$ МПа [1]. Модель поведения материала – полилинейная упругопластическая с кинематическим упрочнением [2]. Для описания поведения материала обжимки выбрана модель абсолютно жесткого тела.

Для реализации поставленной цели разработан метод определения влияния диаметра отверстия и глубины двухстороннего обжатия на характеристики локального НДС пластины с отверстием в условиях сдвига.

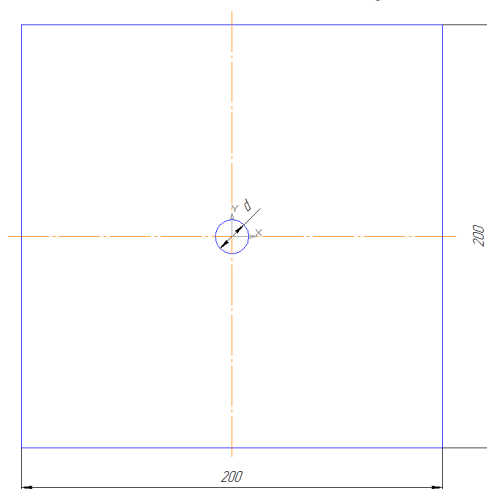


Рис. 2. Геометрические параметры пластины с отверстием

Суть метода заключается в реализации следующих этапов:

1. Описание физической модели – конструктивный элемент планера самолета с функциональным отверстием, работающий в условиях чистого сдвига.
2. Описание расчетной модели – квадратная пластина с отверстием и кольцевая обжимка.
3. Выбор расчетной схемы пластины с отверстием – твердое деформируемое тело и обжимки – абсолютно жесткое тело.
4. Выбор и описание модели поведения материала.
5. Выбор и описание модели контактного взаимодействия пластины и кольцевой обжимки.
6. Задание граничных условий.
7. Моделирование процесса обжатия.
8. Моделирование отвода обжимки.
9. Приложение внешней нагрузки (касательные напряжения) на торцевых поверхностях пластины.
10. Моделирование процесса разгрузки.
11. Определение потребного усилия обжатия и контроль глубины обжатия.
12. Определение параметров, характеризующих локальное НДС в пластине с отверстием в условиях сдвига, и их анализ.

13. Приведение текущего цикла нагружения к эквивалентному отнулевому циклу и пересчет параметров для данного цикла.
14. Анализ полученного результата и заключение относительно влияния конструктивно-технологических параметров на характеристики локального НДС пластины с отверстием.

Чистый сдвиг – это частный случай плоского НДС, при котором по свободным граням выделенного элемента объема действуют только касательные напряжения. НДС при чистом сдвиге характеризуется двумя главными напряжениями: $\sigma_1 = \tau$ и $\sigma_3 = -\tau$, действующими на главных площадках, наклоненных к граням элемента под углом $\pm 45^\circ$ (рис. 4). В качестве параметров, характеризующих локальное НДС полосы с отверстием, рассмотрены следующие: максимальные главные растягивающие напряжения эквивалентного отнулевого цикла (σ_{1max0}), упругая составляющая максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла (ε_{1max0}) и удельная энергия деформирования (w_{1max0}). Предварительным анализом установлено, что пластическая составляющая максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в процессе циклического нагружения изменяется незначительно, поэтому для анализа локального НДС в зоне отверстия взята упругая составляющая максимальных главных растягивающих деформаций.

С учетом геометрической симметрии модели и характера нагружения при моделировании рассмотрена половина конструкции с заданием соответствующих условий закрепления. Расчетная схема пластины с отверстием показана на рис. 5.

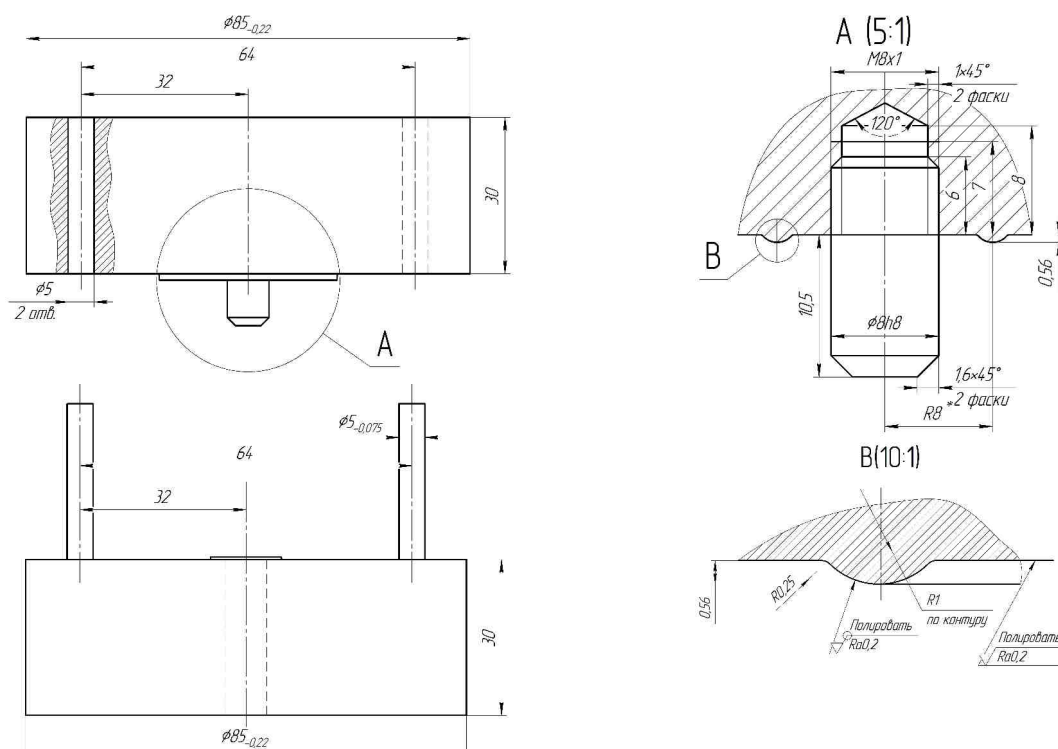


Рис. 3. Геометрические параметры кольцевой обжимки

Исследование распределения напряжений и деформаций в зоне отверстия выполнено с помощью метода конечных элементов, реализованного в системе

ANSYS. Для аппроксимации расчетной модели пластины выбраны восьмиузловые элементы твердого деформируемого тела, обладающие тремя степенями свободы в каждом из узлов (линейные перемещения вдоль осей X, Y, Z). Для приложения касательных напряжений на свободных торцевых гранях пластины применен элемент поверхностного эффекта SURF154 [3]. Контактное взаимодействие обжимки с пластиной описано общей моделью контакта типа «поверхность–поверхность» с применением кулоновской модели трения. Конечные-элементные модели пластины с отверстием и кольцевой обжимки показаны на рис. 6. Конечное-элементная модель пластины с отверстием разбита на три зоны с различной плотностью сетки: зона 1 – локальная зона вблизи отверстия со средним размером конечных элементов $0,39 \times 0,4 \times 0,5$ мм, зона 2 – переходная со средним размером конечных элементов $1,2 \times 0,8 \times 0,5$ мм и зона 3 – зона с разбивкой $9,2 \times 10 \times 0,5$ мм.

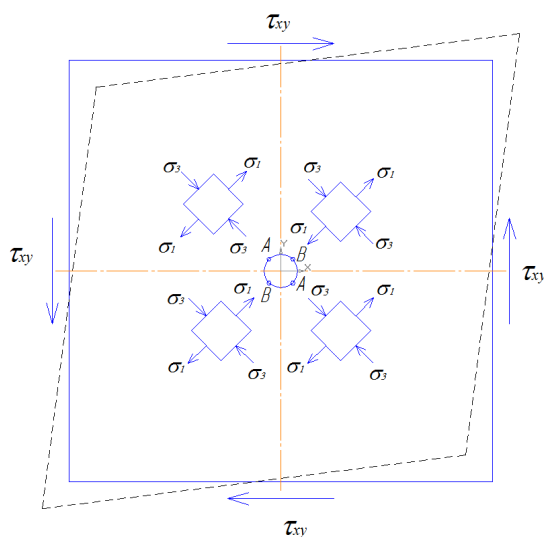


Рис. 4. Пластина с отверстием в условиях чистого сдвига

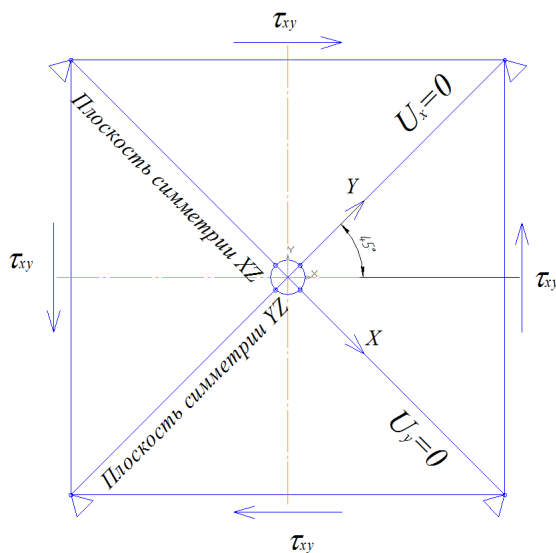
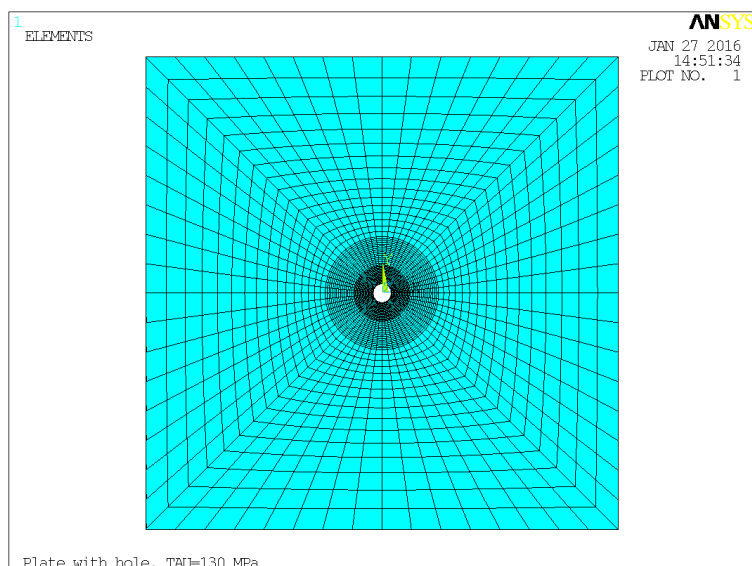
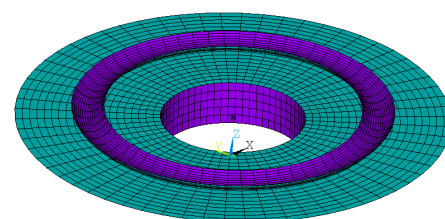


Рис. 5. Расчетная схема пластины с отверстием в условиях чистого сдвига



а



б

Рис. 6. Конечно-элементная модель пластины с отверстием (а) и кольцевой обжимки (б)

В процессе моделирования реализовано нагружение пластины с отверстием сдвигающими напряжениями. На рис. 7 показана ориентация векторов главных напряжений. Из рисунка видно, что в пластине с отверстием реализуется двухосное напряженное состояние, при котором на главных площадках действуют два главных напряжения: растягивающее напряжение σ_1 и сжимающее напряжение σ_3 . На рис. 8 изображено поле распределения векторов суммарных смещений в пластине с отверстием при чистом сдвиге.

Видно, что в направлении действия главных растягивающих напряжений пластина удлиняется, а в направлении действия главных сжимающих напряжений – укорачивается. При этом происходит овализация отверстия.

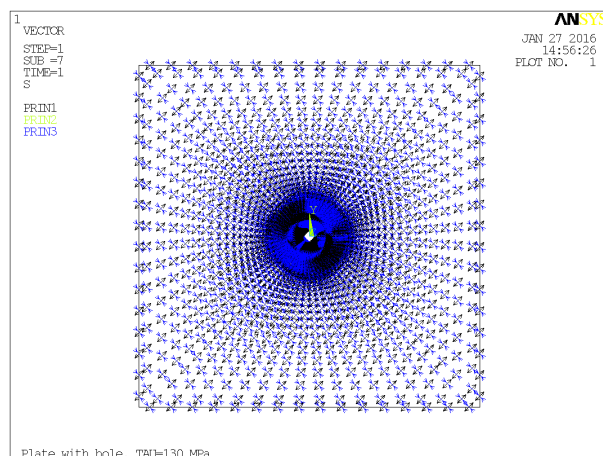


Рис. 7. Ориентация векторов главных напряжений в пластине с отверстием при чистом сдвиге

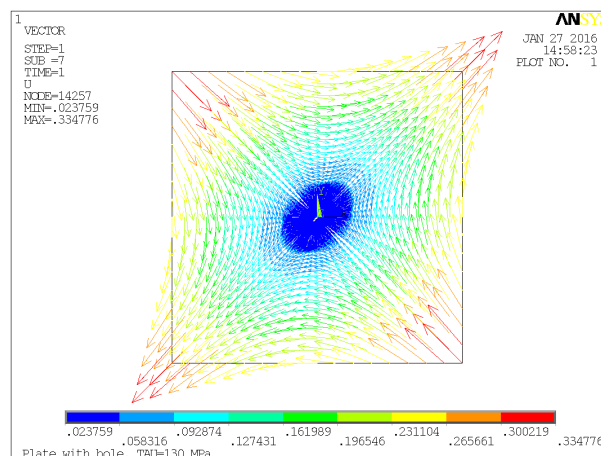


Рис. 8. Поле распределения векторов суммарных перемещений в пластине с отверстием при чистом сдвиге ($\tau_{\text{оп}}=130$ МПа)

Проанализировано распределение главных растягивающих σ_1 и сжимающих σ_3 напряжений в зоне отверстия. Из рис. 9 и 10 видно, что напряжения концентрируются в зоне отверстия. Точки А и В наибольшей концентрации напряжений расположены на кромке отверстия под углом $\pm 45^\circ$ по отношению к оси X глобальной системы координат. Наиболее опасны точки, в которых возникают наибольшие растягивающие напряжения (точка А).

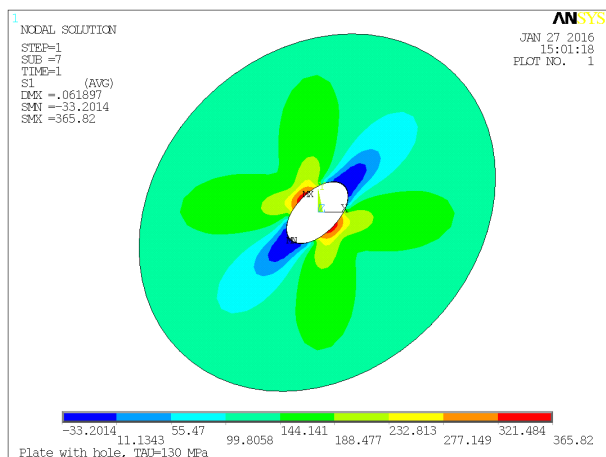


Рис. 9. Поле распределения главных растягивающих напряжений σ_1 в зоне отверстия при чистом сдвиге ($\tau_{\text{бр}}=130$ МПа)

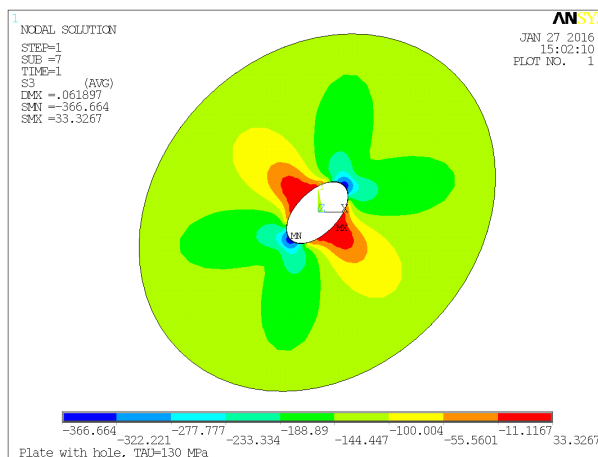


Рис. 10. Поле распределения главных сжимающих напряжений σ_3 в зоне отверстия при чистом сдвиге ($\tau_{\text{бр}}=130$ МПа)

Исследовано влияние относительного параметра (B/d) на изменение теоретического коэффициента концентрации (рис. 11) напряжений K_t : $K_t = \sigma_{\text{max}} / \sigma_{\text{ном}}$, где σ_{max} – максимальные локальные напряжения в сечении (А-А) по оси концентратора; $\sigma_{\text{ном}}$ – номинальные напряжения.

В качестве номинальных напряжений в работе взяты касательные напряжения, которыми нагружена пластина, в качестве максимальных напряжений – первые главные напряжения.

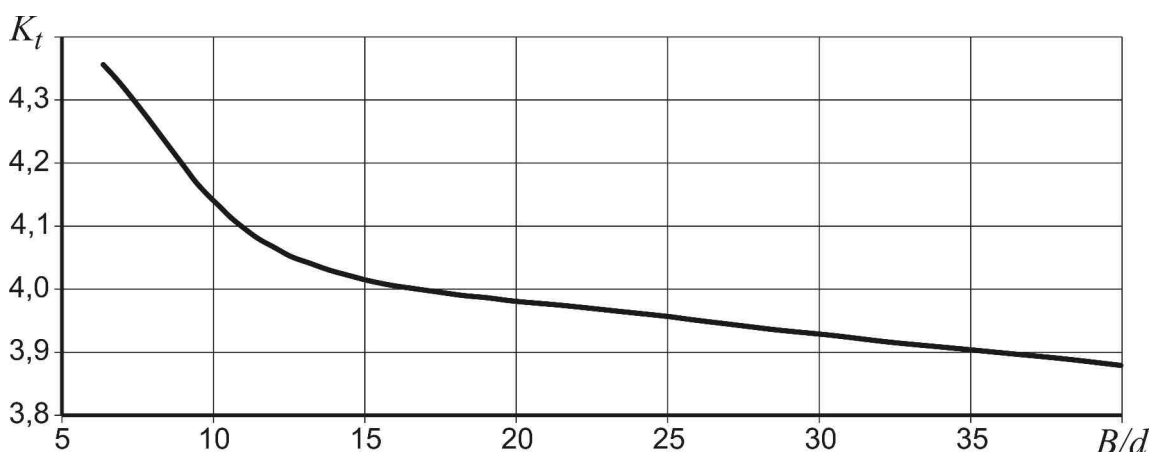


Рис. 11. Влияние относительного параметра B/d на теоретический коэффициент концентрации напряжений в пластине с отверстием при чистом сдвиге ($\tau_{\text{бр}} = 50$ МПа)

Исследовано распределение главных растягивающих напряжений по толщине пластины в сечении по оси отверстия, проходящем через точку А (рис. 12). Наблюдается неравномерность распределения главных растягивающих напряжений по толщине с максимумом, расположенным в сечении $z = 0$ мм (серединная поверхность пластины). На рис. 13 показано распределение главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием в сечении А-А по оси отверстия на наружной и серединной поверхностях пластины.

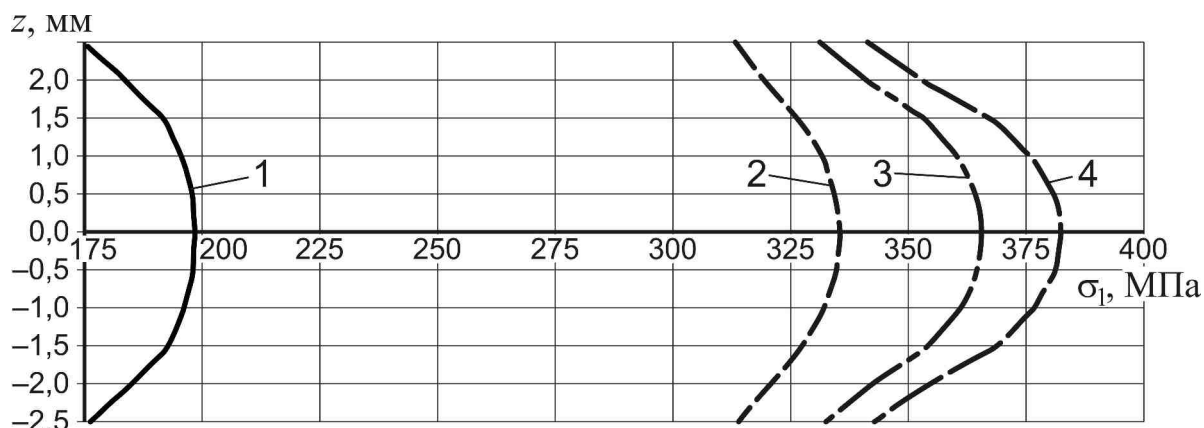


Рис. 12. Характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине пластины: 1 – $\sigma_{бр} = 50$ МПа; 2 – $\sigma_{бр} = 100$ МПа; 3 – $\sigma_{бр} = 130$ МПа; 4 – $\sigma_{бр} = 150$ МПа

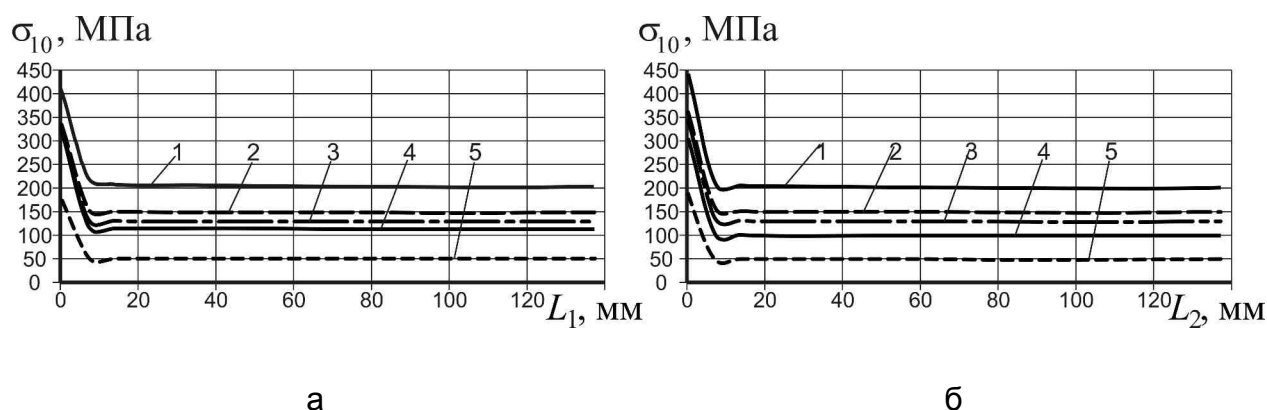


Рис. 13. Характер распределения главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины $z = 2,5$ мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на серединной поверхности пластины $z = 0$ мм; 1 – $\sigma_{бр} = 50$ МПа; 2 – $\sigma_{бр} = 100$ МПа; 3 – $\sigma_{бр} = 130$ МПа; 4 – $\sigma_{бр} = 150$ МПа; 5 – $\sigma_{бр} = 200$ МПа

На рис. 14 – 16 показаны результаты исследования влияния уровня нагружения и диаметра отверстия на изменение максимальных главных растягивающих напряжений, упругих деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием. На рис. 14 – 16 приняты следующие обозначения: 1 – $d_{омв} = 5$ мм; 2 – $d_{омв} = 8$ мм; 3 – $d_{омв} = 16$ мм.

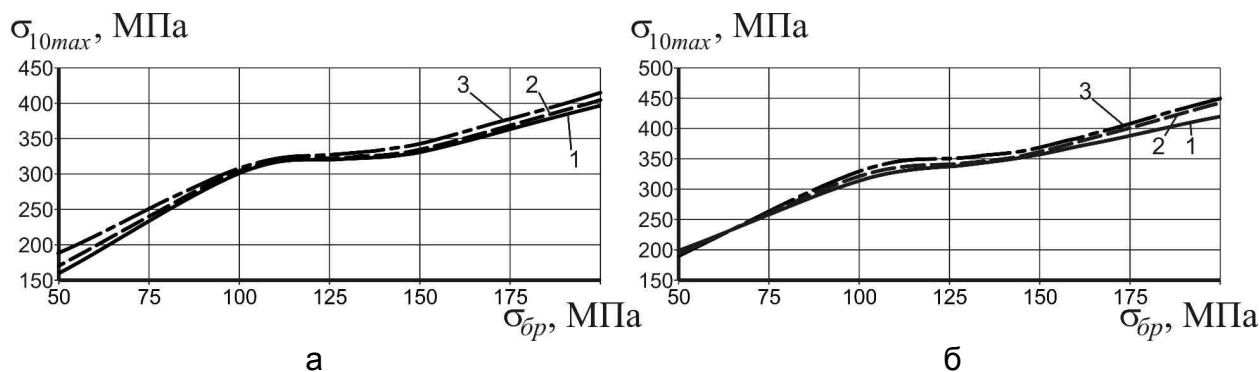


Рис. 14. Влияние уровня нагружения и диаметра отверстия на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины $z = 2,5$ мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины $z = 0$ мм

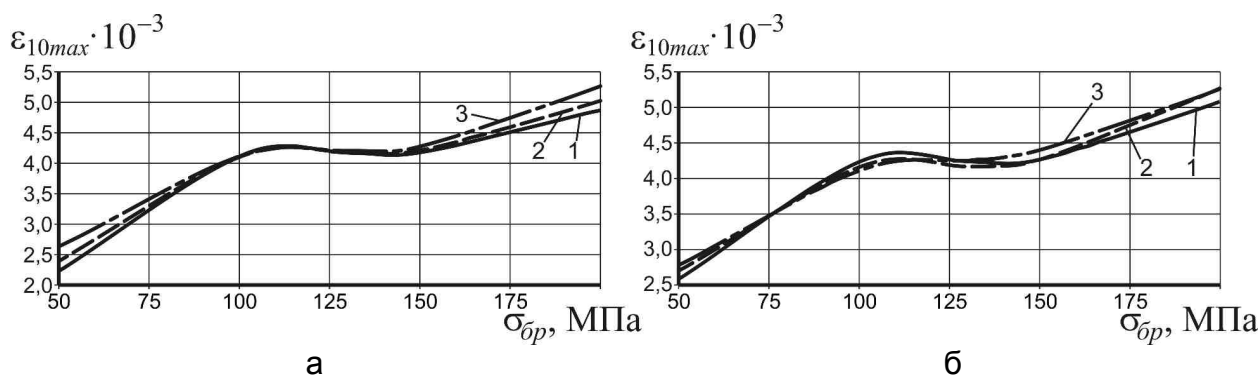


Рис. 15. Влияние уровня нагружения и диаметра отверстия на изменение максимальных главных растягивающих упругих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины $z = 2,5$ мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины $z = 0$ мм

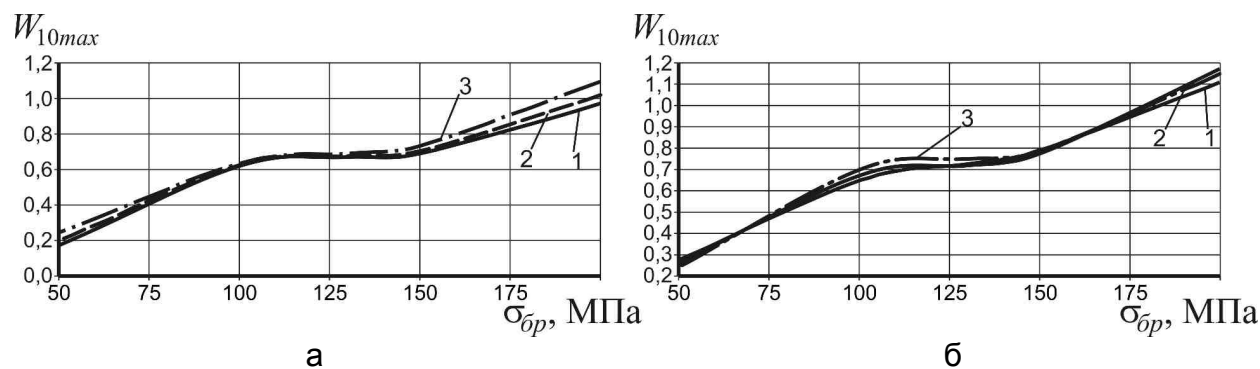


Рис. 16. Влияние уровня нагружения и диаметра отверстия на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины $z = 2,5$ мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины $z = 0$ мм

Изменение диаметра отверстия несущественно влияет на изменение максимальных параметров, характеризующих локальное НДС в пластине с отверстием.

Исследовано влияние уровня нагружения и глубины обжатия на изменение характеристик локального НДС в пластине с отверстием диаметром 8 мм.

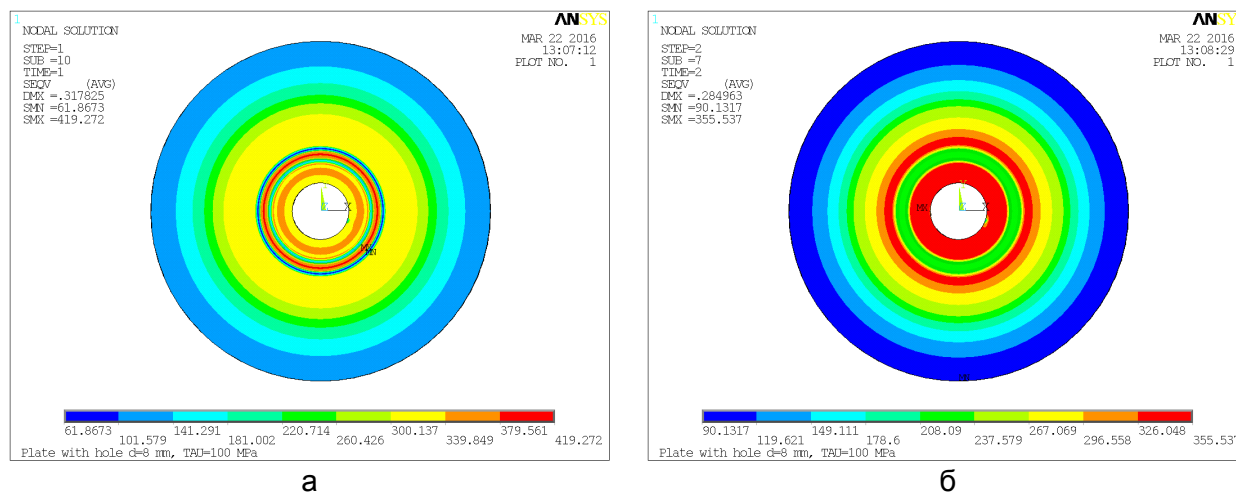


Рис. 17. Поле распределения эквивалентных напряжений по Мизесу $\sigma_{\text{экв}}$ в зоне отверстия: а – при обжатии на глубину 0,3 мм; б – после отвода обжимок

При кольцевом обжатии пластины в зоне отверстия в материале возникают остаточные сжимающие напряжения (всестороннее сжатие), величина которых превышает предел текучести материала. Размер зоны пластичности зависит от глубины обжатия. Так, при обжатии на глубину 0,2...0,3 мм эта зона весьма развита и распространяется на расстояние, равное 1,38 $d_{\text{отв}}$ от центра отверстия. При глубине обжатия 0,1 мм зона пластичности менее развита и ограничена в пределах размеров обжимки. Наличие остаточных сжимающих напряжений приводит к изменению цикла локальных напряжений в зоне отверстия, который является асимметричным. При анализе полученный асимметричный цикл приведен к эквивалентному отнулевому с параметрами напряжений, определенными по формуле Одингга.

На рис. 18 – 20 приняты следующие обозначения: 1 – глубина обжатия 0 мм; 2 – глубина обжатия 0,1 мм; 3 – глубина обжатия 0,2 мм; 4 – глубина обжатия 0,3 мм.

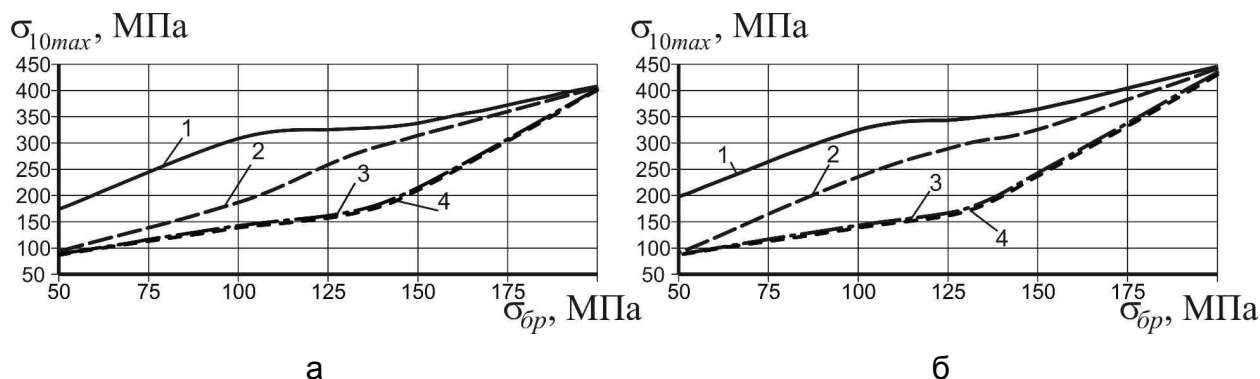


Рис. 18. Влияние уровня нагружения и глубины обжатия на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины $z = 2,5$ мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины $z = 0$ мм

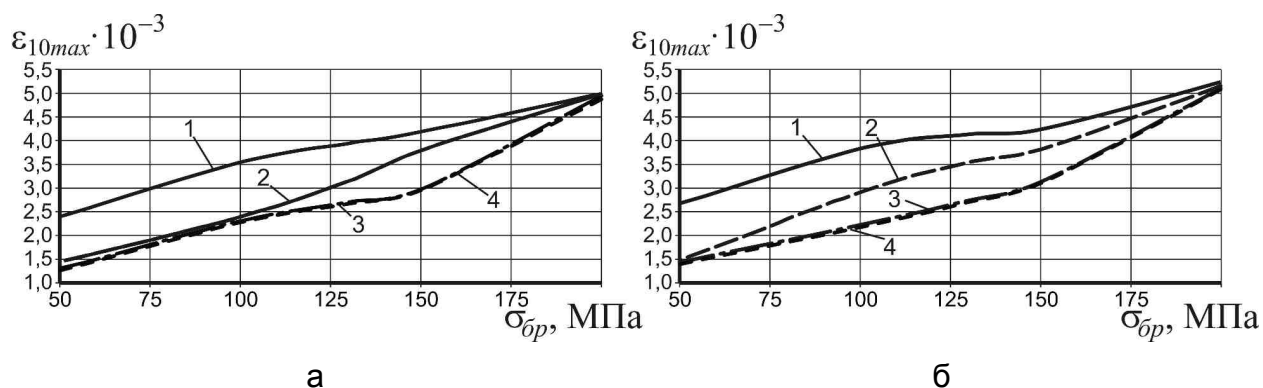


Рис. 19. Влияние уровня нагружения и глубины обжатия на изменение максимальных главных растягивающих упругих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины $z = 2,5$ мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины $z = 0$ мм

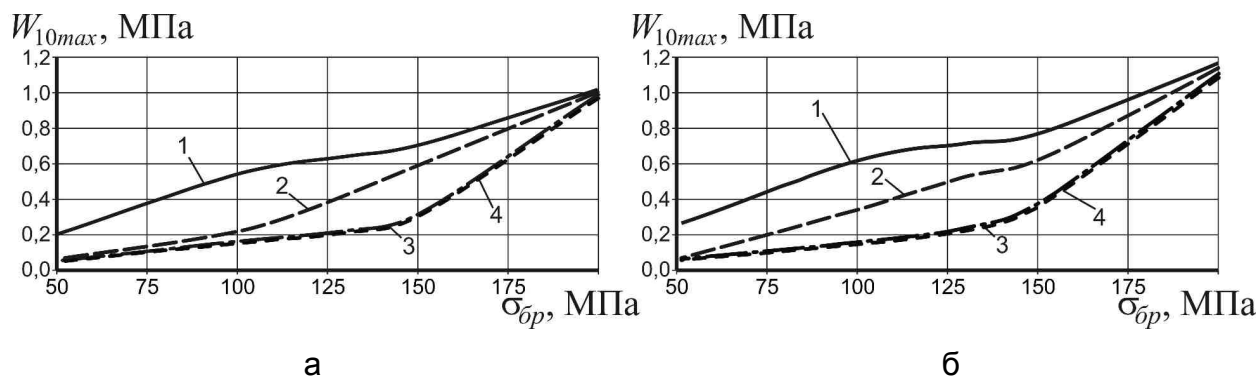


Рис. 20. Влияние уровня нагружения и глубины обжатия на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины $z = 2,5$ мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины $z = 0$ мм

Следует отметить, что максимальное значение параметров, характеризующих локальное НДС (напряжения, упругая деформация и удельная энергия деформирования) в пластине с отверстием, реализуется в различных точках. Так, для необжатой пластины с отверстием максимум расположен в точке А на кромке отверстия (см. рис. 4). В случае обжатия пластины максимум смещается в радиальном направлении от кромки в тело пластины. Причем величина смещения зависит от глубины обжатия и уровня касательных напряжений. С увеличением глубины обжатия величина смещения увеличивается. Например, в диапазоне глубин обжатия от 0,1 до 0,3 мм величина относительного смещения составляет от 1,2 до 1,8. С увеличением уровня касательных напряжений величина смещения уменьшается: так, в диапазоне напряжений от 50 до 200 МПа величина относительного смещения составляет от 1,8 до 0,5 мм. Здесь под относительным смещением следует понимать отношение величины смещения к диаметру отверстия.

Получены аналитические выражения, аппроксимирующие результаты исследования влияния уровня нагружения и глубины обжатия на изменение максимальных главных растягивающих напряжений, упругих деформаций и

удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием:

$\sigma_{10\max} = 0,0002\sigma_{\sigma p}^3 - 0,079\sigma_{\sigma p}^2 + 11,112\sigma_{\sigma p} - 207,07$	Кривая 1 рис. 18, а
$\sigma_{10\max} = 220,52 \ln(\sigma_{\sigma p}) - 790,03$	Кривая 2 рис. 18, а
$\sigma_{10\max} = 52,6e^{0,0097\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 3 рис. 18, а
$\sigma_{10\max} = 50,762e^{0,0099\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 4 рис. 18, а
$\sigma_{10\max} = 0,0002\sigma_{\sigma p}^3 - 0,0693\sigma_{\sigma p}^2 + 9,8743\sigma_{\sigma p} - 143,89$	Кривая 1 рис. 18, б
$\sigma_{10\max} = 0,0001\sigma_{\sigma p}^3 - 0,0419\sigma_{\sigma p}^2 + 7,4147\sigma_{\sigma p} - 187,48$	Кривая 2 рис. 18, б
$\sigma_{10\max} = 50,884e^{0,0104\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 3 рис. 18, б
$\sigma_{10\max} = 48,906e^{0,0105\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 4 рис. 18, б
$\varepsilon_{10\max} = 9 \cdot 10^{-10} \sigma_{\sigma p}^3 - 4 \cdot 10^{-7} \sigma_{\sigma p}^2 + 6 \cdot 10^{-5} \sigma_{\sigma p} + 8 \cdot 10^{-5}$	Кривая 1 рис. 19, а
$\varepsilon_{10\max} = 3 \cdot 10^{-8} \sigma_{\sigma p}^2 + 2 \cdot 10^{-5} \sigma_{\sigma p} + 0,0005$	Кривая 2 рис. 19, а
$\varepsilon_{10\max} = 0,0009e^{0,0085\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 3 рис. 19, а
$\varepsilon_{10\max} = 0,0009e^{0,0085\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 4 рис. 19, а
$\varepsilon_{10\max} = 2 \cdot 10^{-9} \sigma_{\sigma p}^3 - 7 \cdot 10^{-7} \sigma_{\sigma p}^2 + 1 \cdot 10^{-4} \sigma_{\sigma p} + 0,0006$	Кривая 1 рис. 19, б
$\varepsilon_{10\max} = 1 \cdot 10^{-9} \sigma_{\sigma p}^3 - 5 \cdot 10^{-7} \sigma_{\sigma p}^2 + 8 \cdot 10^{-5} \sigma_{\sigma p} - 0,0015$	Кривая 2 рис. 19, б
$\varepsilon_{10\max} = 0,001e^{0,0082\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 3 рис. 19, б
$\varepsilon_{10\max} = 0,0009e^{0,0083\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 4 рис. 19, б
$W_{10\max} = 4 \cdot 10^{-7} \sigma_{\sigma p}^3 - 0,0002\sigma_{\sigma p}^2 + 0,0244\sigma_{\sigma p} - 0,641$	Кривая 1 рис. 20, а
$W_{10\max} = 3 \cdot 10^{-5} \sigma_{\sigma p}^2 + 9 \cdot 10^{-5} \sigma_{\sigma p} - 0,0079$	Кривая 2 рис. 20, а
$W_{10\max} = 0,024e^{0,0182\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 3 рис. 20, а
$W_{10\max} = 0,0226e^{0,0184\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 4 рис. 20, а
$W_{10\max} = 6 \cdot 10^{-7} \sigma_{\sigma p}^3 - 0,0002\sigma_{\sigma p}^2 + 0,0306\sigma_{\sigma p} - 0,771$	Кривая 1 рис. 20, б
$W_{10\max} = 3 \cdot 10^{-7} \sigma_{\sigma p}^3 - 9 \cdot 10^{-5} \sigma_{\sigma p}^2 + 0,0143\sigma_{\sigma p} - 0,455$	Кривая 2 рис. 20, б
$W_{10\max} = 0,0251e^{0,0186\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 3 рис. 20, б
$W_{10\max} = 0,0231e^{0,0189\sigma_{\sigma p}}$	Кривая 4 рис. 20, б

Исследовано влияние глубины обжатия на величину потребного усилия обжатия (рис. 21).

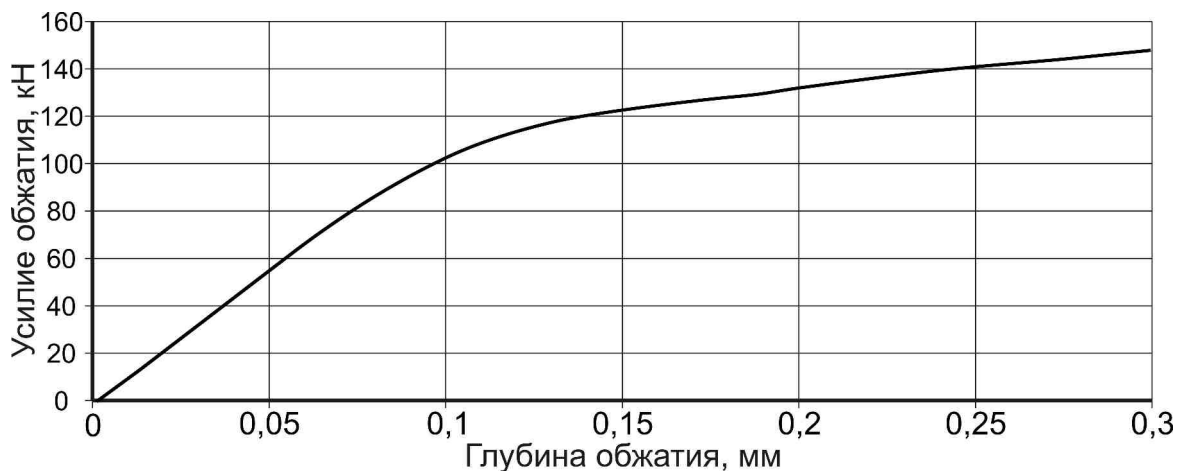


Рис. 21. Влияние глубины обжатия на величину потребного усилия обжатия пластины с отверстием

Анализ результатов показывает, что зависимость между потребным усилием и глубиной обжатия является нелинейной. Изменение глубины обжатия с 0,2 до 0,3 мм не влияет на изменение максимальных параметров, характеризующих локальное НДС в пластине с отверстием.

Выводы

1. Установлено, что при изменении относительного параметра B/d в диапазоне от 12,5 до 40 коэффициент концентрации напряжений в упругой области меняется от 4,05 до 3,88 соответственно.
2. Установлено, что изменение диаметра отверстия в диапазоне от 5 до 16 мм незначительно влияет на изменение максимальных главных растягивающих напряжений, упругих деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием в условиях чистого сдвига.
3. Применение кольцевого обжатия способствует смещению максимума главных растягивающих напряжений, упругих деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием в тело пластины. Величина смещения зависит от глубины обжатия и уровня касательных напряжений.
3. В диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 50 до 200 МПа применение кольцевого обжатия на глубину 0,3 мм способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 2,2 – 1,03 раза. При этом величины максимальных главных растягивающих деформаций и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла уменьшаются в 1,8 – 1,03 раза и 3,9 – 1,05 раза соответственно.
4. Получены аналитические выражения, аппроксимирующие кривые изменения максимальных главных растягивающих напряжений, упругих деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного

отнулевого цикла в зависимости от уровня касательных напряжений в сечении брутто.

5. Установлено, что увеличение глубины локального обжатия пластины с 0,1 до 0,3 мм приводит к росту потребного усилия обжатия в 1,4 раза и изменяется в диапазоне от 104 до 150 кН.

Список литературы

1. Авиационные материалы Том 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы [Текст]/ Р.Е. Шалин. – М.: ОНТИ, 1982. – 627 с.
2. ANSYS Structural Analysis Guide. Chapter 8. Nonlinear Structural Analysis. Section 8.4.1.1.1 Plastic Material Models. 001087. 4th Edition. SAS IP[©].
3. ANSYS Element Guide. Chapter 3. Element References. Section 3.1. Element Library. 001087. 4th Edition. SAS IP[©].

Поступила в редакцию 22.03.2016

Метод визначення впливу конструктивно-технологічних параметрів на характеристики локального НДС пластини з отвором при навантаженні її зсувом

Показано, що для пластини з отвором при навантаженні її зсувом в діапазоні значень напружень у перерізі брутто від 50 до 200 МПа застосування кільцевого обтиску на глибину 0,3 мм сприяє зменшенню максимальних головних розтягуючих напружень еквівалентного віднулевого циклу в 2,2 – 1,03 рази. При цьому величини максимальних головних розтягуючих деформацій і максимальної питомої енергії деформування еквівалентного віднулевого циклу зменшуються в 1,8 – 1,03 рази і 3,9 – 1,05 рази відповідно.

Ключові слова: чистий зсув, метод скінчених елементів, локальний напружено-деформований стан, головні напруження розтягу еквівалентного віднулевого циклу, питома енергія деформування

Method of Determining the Effect of Structural and Technological Parameters on Characteristics of Local Mode of Deformation of Plate with Hole under its Shear

It is shown that for a plate with a hole under its shear within the range of stresses in the cross section of 50 to 200 MPa application of circular compression on a depth of 0.3 mm reduces the maximum principal tensile stresses of equivalent zero-to-tension stress cycle by 2.2 ... 1.03 times compared with stress in a plate with a hole. Herewith the values of maximum principal strain and maximum specific energy of deformation of equivalent zero-to-tension stress cycle decrease by 1.8 to 1.03 and 3.9 to 1.05 times respectively.

Keywords: shear, finite element method, local mode of deformation, principal tensile stresses of equivalent zero-to-tension stress cycle, specific energy of deformation.