

**Метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики их локального НДС при растяжении**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,  
ОАО УкрНИИТ*

Эффективным технологическим методом повышения ресурса деталей и агрегатов, работающих в условиях циклических нагрузок, является обработка деталей методами поверхностного пластического деформирования (ППД) [1–5].

При использовании этих методов в результате давления инструмента на металл микронеровности и волнистость исходной поверхности сглаживаются, улучшается чистота и увеличивается точность обработки. Кроме того, при деформировании стенок отверстий в зоне вблизи отверстия возникают остаточные напряжения, изменяющие амплитуду локальных напряжений и деформаций при циклическом нагружении детали, что обеспечивает изменение долговечности упрочненной детали. В настоящее время широко применяют методы ППД для обработки отверстий статическим способом. В зависимости от формы, размеров, материала детали, предъявляемых требований к геометрическим параметрам и качеству поверхности используют различные способы упрочняющей обработки ППД.

Многие авторы, работающие в данной области, исследовали влияние технологии упрочнения, проводя экспериментальные исследования влияния различных методов упрочнения деталей возле отверстий на усталостную долговечность образцов. Экспериментальные исследования выполняли для оптимизации геометрии деформирующего инструмента и режимов процессов упрочнения. При этом вопросу определения локального НДС в зоне отверстий уделялось мало внимание. Не проводились работы, в которых изучалось бы влияние последовательного применения нескольких методов упрочнения на характеристики локального НДС с учетом истории нагружения.

Целью данной работы является анализ характеристик локального НДС пластины с тремя отверстиями с фаской  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочненной методом последовательного применения дорнования и барьерного обжатия, для прогнозирования влияния данного метода упрочнения на усталостную долговечность образца пластины. При анализе характеристик локального НДС вблизи концентратора не учитывают шероховатость обрабатываемой поверхности и дефекты, возникающие в процессе выполнения отверстий.

В качестве образца пластины с тремя отверстиями рассмотрен стандартный образец ( $B/d=6$ ), применяемый при проведении усталостных испытаний.

Геометрия образца и технологического инструмента, используемого для упрочнения, а также основные размеры показаны на рис. 1 – 3. Образец изготовлен из алюминиевого сплава Д16Т [6].

Для анализа характеристик локального НДС и оценки эффективности предложенного последовательного упрочнения применен метод конечных элементов, реализованный в системе ANSYS.



Метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС включает в себя:

1. Создание геометрических моделей пластины с тремя отверстиями и технологического инструмента, используемого для упрочнения пластины.

2. Разработку расчетных схем.

3. Задание физико-механических свойств материала и кривой деформирования.

4. Создание конечно-элементной модели пластин с тремя отверстиями, а также учет контактного взаимодействия технологического инструмента с упрочняемыми участками поверхности пластины.

5. Задание граничных условий.

6. Моделирование процесса дорнования, включающего в себя внедрение дорнов в стенки отверстий, путем перемещения дорна в осевом направлении на величину 0,6 мм. Определение напряжений и деформаций после внедрения дорна.

7. Моделирование процесса дорнования путем перемещения дорна в осевом направлении на величину 8 мм. Определение напряжений и деформаций после дорнования. Анализ геометрии отверстия после дорнования.

8. Моделирование процесса барьерного обжатия поверхности пластины вблизи отверстий на глубину 0,3 мм. Определение напряжений и деформаций после обжатия.

9. Моделирование процесса отведения обжимок в исходное положение. Определение остаточных напряжений и деформаций в пластине после отведения обжимок.

10. Приложение растягивающих напряжений  $\sigma_{бр}^0$  в торцевом сечении пластины. Определение напряжений и деформаций в пластине в нагруженном состоянии.

11. Моделирование процесса разгрузки пластины. Определение напряжений и деформаций после разгрузки.

12. Расчет характеристик локального НДС пластины с тремя отверстиями, упрочненной методом дорнования с натягом и последующего барьерного обжатия на заданную глубину при разных уровнях нагружения  $\sigma_{бр}^0$ .

13. Качественный и количественный анализ распределения эквивалентных и главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования в пластине в зонах крайнего отверстия и обжатия.

14. Определение максимальных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в зонах вероятного усталостного разрушения.

15. Сравнение полученных характеристик локального НДС с характеристиками для базовых образцов пластины с одним отверстием и тремя отверстиями без их упрочнения.

В качестве метода упрочнения рассмотрено совместное последовательное применение метода дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм.

Величина эксплуатационных напряжений при численных исследованиях составляет  $\sigma_{бр}^0 = 0; 100; 130; 150$  МПа.

Созданные геометрические модели пластины и технологического инструмента (см. рис. 4) переданы в систему инженерного анализа ANSYS с использованием формата импорта CATIA v5 и послужили основой для построения конечно-элементных моделей.

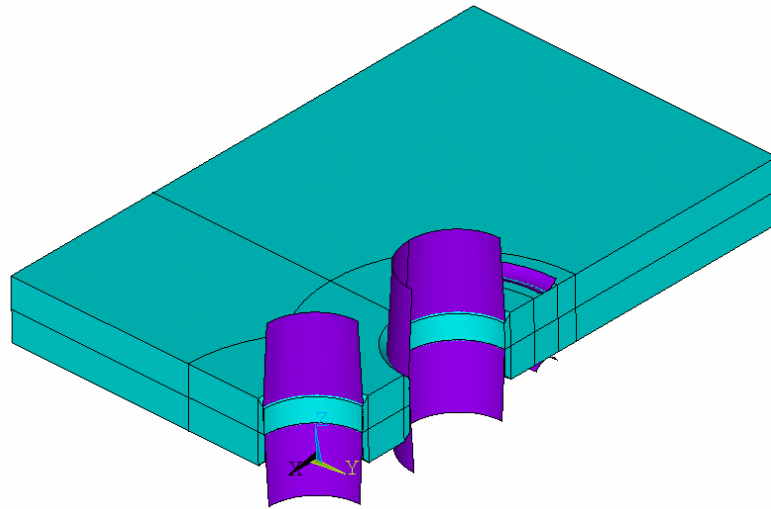


Рис. 4. Геометрические модели пластины, дорнов и обжимок

Расчетная схема пластины с тремя отверстиями, упрочненной методом последовательного применения дорнования и барьерного обжатия показана на рис. 5.



Рис. 5. Расчетная схема пластины с тремя отверстиями упрочняемой методом дорнования и выштамповки сегментных лунок: а – этап дорнования и извлечения дорнов; б – этап приложения растягивающих напряжений

При выполнении расчетов принято допущение: технологический инструмент, используемый для упрочнения пластины в зоне отверстий, считается абсолютно жестким. Данное допущение правомерно, поскольку жесткость технологического инструмента в три раза выше жесткости пластины и в ходе выполнения расчетов не исследуют НДС в технологическом инструменте. В расчетной схеме не учитывают степень шероховатости поверхности стенок отверстий.

Построены конечно-элементные модели пластины и соответствующего технологического инструмента (см. рис. 6 – 9). Основой для построения конечно-элементных моделей явились трехмерные модели пластины с тремя отверстиями и модели деформирующих элементов, созданные с помощью системы CATIA и переданные в препроцессор системы ANSYS.

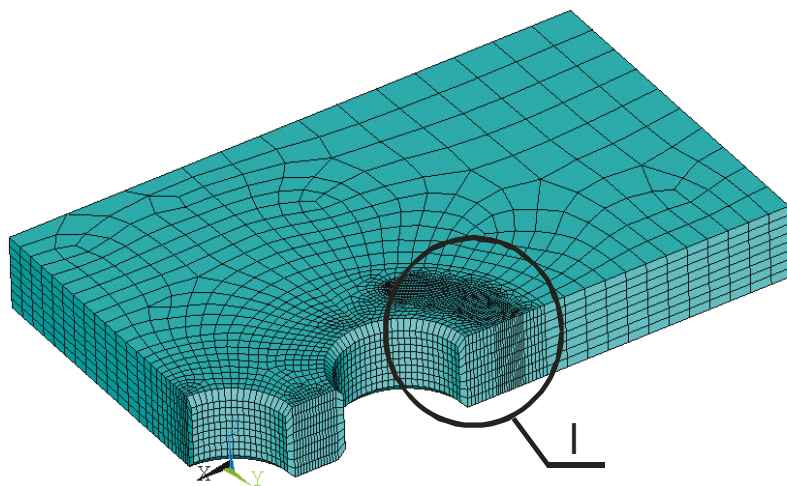


Рис. 6. Конечно-элементная модель пластины с тремя отверстиями, упрочняемой методом дорнования и выштамповки сегментных лунок

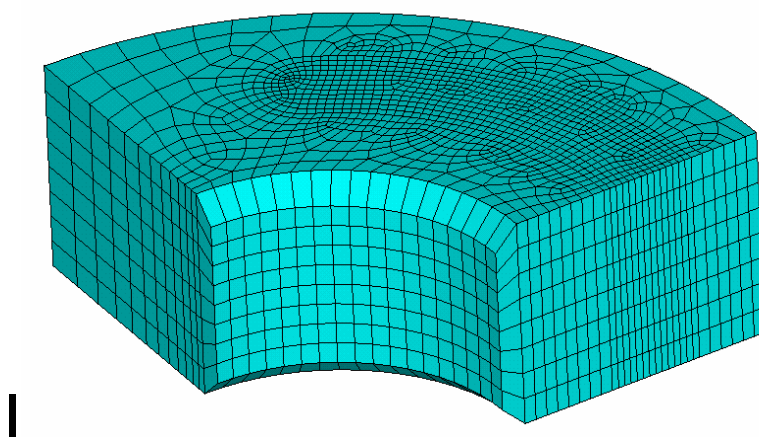


Рис. 7. Фрагмент конечно-элементной модели пластины с тремя отверстиями в зоне выштамповки сегментных лунок

В результате решения задач были получены численные значения параметров, характеризующих НДС пластины в зоне отверстий.

В качестве параметров, характеризующих НДС, рассмотрены: главные растягивающие напряжения  $\sigma_1$  и деформации  $\varepsilon_1$ , а также их произведение  $\sigma_1^* \varepsilon_1$ . Определен характер распределения напряжений и деформаций в пластине в зоне отверстий для всего диапазона прикладываемых напряжений ( $\sigma_{br}^0 = 0, 100, 130$  и  $150$  МПа), используемый для качественной предварительной оценки результата (см. рис. 10 – 14).

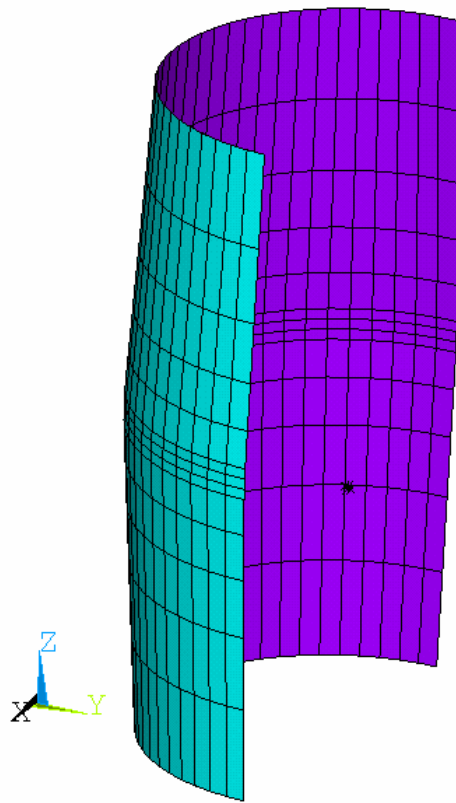


Рис. 8. Конечно-элементная модель дорна (на рисунке изображен дорн, вставляемый в крайнее отверстие)

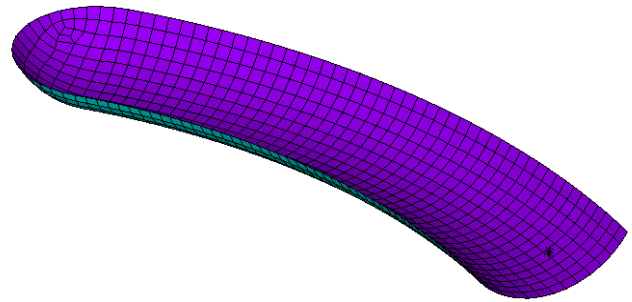
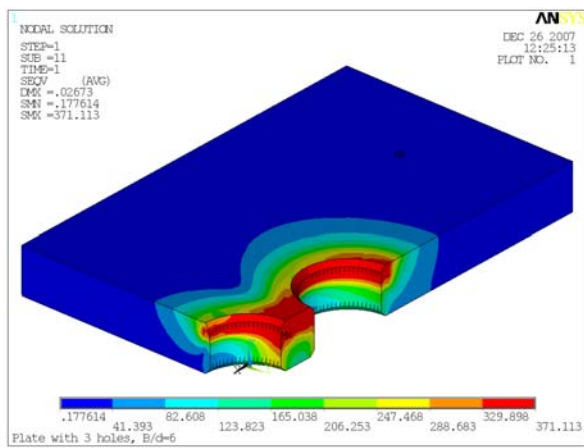
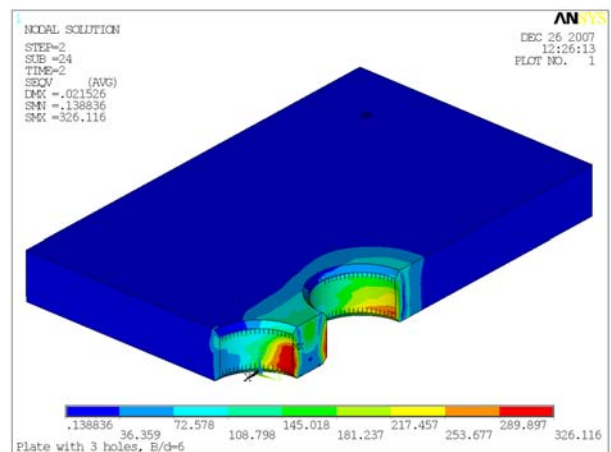


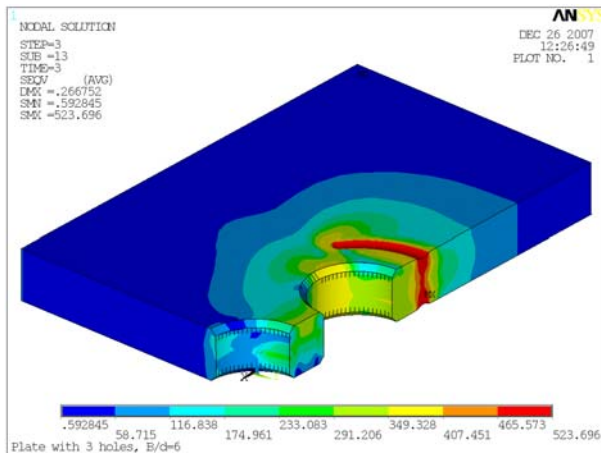
Рис. 9. Конечно-элементная модель обжимки для выштамповки сегментных лунок (на рисунке изображена только верхняя обжимка)



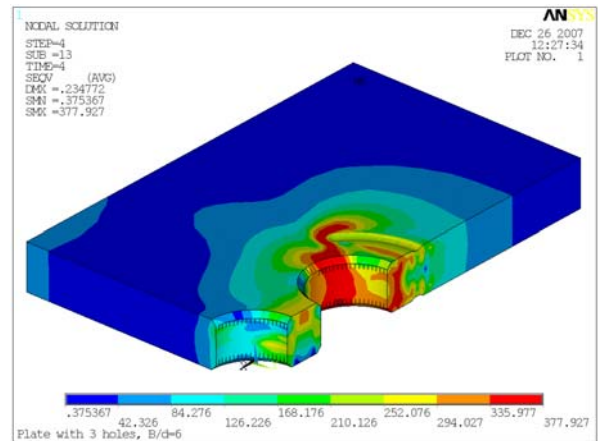
а



б



В



Г

Рис. 10. Характер распределения эквивалентных напряжений Мизеса в пластине с тремя отверстиями, упрочняемой методами дорнования с натягом 1% и последующего барьерного обжатия на глубину 0,3 мм:  
 а – на начальном этапе – внедрение дорна;  
 б – после дорнования;  
 в – после дорнования и последующего обжатия на глубину 0,3 мм;  
 г – после упрочнения

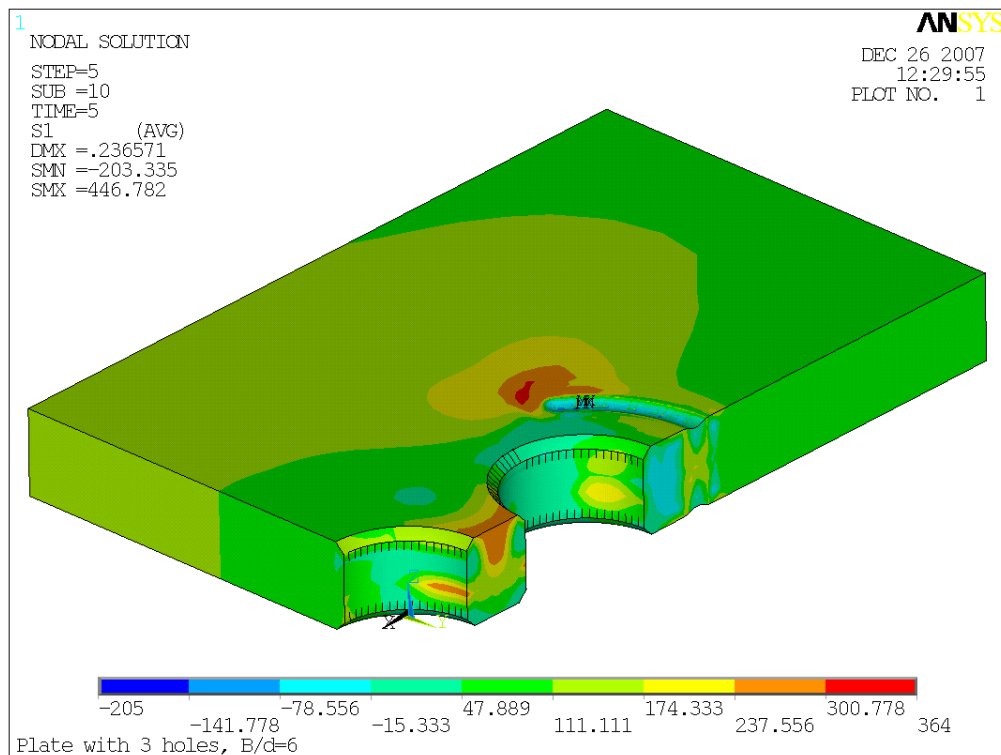


Рис. 11. Характер распределения главных растягивающих напряжений в пластине с тремя отверстиями, упрочненной методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм ( $\sigma_{\text{ор}}^0 = 100$  МПа)



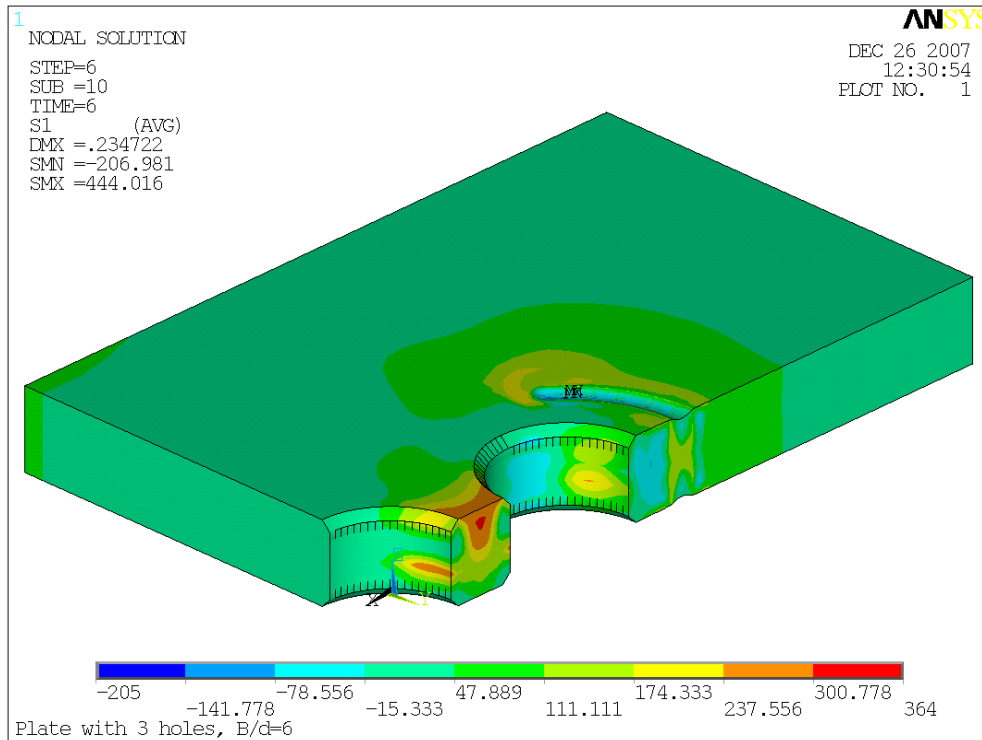


Рис. 12. Характер распределения главных растягивающих напряжений в пластине с тремя отверстиями, упрочненной методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм ( $\sigma_{бр}^0 = 0$  МПа – после разгрузки)

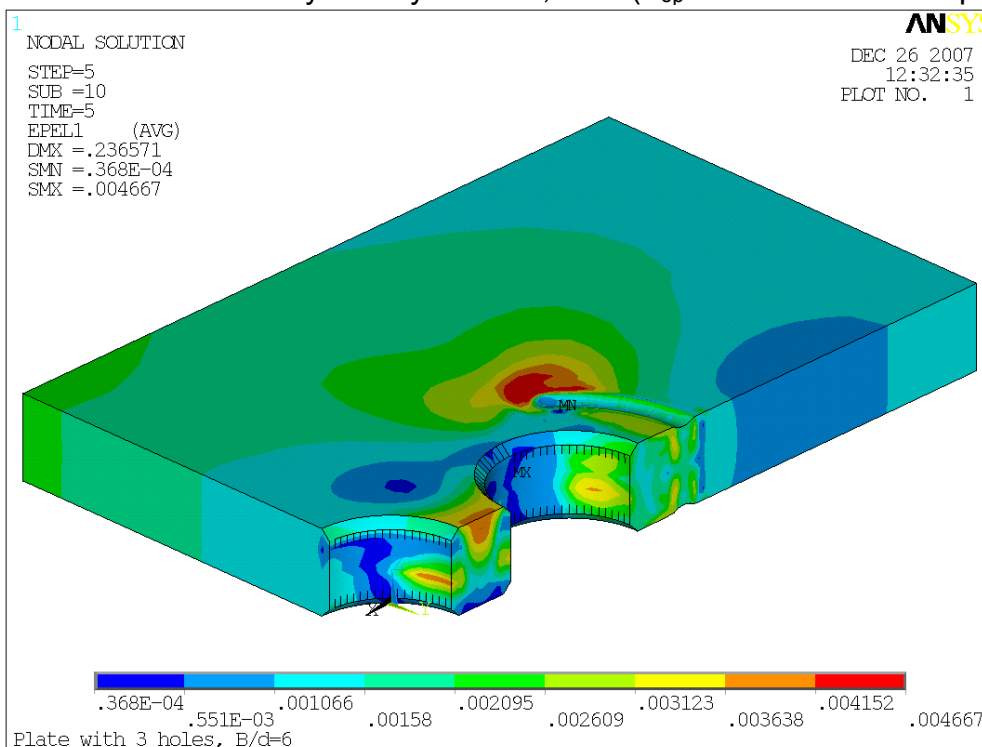


Рис. 13. Характер распределения главных растягивающих деформаций (упругая составляющая) в пластине с тремя отверстиями, упрочненной методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм ( $\sigma_{бр}^0 = 100$  МПа)



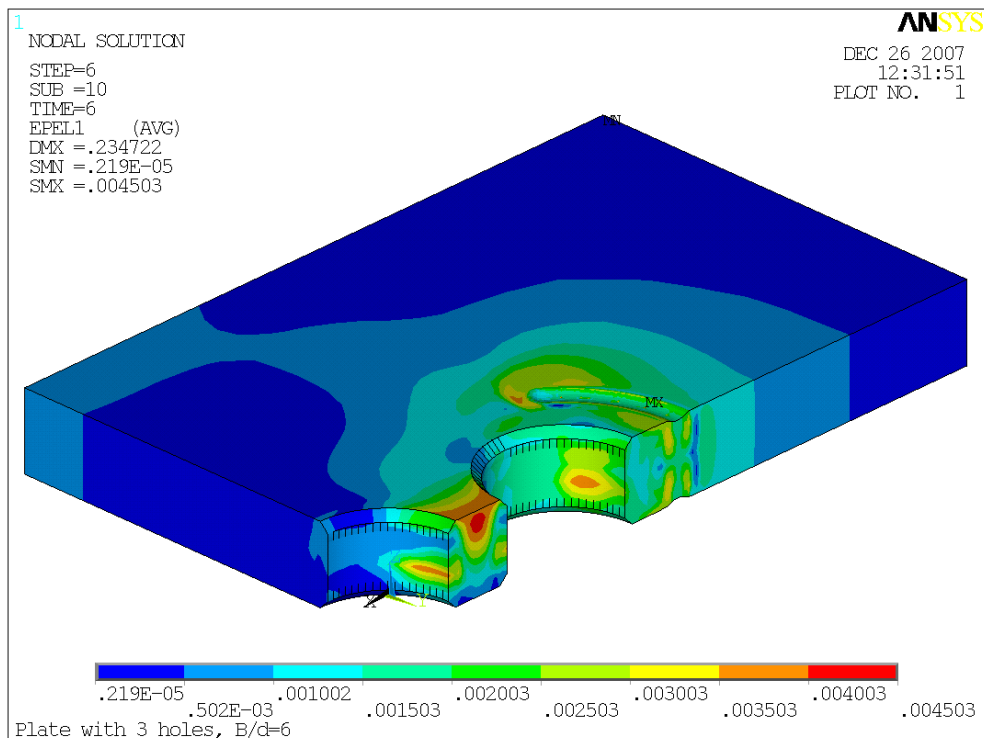


Рис. 14. Характер распределения главных растягивающих деформаций (упругая составляющая) в пластине с тремя отверстиями, упрочненной методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм ( $\sigma_{бр}^0 = 0$  МПа – после разгрузки)

Анализ характера распределения главных растягивающих напряжений и деформаций показывает, что в процессе последовательного применения дорнования и барьерного обжатия возникает дополнительная зона концентрации напряжений в зоне обжатия.

Для анализа эффективности применяемого метода упрочнения, позволяющего повысить усталостную долговечность пластины в зоне отверстий, в данной работе в качестве критериев используем следующие:

- 1) максимальные главные напряжения  $\sigma_{1max}$ ;
- 2) максимальные главные деформации  $\varepsilon_{1max}$ ;
- 3) максимальная удельная энергия деформирования  $w_{1max} = \sigma_{1max} \cdot \varepsilon_{1max}$ .

При расчете амплитуды деформаций рассматриваем упругую составляющую деформаций, поскольку именно она сильно изменяется в процессе циклического нагружения.

Цикл нагружения приведен к эквивалентному отнулевому циклу по формуле Одингга.

Для этого:

1. Определены значения амплитуды напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования в зоне вероятного усталостного разрушения в сечениях по осям отверстий и в зоне обжатия.

2. Рассчитаны максимальные напряжения, деформации и удельная энергия деформирования эквивалентного отнулевого цикла в зоне вероятного усталостного разрушения.

3. Определены максимальные значения рассчитываемых в п. 2 параметров в диапазоне эксплуатационных нагрузок.

По результатам расчета построены графики изменения максимальных напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла при  $\sigma_{бр}^0 = 0, 100, 130$  и  $150$  МПа (рис. 14–16).

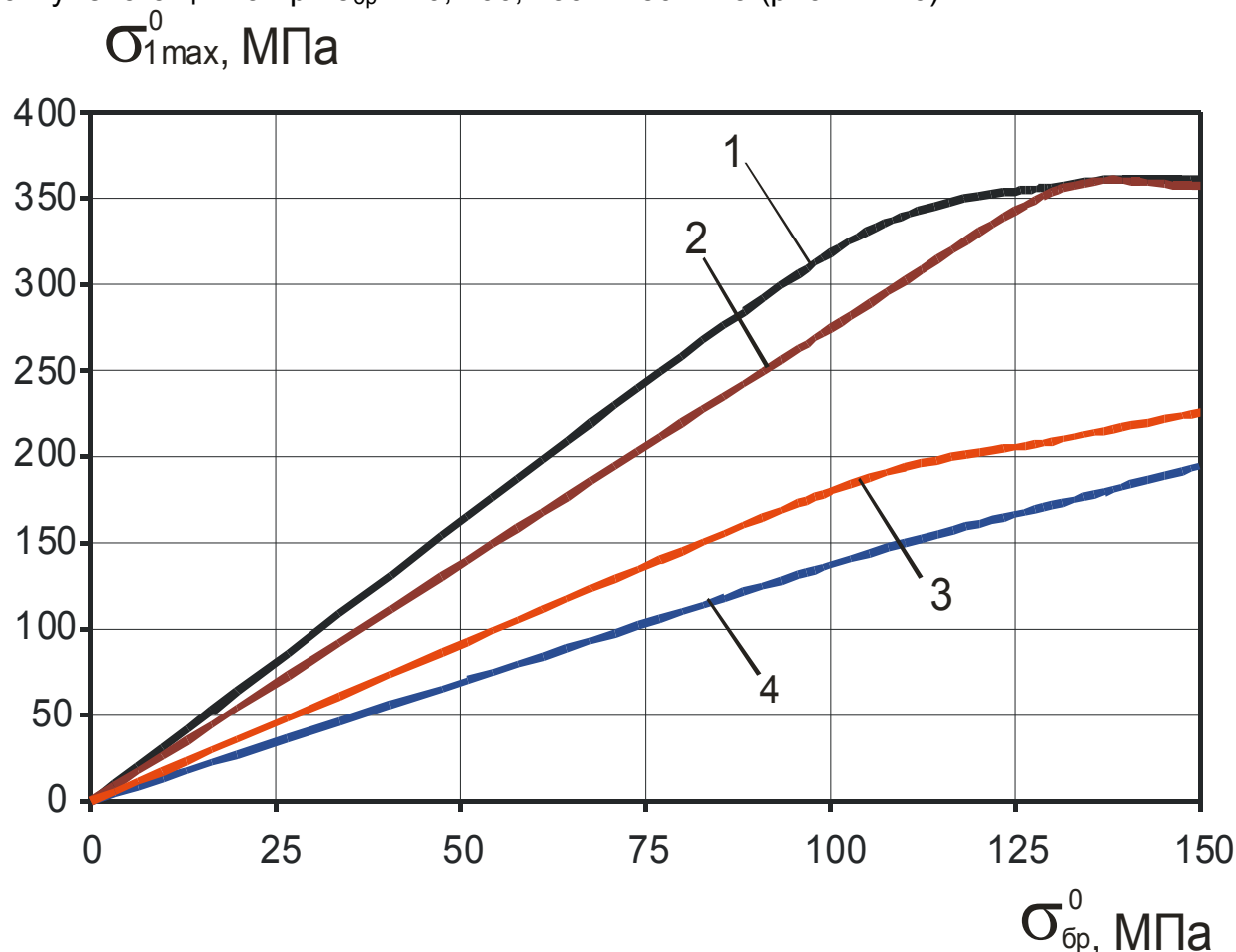


Рис. 14. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальных главных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине:

- 1 – с отверстием  $\varnothing 8,006$  мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;
- 2 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,006$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;
- 3 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , по оси крайнего отверстия;
- 4 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , зона обжатия

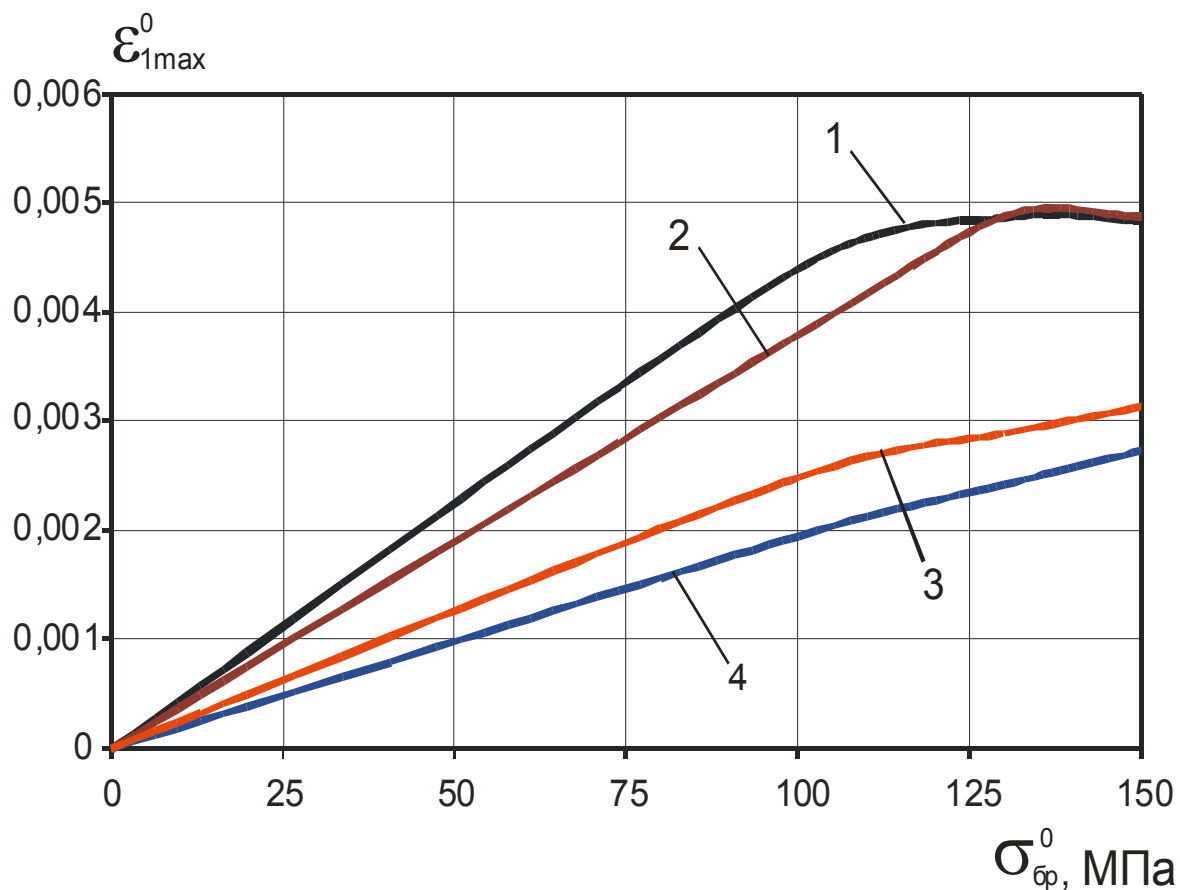


Рис. 15. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальных главных деформаций эквивалентного отнулевого цикла в пластине:

1 – с отверстием  $\varnothing 8,006$  мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;

2 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,006$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;

3 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , по оси крайнего отверстия;

4. с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , зона обжатия

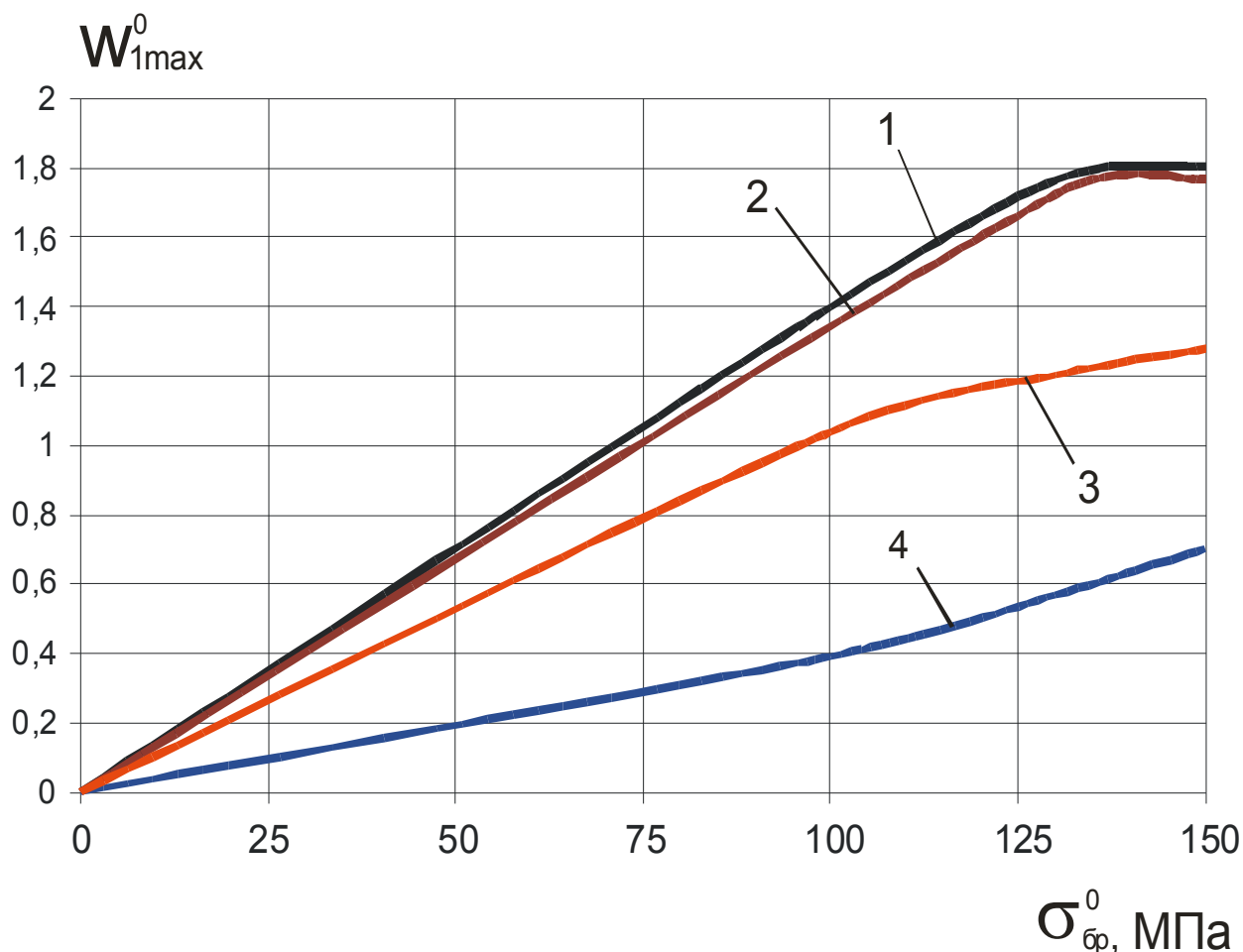


Рис. 16. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине:

- 1 – с отверстием  $\varnothing 8,006$  мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;
- 2 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,006$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;
- 3 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , по оси крайнего отверстия;
- 4 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , зона обжатия

### Выводы

1. Разработан метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС, позволяющий прогнозировать зоны вероятного усталостного разрушения.

2. Совместное применение метода дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм приводит к снижению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,84–2,06 раза, максимальных главных деформаций – в 1,79–2,01 раза и удельной энергии деформирования – в 2,51–3,01 раза по сравнению с этими характеристиками для пластины с тремя отверстиями без упрочнения отверстий.

3. Предложенный метод оценки эффективности применения методов упрочнения может быть использован для пластин с отверстиями различной конфигурации, а также других типов концентраторов и для выбора оптимальных параметров технологического инструмента и режимов упрочнения.

### Список литературы

1. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.

2. Пширков В.Ф. Технология выполнения высокоресурсных соединений. – М.: Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации», 1980. – 170 с.

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

4. Бронз Л.Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов. – М.: Машиностроение, 1986.–184 с.

5. Гребеников А.Г. Мовчан Ю.А., Гребеников В. / Анализ характеристик локального НДС с помощью системы ANSYS в пластине с отверстиями, подверженной упрочнению дорнованием или глубокого пластического деформированию и растяжению // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. научн. трудов Нац. аэрокосм. университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Х.: НАКУ, 2003. ».– Вып 32(1). – С. 124–138.

6. Авиационные материалы. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы/ Под общей ред. д-ра техн. наук Р.Е. Шалина. – М.: ОНТИ, – 1983. – 350 с.