

Метод анализа влияния совместного локального и барьерного обжатия на характеристики локального НДС растянутой полосы с цилиндроконическим отверстием

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

Разработан метод анализа влияния совместного локального и барьерного обжатия на характеристики локального НДС растянутой полосы с цилиндроконическим отверстием. В диапазоне растягивающих напряжений $\sigma_{\text{ср}} = 50 \dots 175$ МПа совместное локальное и барьерное обжатие приводит к снижению величины максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,17-2,4 раза, главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла – в 1,29-2,26 раза и величины максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла – в 1,37-5,43 раза по сравнению с соответствующими величинами для необработанной полосы с цилиндроконическим отверстием.

Ключевые слова: полоса с цилиндроконическим отверстием, лунка сегментной конфигурации, локальное НДС, контактные элементы, удельная энергия деформирования.

В конструкции съемных панелей применяют потайные болтовые соединения без радиального натяга. Выполнение конической зенковки отверстия под крепежный элемент с потайной головкой болта значительно снижает усталостную долговечность и приводит к росту концентрации напряжений в данной зоне.

В образцах с зенкованными необработанными отверстиями усталостная трещина зарождается, как правило, в зоне перехода с конуса на цилиндр отверстия, а в образцах, обработанных с образованием концентрических площадок и кольцевых канавок, – от кромок подсечки или канавок или на расстоянии 1...3 мм от нее. При дополнительной обработке зоны перехода от конуса к цилиндру усталостная зона расположена в основном вдоль цилиндрической образующей отверстия.

Необходимо отметить, что зона усталостного разрушения обработанных образцов значительно больше, чем необработанных, и согласуется с увеличением усталостной долговечности, что свидетельствует об увеличении сопротивляемости металла разрушению за счет уплотнения металла и появления остаточных сжимающих напряжений в этом сечении.

Таким образом, обработка отверстий МГПД позволяет значительно повысить усталостную долговечность деталей и агрегатов изделий в целом.

Большинство из них заключается в создании различными способами остаточных напряжений в зоне отверстий путем пластического деформирования металла

Для достижения заданных характеристик усталостной долговечности специалистами авиационной промышленности разработаны более эффективные методы обработки, в частности методы местного глубокого пластического деформирования (МГПД) стенок отверстий и зон, прилегающих к ним [1-7].

Одним из способов МГПД является обжатие с образованием вокруг отверстия лунок сегментной конфигурации [7]. Вокруг отверстия с двух сторон на расстоянии 2...3 мм от его кромки по окружности обжимками выдавливаются дугообразные канавки, расположенные поперек силового потока напряжений. Это обеспечивает разгрузку отверстий от потока огибающих его растягивающих напряжений, образующихся при циклических нагрузках в процессе эксплуатации, и

приводит к значительному повышению усталостной долговечности. Таким образом целесообразно обрабатывать отверстия со свободными размерами (например, для перетекания топлива, дренажа), но его можно использовать и для упрочнения отверстий под крепеж.

В качестве МГПД цилиндрического отверстия и прилегающей к нему зоны рассмотрены метод выштамповки лунок сегментной конфигурации глубиной 0,3 мм на нижней поверхности полосы со стороны цилиндрического отверстия, метод локального обжатия зенковки отверстия и комбинированный метод. Последний метод предполагает одновременное локальное обжатие зон перехода с конуса на цилиндр отверстия и выхода зенковки на верхнюю поверхность полосы и выполнение кольцевой выштамповки на нижней поверхности полосы глубиной 0,2 мм.

Целью данной работы является разработка метода анализа влияния совместного локального и барьерного обжатия на характеристики локального НДС полосы с цилиндрическим отверстием при растяжении.

Объектом исследования является полоса с цилиндрическим отверстием (рис. 1). При построении расчетной модели также учтен технологический инструмент, используемый для обработки отверстия и зоны, прилегающей к нему (рис. 2, 3). В качестве метода исследования выбран метод конечных элементов, реализованный в системе инженерного анализа ANSYS.

Учитывая геометрическую и силовую симметрию образца, а также изотропность свойств материала, из которого он изготовлен, моделируем 1/4 образца. При этом действие отброшенных частей компенсируем заданием соответствующих граничных условий симметрии (рис. 4).

Для моделирования образца полосы с цилиндрическим отверстием применяли 8-узловой 3D элемент твердого деформируемого тела SOLID45, представленный в системе ANSYS [8]. Контактное взаимодействие моделировали с помощью специальных элементов TARGET170 и CONTA173. При этом технологический инструмент для упрочнения рассматривали как абсолютно жесткое тело. В модели контактного взаимодействия учтено трение. Расчет проведен при уровнях растягивающих напряжений в сечении брутто 0, 50, 100, 114, 125, 130, 150, 175 и 200 МПа.

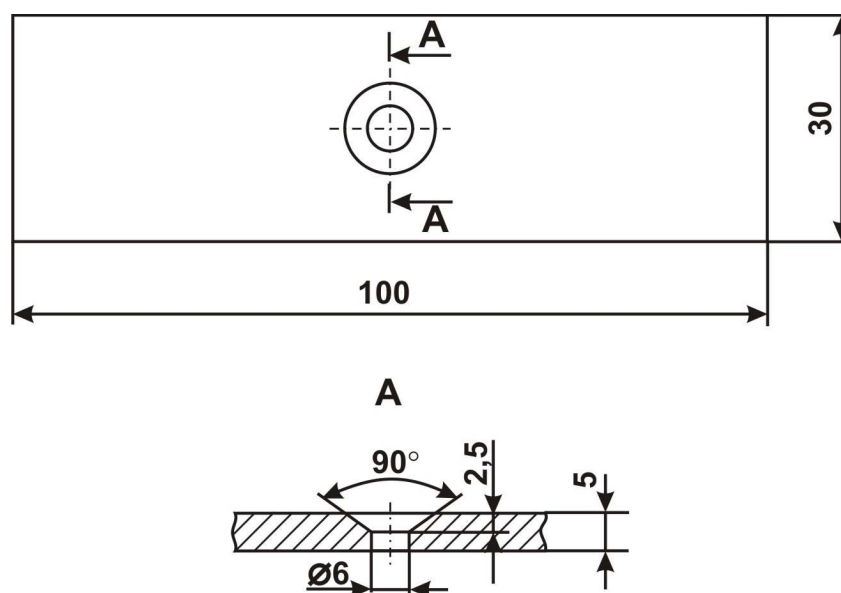


Рис. 1. Образец полосы с цилиндроконическим отверстием

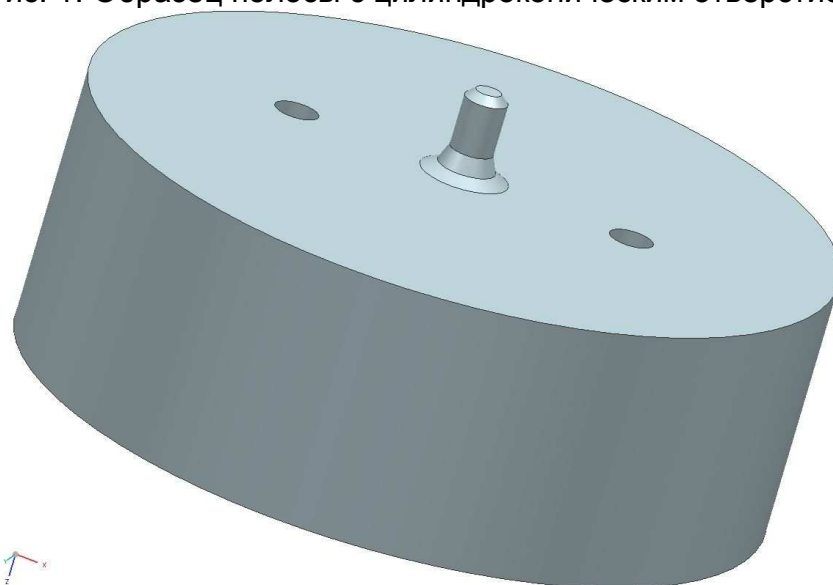


Рис. 2. Геометрическая модель верхней обжимки

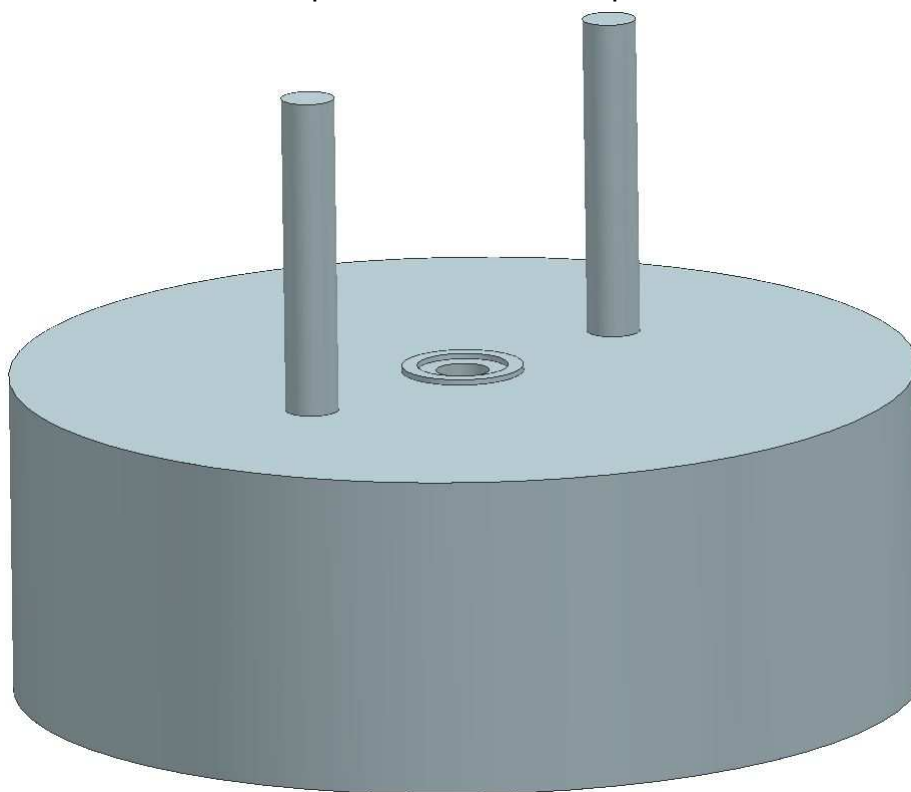


Рис. 3. Геометрическая модель нижней обжимки

При выборе модели поведения материала учитывали величины расчетных нагрузок, действующих на образец. Поскольку при данных уровнях напряжений в локальных зонах образца возникают пластические деформации, то для описания

законов поведения материала выбрана полилинейная упругопластическая модель материала с кинематическим законом упрочнения.

Полоса изготовлена из алюминиевого сплава Д16Тл5 [9].

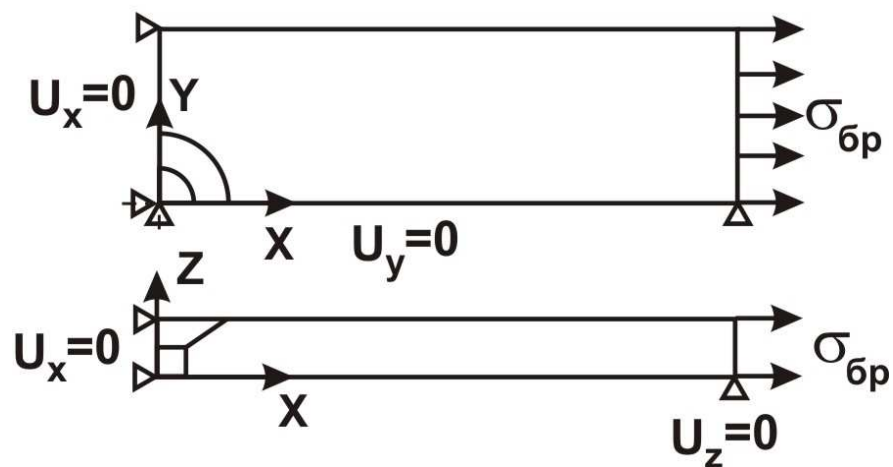


Рис. 4. Расчетная схема полосы с цилиндроконическим отверстием

На рис. 5 и 6 показаны конечно-элементные модели образца полосы с цилиндроконическим отверстием и технологического инструмента для упрочнения.

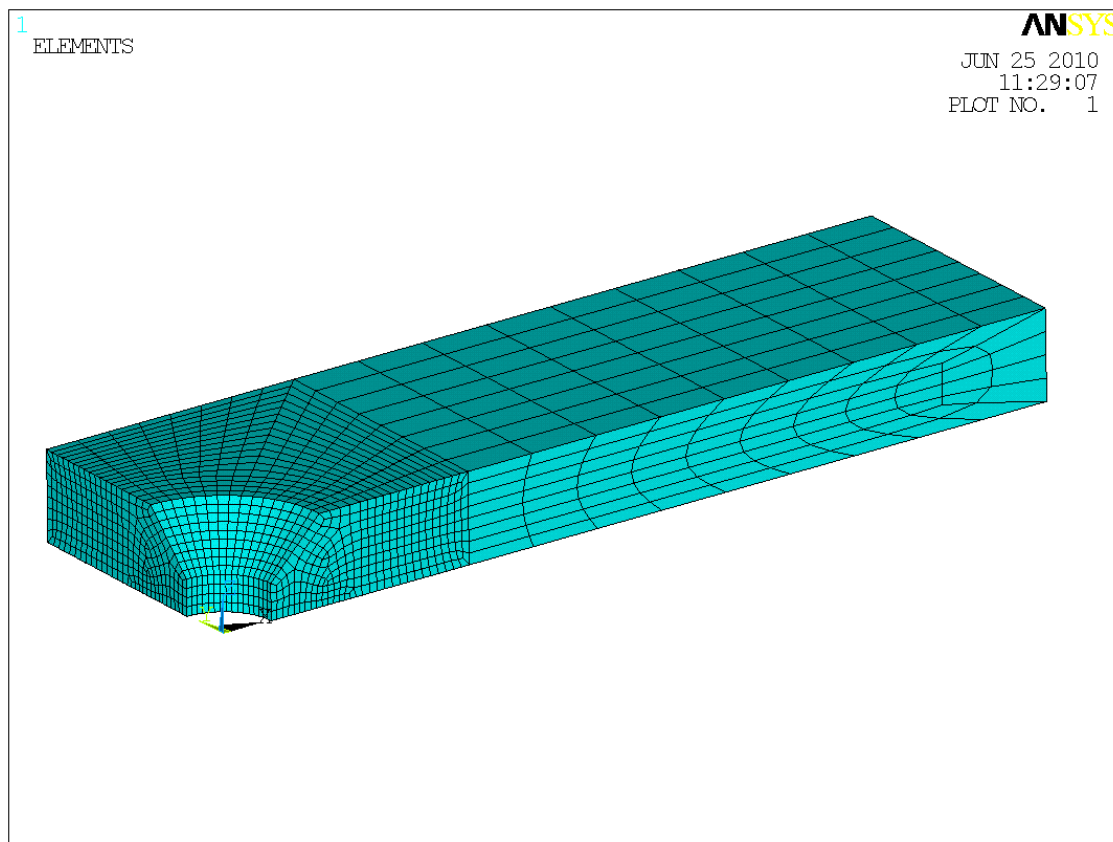


Рис. 5. Конечно-элементная модель полосы с цилиндроконическим отверстием

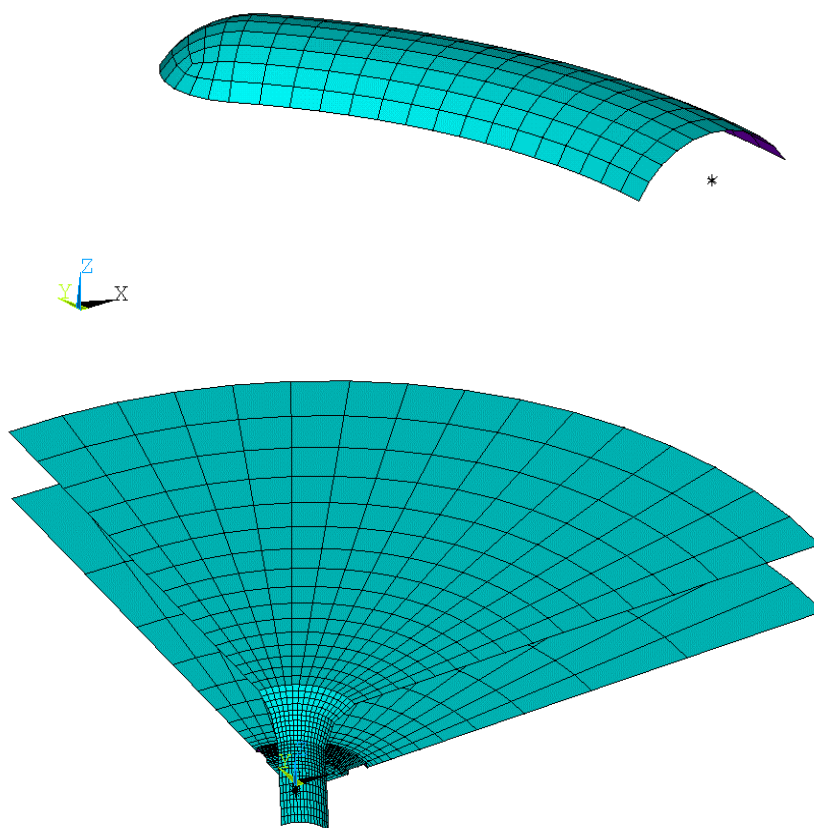


Рис. 6. Конечно-элементная модель обжимок

Разработан метод анализа характеристик локального НДС полосы с цилиндроконическим отверстием при совместном локальном и барьерном обжатии, включающий в себя:

1. Построение геометрических моделей полосы с цилиндроконическим отверстием и обжимок.
2. Разработку расчетной схемы.
3. Задание кривой деформирования материала.
4. Создание конечно-элементных моделей полосы с цилиндроконическим отверстием и обжимок. Учет контактного взаимодействия участков полосы и обжимок.
5. Задание граничных условий.
6. Моделирование процесса движения нижней обжимки на этапе совместного локального и барьерного обжатия.
7. Извлечение обжимок после завершения технологического процесса совместного локального и барьерного обжатия.
8. Приложение внешних растягивающих давлений, соответствующих уровню растягивающих напряжений в сечении брутто.
9. Моделирование процесса разгрузки путем снятия действия внешних растягивающих давлений.
10. Анализ распределения главных растягивающих напряжений по толщине в сечении по оси отверстия.
11. Расчет характеристик локального НДС полосы в сечении по оси отверстия и в зоне обжатия.

12. Определение амплитуды и максимальных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в сечении по оси отверстия и в зоне обжатия.

Проанализированы характеристики локального НДС полосы с цилиндроконическим отверстием в обработанных зонах, определена глубина выштамповки и величина остаточных напряжений.

Результаты анализа показаны на рис. 7–12.

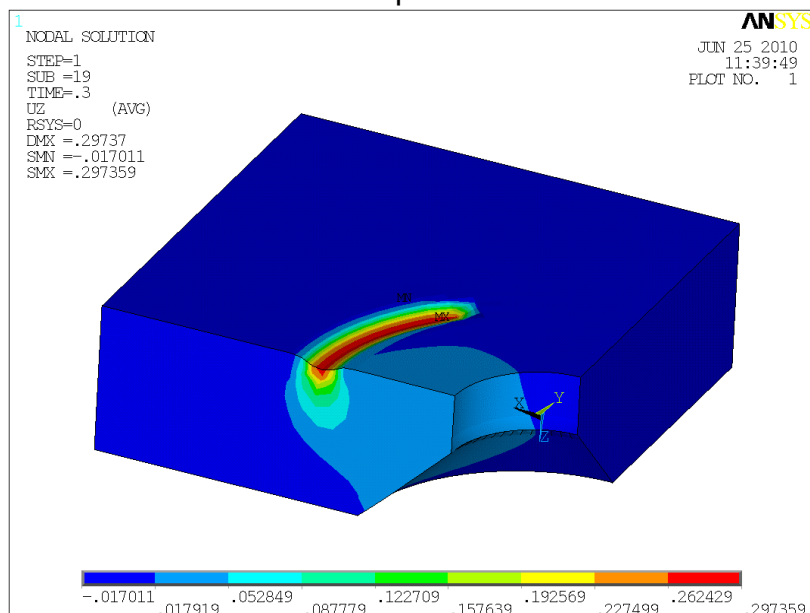


Рис. 7. Поле распределения вертикальных перемещений в полосе с цилиндроконическим отверстием в зоне выштамповки лунки сегментной конфигурации

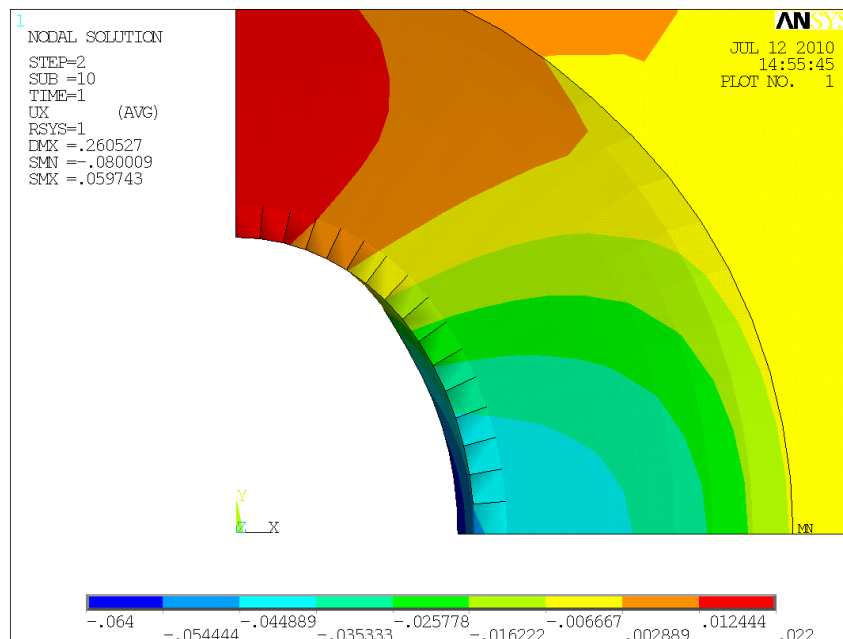


Рис. 8. Эллипсность отверстия после выштамповки лунок сегментной конфигурации (масштаб деформаций увеличен в 10 раз)

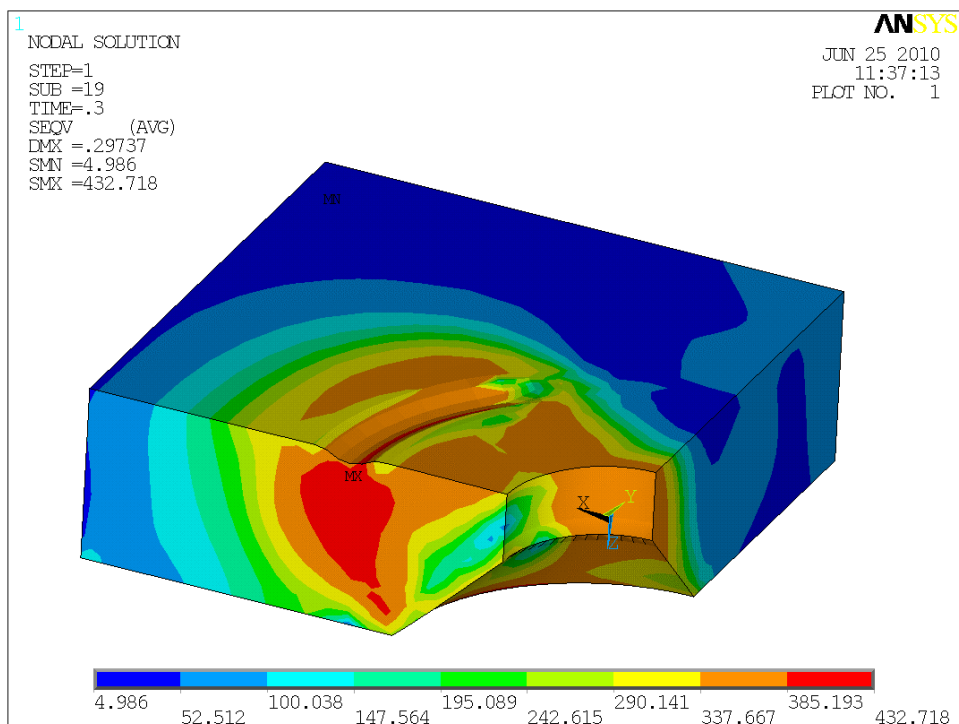


Рис. 9. Поле распределения эквивалентных напряжений Мизеса в полосе с цилиндрикоконическим отверстием в конце процесса выштамповки лунки сегментной конфигурации глубиной 0,3 мм

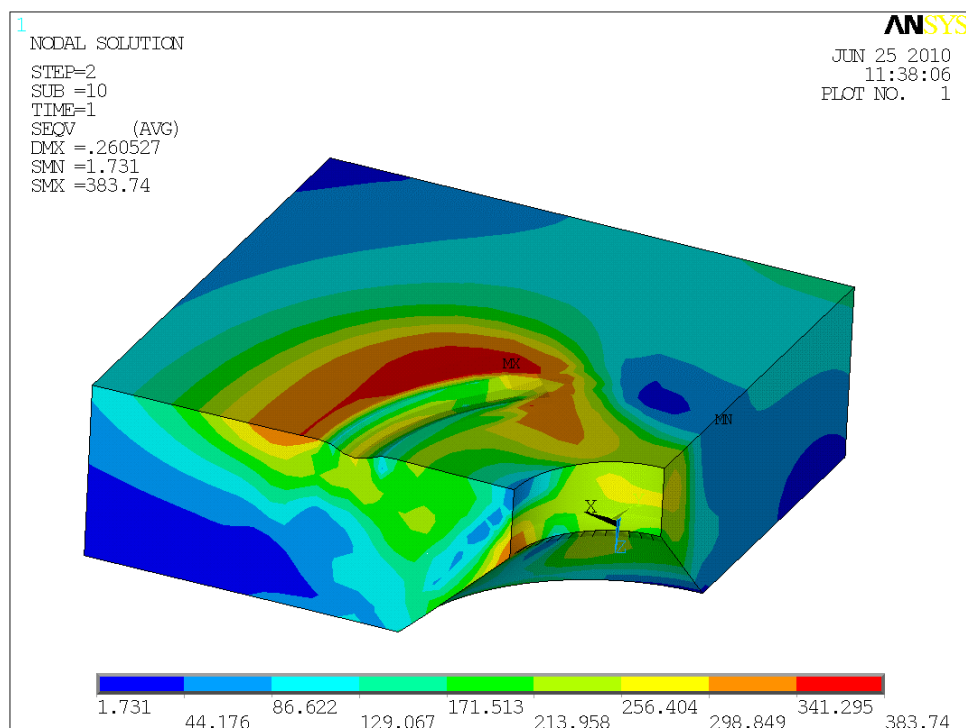


Рис. 10. Поле распределения эквивалентных напряжений Мизеса в полосе с цилиндрикоконическим отверстием после отведения штампа

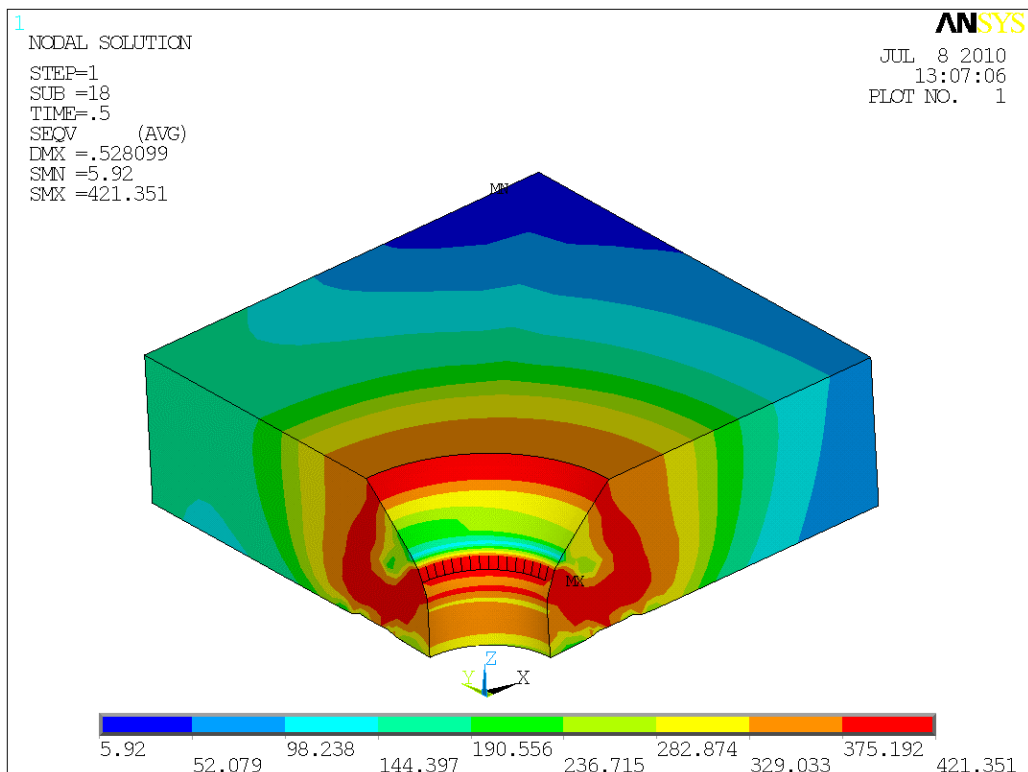


Рис. 11. Поле распределения эквивалентных напряжений Мизеса в полосе с цилиндрикоконическим отверстием в конце процесса комбинированного упрочнения

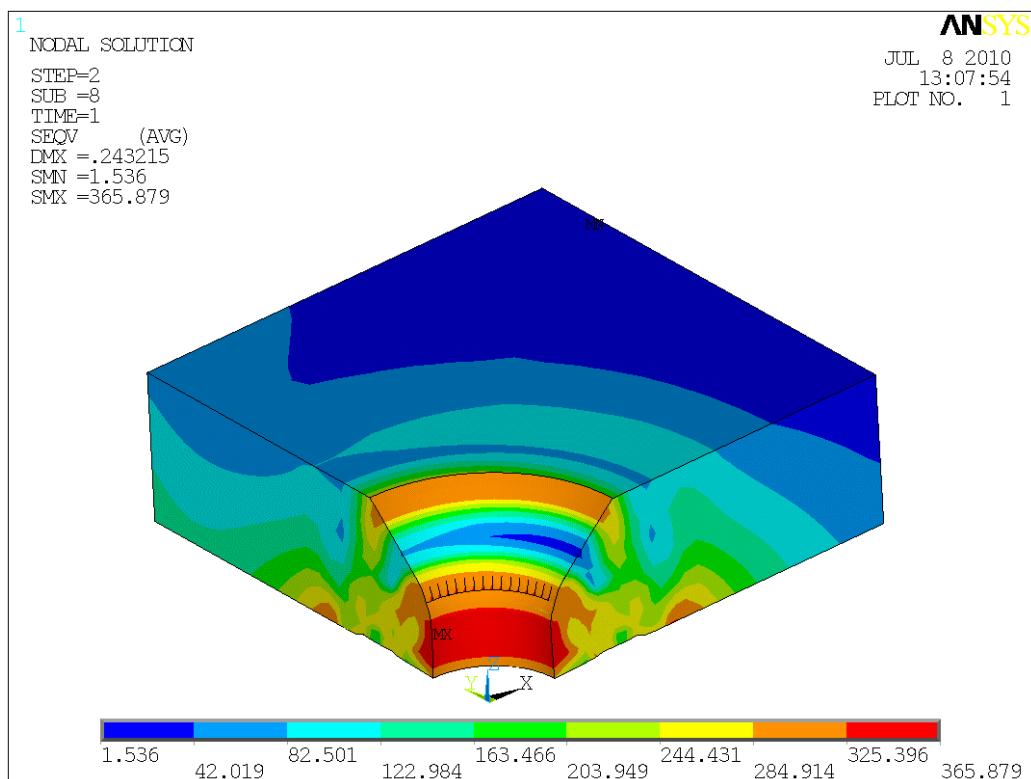


Рис. 12. Поле распределения эквивалентных напряжений Мизеса в полосе с цилиндрикоконическим отверстием после извлечения обжимок

В процессе обжата отверстий с образованием лунок сегментной конфигурации отверстие приобретает эллиптическую форму, при этом максимальное уменьшение диаметра составляет 0,128 мм.

При совместном локальном и барьерном обжате с образованием кольцевой канавки максимальное уменьшение диаметра составляет 0,0866 мм.

В качестве параметров, характеризующих локальное НДС, в зоне цилиндриконического отверстия определены:

- 1) главные растягивающие напряжения σ_1 ;
- 2) главные растягивающие деформации ε_1 (упругая составляющая);
- 3) удельная энергия деформирования w_1 .

Проанализировано изменение главных растягивающих напряжений в полосе по толщине в сечении по оси отверстия (рис. 13, 14). На рис. 13 и 14 приняты следующие обозначения: 1 – полоса с цилиндрическим отверстием; 2 – полоса с цилиндриконическим отверстием; 3 – полоса с цилиндриконическим отверстием, обработанная методом выштамповки лунок сегментной конфигурации; 4 – полоса с цилиндриконическим отверстием, обработанная методом локального обжата; 5 – полоса с цилиндриконическим отверстием, обработанная комбинированным методом.

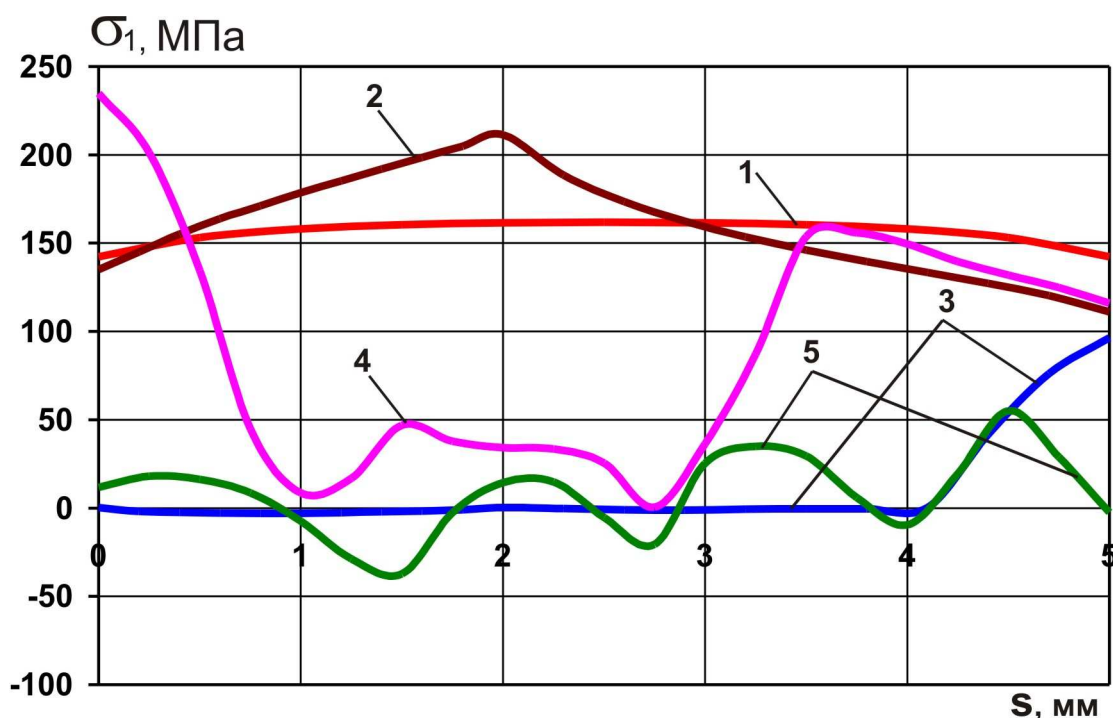


Рис. 13. Характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине в полосе с отверстием при уровне нагружения $\sigma_{\text{бр}} = 50$ МПа

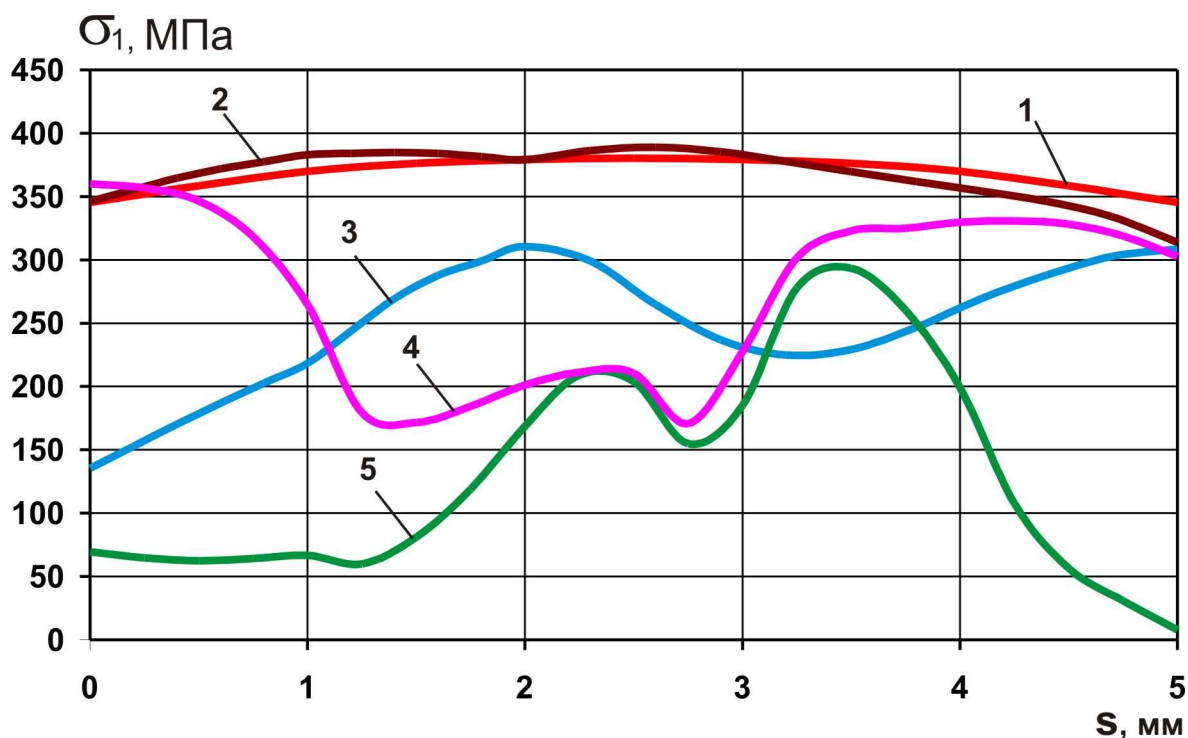


Рис. 14. Характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине в полосе с отверстием при уровне нагружения $\sigma_{\text{бр}} = 150$ МПа

Вычисленные параметры локального НДС в сечениях по оси отверстия приведены к отнулевому циклу нагружения с помощью формулы Одингга для вычисления максимальных значений отнулевого цикла.

Проанализировано влияние уровня нагружения на изменение максимальных главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла (рис. 15 – 17).

На рис. 15 – 17 приняты следующие обозначения: 1 – полоса с цилиндрическим отверстием; 2 – полоса с цилиндроконическим отверстием; 3 – полоса с цилиндроконическим отверстием, обработанная методом выштамповки лунок сегментной конфигурации, в сечении по оси отверстия; 4 – полоса с цилиндроконическим отверстием, обработанная методом выштамповки лунок сегментной конфигурации, в зоне выштамповки; 5 – полоса с цилиндроконическим отверстием, обработанная методом локального обжатия, в сечении по оси отверстия; 6 – полоса с цилиндроконическим отверстием, обработанная комбинированным методом, в сечении по оси отверстия; 7 – полоса с цилиндроконическим отверстием, обработанная комбинированным методом, в зоне кольцевой выштамповки.

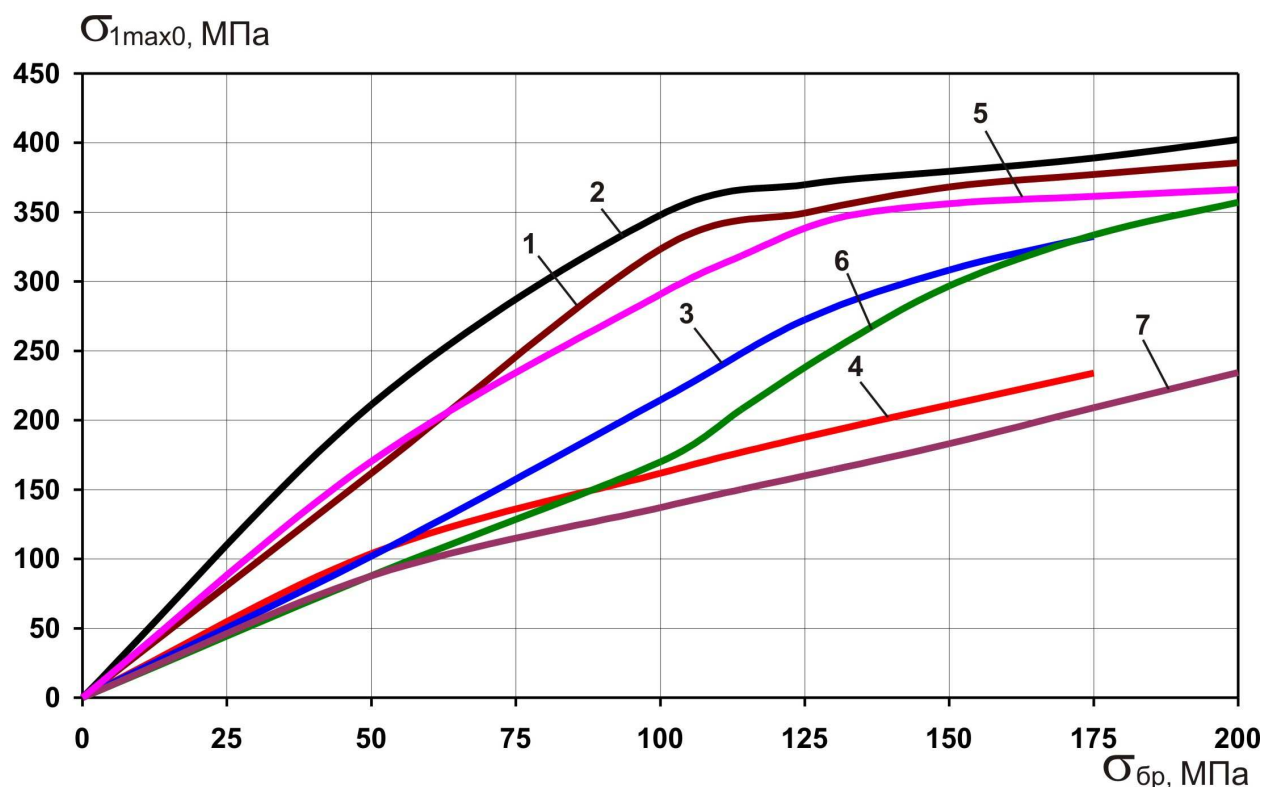


Рис. 15. Влияние уровня нагружения на распределение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

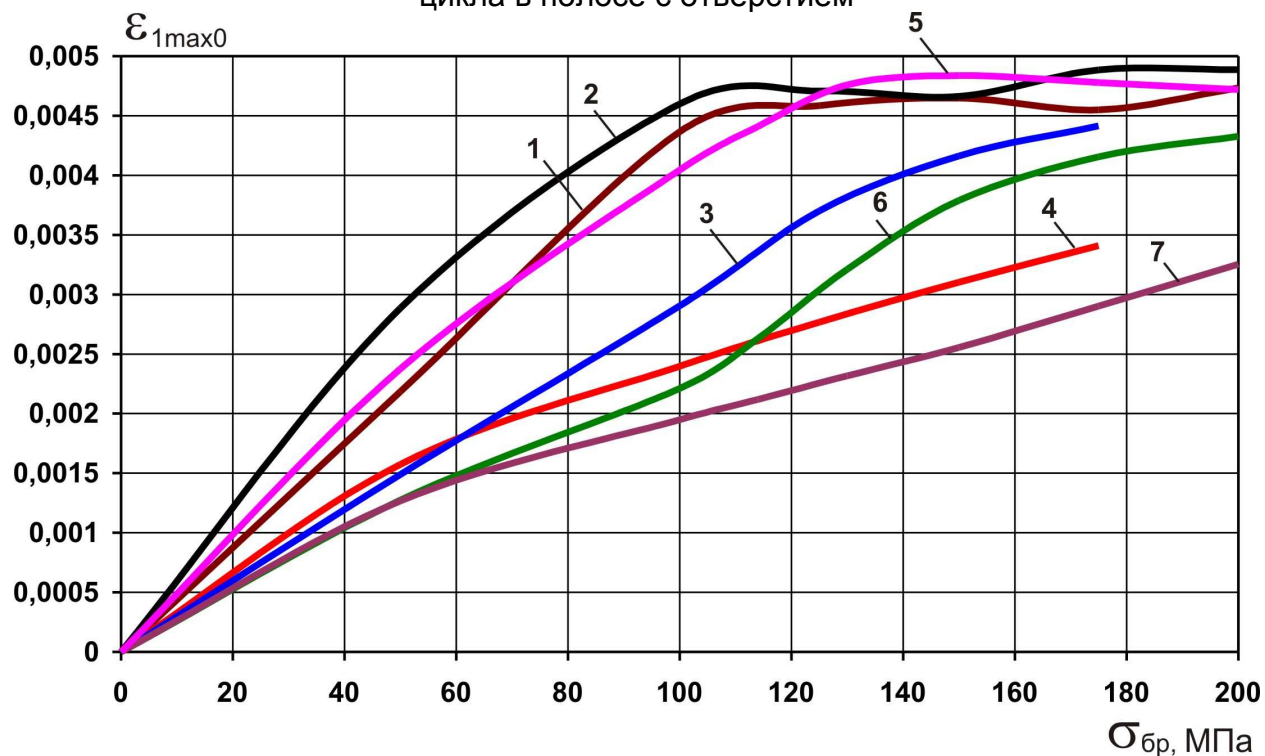


Рис. 16. Влияние уровня нагружения на распределение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

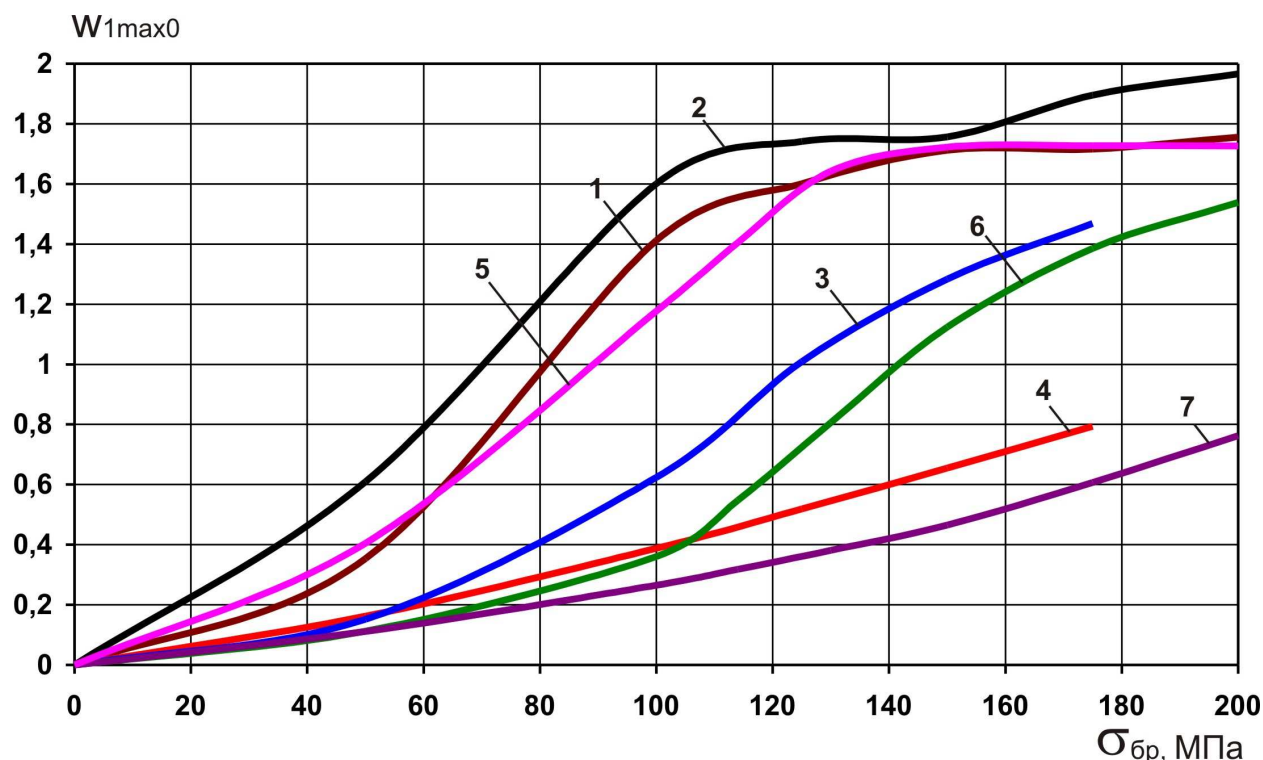


Рис. 17. Влияние уровня нагружения на распределение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с цилиндрическим отверстием

Выводы:

1. Разработан метод анализа влияния совместного локального и барьерного обжатия на характеристики локального НДС полосы с цилиндрическим отверстием

2. В диапазоне растягивающих напряжений $\sigma_{бр} = 50 \dots 175$ МПа выштамповка лунок сегментной конфигурации глубиной 0,3 мм на нижней поверхности полосы приводит к снижению величины максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,17-2,07 раза, главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла – в 1,1-1,94 раза и величины максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла – в 1,29-4,01 раза по сравнению с соответствующими величинами для необработанной полосы с цилиндрическим отверстием. Сравнение проводили в сечении по оси отверстия.

3. В диапазоне растягивающих напряжений $\sigma_{бр} = 50 \dots 175$ МПа комбинированное упрочнение приводит к снижению величины максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,17-2,4 раза, главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла – в 1,29-2,26 раза и величины максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла – в 1,37-5,43 раза по сравнению с соответствующими величинами для необработанной полосы с цилиндрическим отверстием.

Список литературы

1. Экспериментальное исследование влияния последовательного упрочнения пластин в зоне отверстий раскаткой и барьерным обжатием, дорнованием и барьерным обжатием на их усталостную долговечность / А.Г. Гребеников, В.А. Матвиенко, А.М. Гуменный, А.С. Третьяков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 37. – Х., 2007. – С. 44 – 52.
2. Метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС при растяжении / А.Г. Гребеников, С.П. Светличный, В.А. Матвиенко, А. М. Гуменный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 37. – Х., 2007. – С. 5 – 17.
3. Влияние последовательного применения дорнования и барьерного обжатия на характеристики локального НДС стрингера с отверстиями для перетекания топлива / А.Г. Гребеников, А.М. Гуменный, В.А. Матвиенко, С.П. Светличный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 40. – Х., 2008. – С. 54 – 69.
4. Кудрявцев И.В. Упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием / И.В. Кудрявцев // Вестник машиностроения. – 1977. – № 3. – С. 32 – 36.
5. Местное глубокое пластическое деформирование как средство повышения долговечности элементов конструкций / В.А. Борог, С.Я. Сорокин, В.И. Мишин и др. // Авиационная промышленность. – 1981. – № 6. – С. 5 – 12.
6. Пширков В.Ф. Технология выполнения высокоресурсных соединений / В.Ф. Пширков. – М.: Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации», 1980. – 170 с.
7. Технологические способы упрочнения отверстий местным глубоким пластическим деформированием / А.А. Сердюк, С.П. Крапивин, А.О. Рейдман, В.Н. Беспалько // Авиационная промышленность. – 1983. – № 8. – С. 8 – 11.
8. ANSYS Analysis Guide. Element Reference. Element Library. 001087. 4th Edition. SAS IP[©].
9. 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.

Рецензент: канд. техн. наук Е.Т. Василевский, АНТК, Киев

Поступила в редакцию 03.06.10

Метод аналізу впливу спільного локального та бар'єрного обтиснення на характеристики локального НДС розтягнутої смуги з циліндроконічним отвором

Розроблен метод аналізу впливу спільного локального та бар'єрного обтиснення на характеристики локального НДС розтягнутої смуги з циліндроконічним отвором. У діапазоні розтягальних напружень $\sigma_{бр} = 50 \dots 175$ МПа спільне локальне та бар'єрне обтиснення приводить до зниження величини максимальних головних розтягувальних напружень еквівалентного віднульового циклу в 1,17–2,4 рази, головних розтягувальних деформацій еквівалентного віднульового циклу – в 1,29–2,26 рази та величини максимальної питомої енергії деформування еквівалентного віднульового циклу в 1,37–5,43 раза у зрінанні з відповідними велечинами для необробленої смуги з циліндроконічним отвором.

Ключові слова: смуга з циліндроконічним отвором, лунка сегментної конфігурації, локальне НДС, контактний елемент, питома енергія деформування.

Method of analysis of impact of combined and barrier compression on the characteristics of local deflected mode of a stretched plate with a cylinder-conic hole

The method of analysis of impact of combined and barrier compression on the characteristics of local mode of deformation of a stretched plate with a cylinder-conic hole has been developed. In the range of tensile stresses $\sigma_{br} = 50 \dots 175$ mPa, the combined local and barrier compression leads to reduction of value of main maximal tensile stresses of an equivalent zero-to-compression stress cycle in 1,17-2,4 times, main tensile deformations – in 1,29-2,26 times and the value of maximal specified energy of deformation of the zero-to-compression stress cycle – in 1,37–5,43 comparing to the corresponding values for an unprocessed plate with a cylinder-conic hole.

Keywords: plate with cylinder-conic hole, hole of segment shape, local deflected mode, contact elements, specified deformation energy.