

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

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

Анализ разрушений натуральных конструкций и результаты испытаний образцов показывают, что в тех случаях, когда не применяют специальные методы повышения характеристик сопротивления усталости зон отверстий, значения показателей качества K_y по отдельным концентраторам могут достигать четырех. Существует ряд конструктивных и технологических приемов, снижающих отрицательное влияние этих отверстий на долговечность конструкции [1, 2].

Многие авторы, работающие в данной области, занимались вопросом отработки технологии методов упрочнения, проводя экспериментальные исследования влияния различных методов упрочнения отверстий на усталостную долговечность образцов. Экспериментальные исследования проводили в целях оптимизации геометрии деформирующего инструмента и режимов процессов упрочнения. При этом вопросу определения локального НДС в зоне отверстий уделялось меньшее внимание.

Применение численных методов анализа эффективности различных способов упрочнения, в частности, метода конечного элемента, реализованного в системе инженерного анализа ANSYS, позволяет проводить численные эксперименты, близкие к условиям натуральных испытаний. Удобством и преимуществом численных исследований являются относительная простота исследования влияния различных параметров (как конструктивных, так и технологических) на характеристики локального НДС, возможность относительно простого сравнения различных вариантов расчета, а также удобство и простота интерпретации полученного результата [3, 4]. Следовательно, данный подход обеспечивает высокую эффективность процесса принятия решения.

Целью данной работы является анализ характеристик локального НДС пластины с тремя отверстиями с фаской $0,5 \times 45^\circ$, упрочненной методом последовательного применения раскатки и барьерного обжатия, а также оценка эффективности использования данных методов упрочнения с точки зрения вероятного повышения усталостной долговечности образца пластины. При анализе характеристик локального НДС вблизи концентратора не учитывают шероховатость обрабатываемой поверхности и дефекты (заусенцы), 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, 2. Образец изготовлен из алюминиевого сплава Д16Т [5].

7. Моделирование процесса извлечения раскатника из отверстий. Определение остаточных напряжений и деформаций после раскатки.
8. Моделирование процесса обжатия поверхности пластины вблизи отверстий на заданную глубину.
9. Моделирование процесса отведения обжимок в исходное положение. Определение остаточных напряжений и деформаций после обжатия.
10. Приложение растягивающих напряжений $\sigma_{бр}$ в торцевом сечении пластины.
11. Моделирование процесса разгрузки.
12. Расчет характеристик локального НДС пластины с тремя отверстиями.
13. Качественный и количественный анализ распределения главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования в пластине в зоне отверстий и зоне обжатия.
14. Определение максимальных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в зонах вероятного усталостного разрушения.
15. Сравнение полученного результата с результатом для базовых образцов пластины с одним отверстием и тремя отверстиями без их упрочнения.

В качестве метода упрочнения рассмотрено совместное последовательное применение метода раскатки с натягом 0,4% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм.

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

Созданные геометрические модели пластины и технологического инструмента переданы в систему инженерного анализа ANSYS, с использованием формат импорта CATIA v5 и послужили основой для построения конечно-элементных моделей.

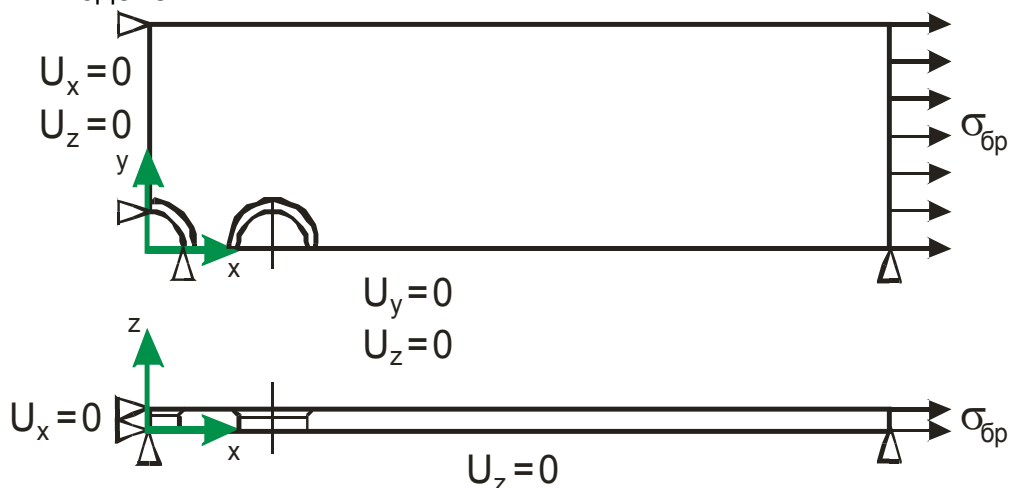


Рис. 3. Расчетная схема пластины с тремя отверстиями

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. 5 – 7). Основой для построения конечно-элементных моделей явились трехмерные модели пластины с тремя отверстиями и модели деформирующих элементов, созданные в системе CATIA и переданные в систему ANSYS.

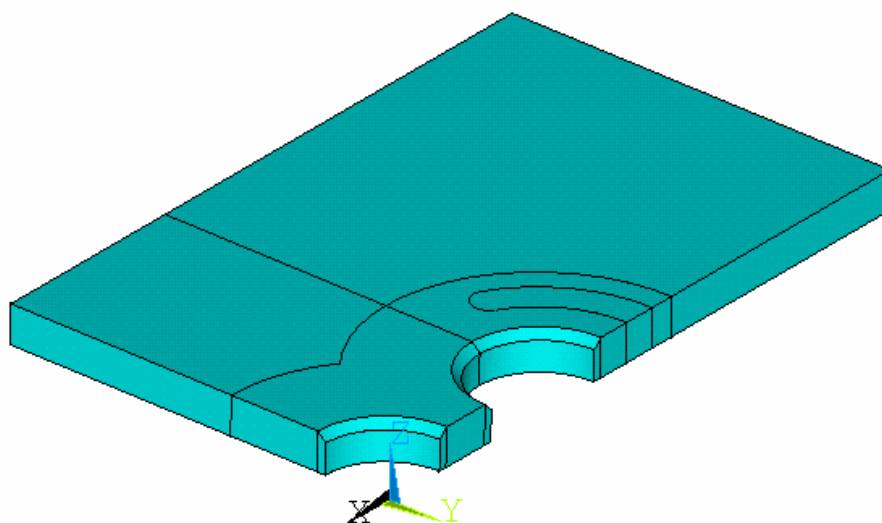


Рис. 4. Трехмерная модель 1/8 пластины с тремя отверстиями

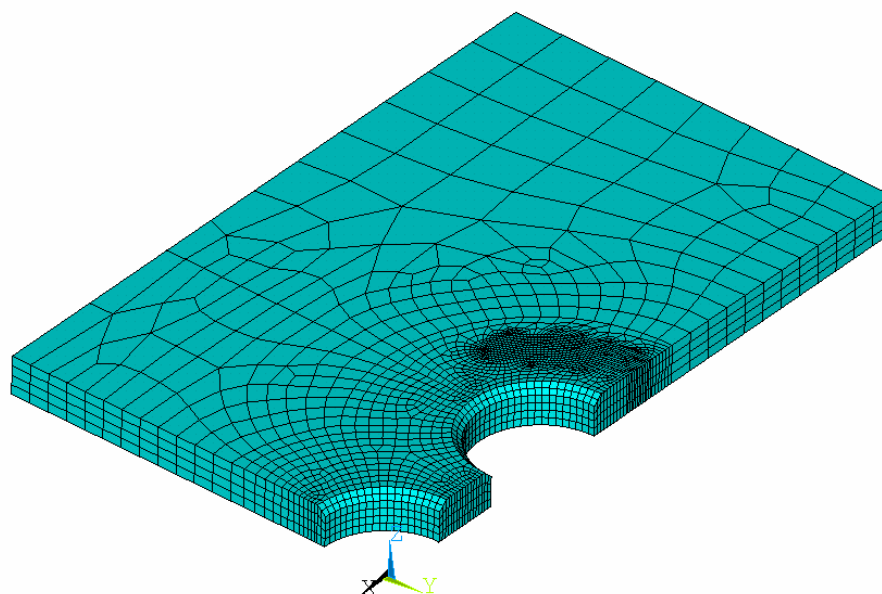


Рис. 5. Конечно-элементная модель пластины с тремя отверстиями, упрочняемой методом раскатки и выштамповки сегментных лунок

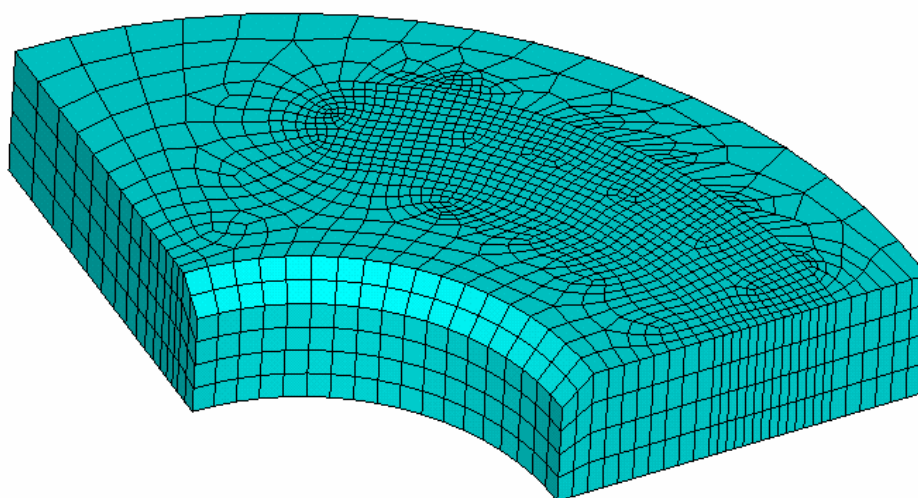


Рис. 6. Фрагмент конечно-элементной модели пластины с тремя отверстиями в зоне выштамповки сегментных лунок

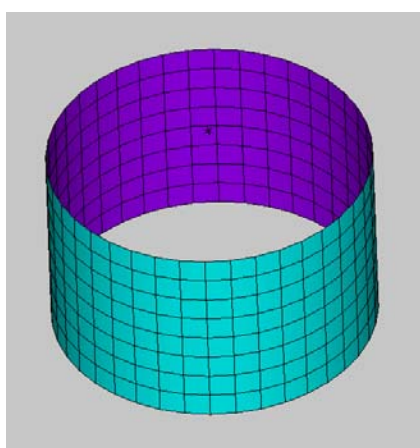


Рис. 7. Конечно-элементная модель раскатника

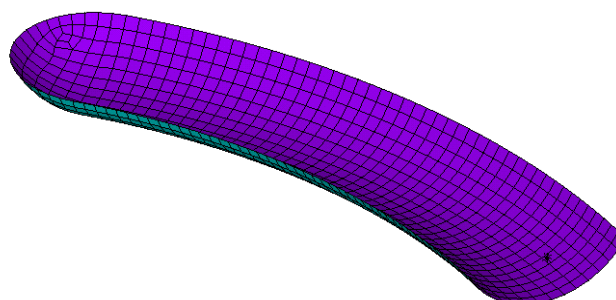


Рис. 8. Конечно-элементная модель обжимки для выштамповки сегментных лунок

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

В качестве параметров, характеризующих НДС, рассмотрены: главные растягивающие напряжения σ_1 и деформации ε_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 ($\sigma_{бр} = 100, 130$ и 150 МПа), используемый для качественной предварительной оценки результата (см. рис. 9, 10).

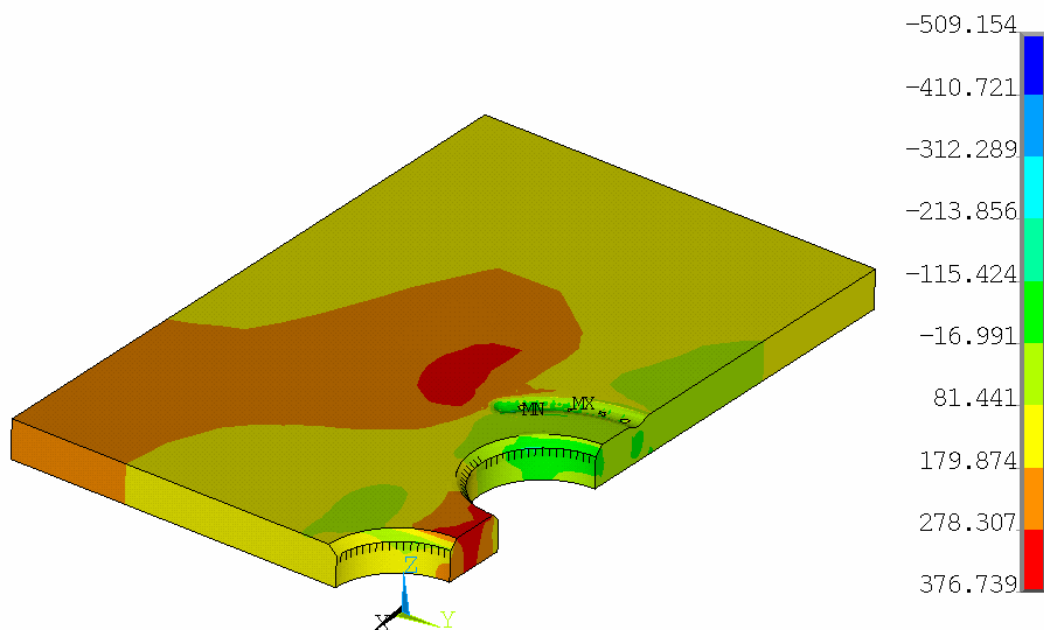


Рис. 9. Характер распределения главных растягивающих напряжений в пластине с тремя отверстиями, упрочненной методом раскатки с натягом 0,4% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм ($\sigma_{бр} = 130$ МПа)

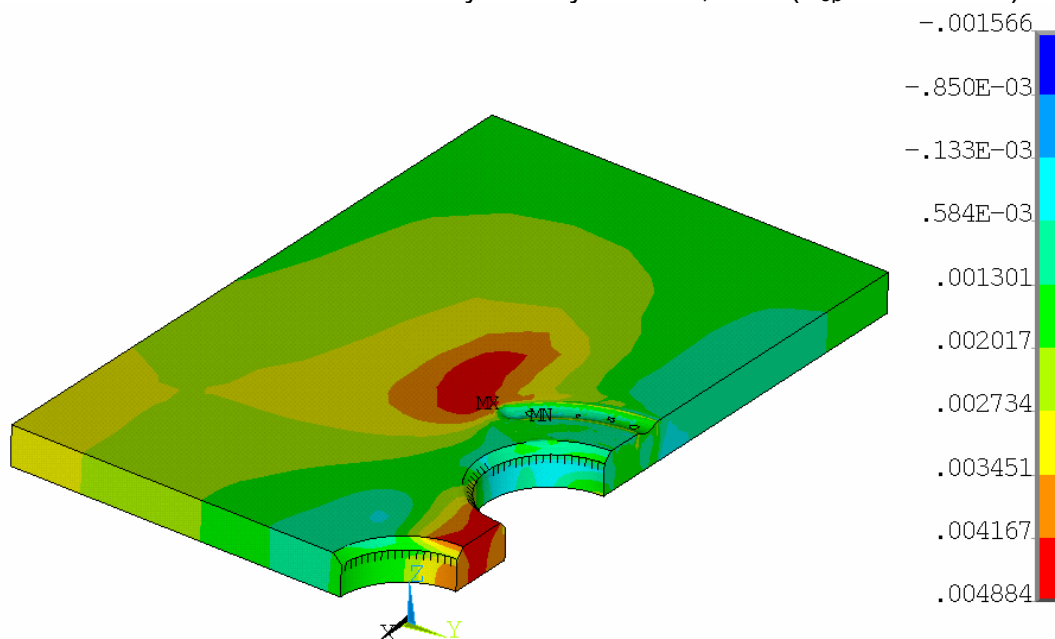


Рис. 10. Характер распределения главных растягивающих деформаций (упругая составляющая) в пластине с тремя отверстиями, упрочненной методом раскатки с натягом 0,4% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм ($\sigma_{бр} = 130$ МПа)

Анализ характера распределения главных растягивающих напряжений и деформаций показывает, что в процессе совместного применения раскатки 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 рассмотрены следующие:

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

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

Исходный 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 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 во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок.

По результатам расчета построены графики изменения максимальных напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок (рис. 10–12).

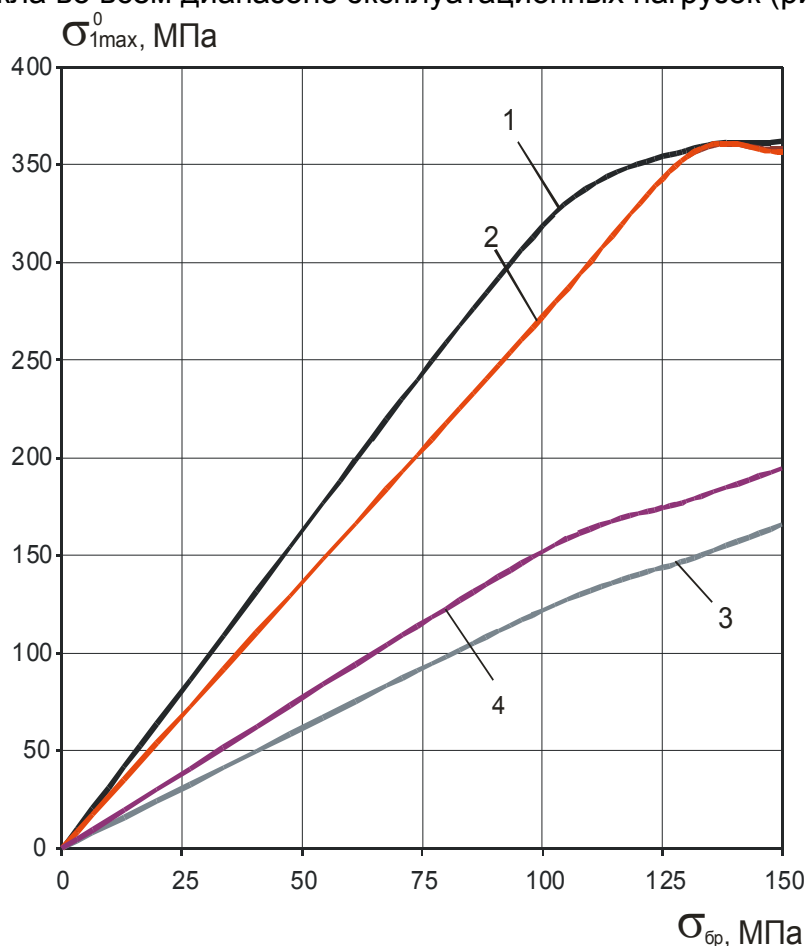


Рис. 11. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальных главных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине

- 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 раскатки с натягом 0,4% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора – 60° , 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 раскатки с натягом 0,4% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора – 60° , зона обжатия

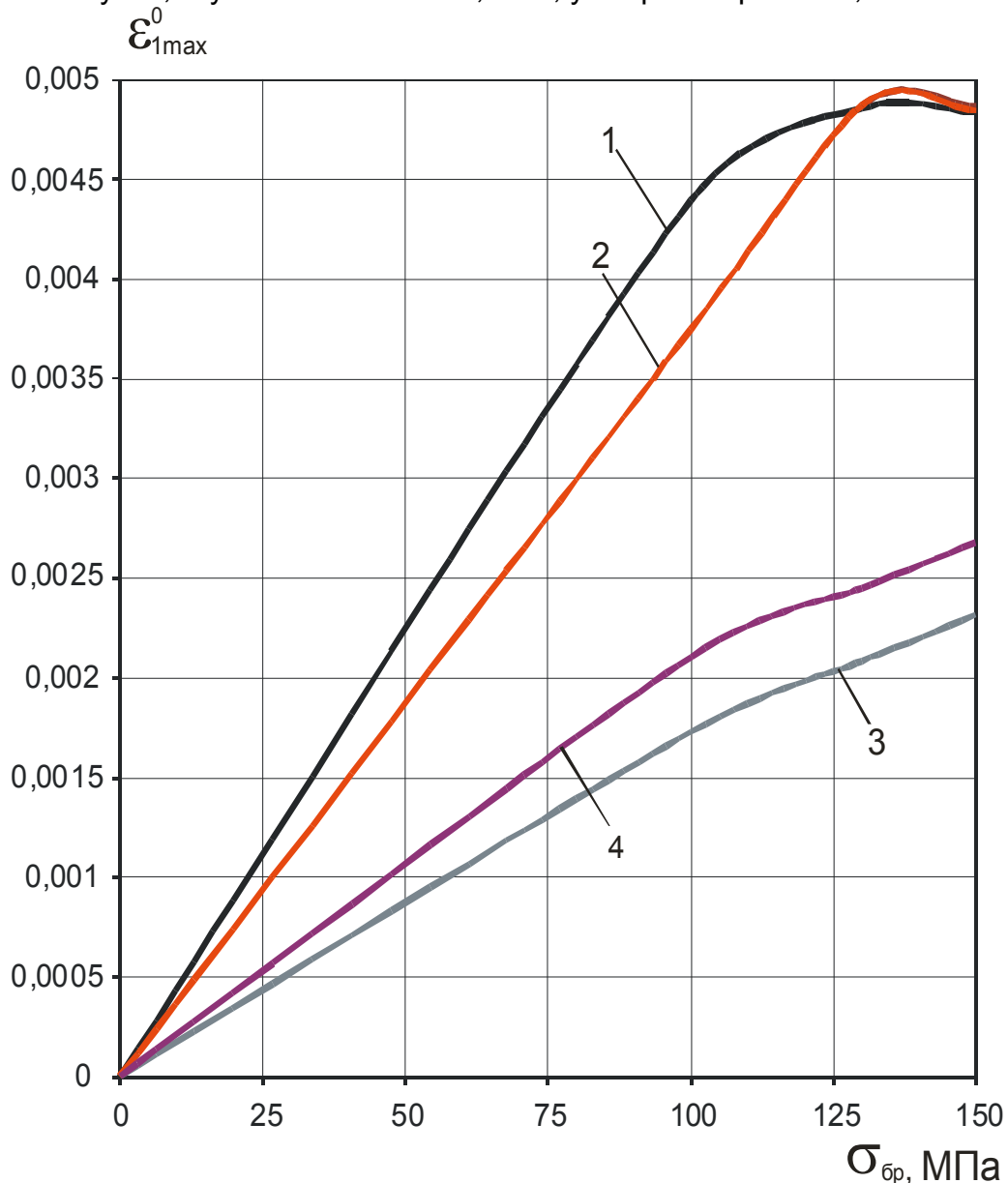


Рис. 12. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальных главных деформаций эквивалентного отнулевого цикла в пластине
 1 – с отверстием $\varnothing 8,006$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$, без упрочнения;
 2 – с тремя отверстиями $\varnothing 8,006$ мм, расстояние между отверстиями 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 раскатки с натягом 0,4% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора – 60° , 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 раскатки с натягом 0,4% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора – 60° , зона обжатия

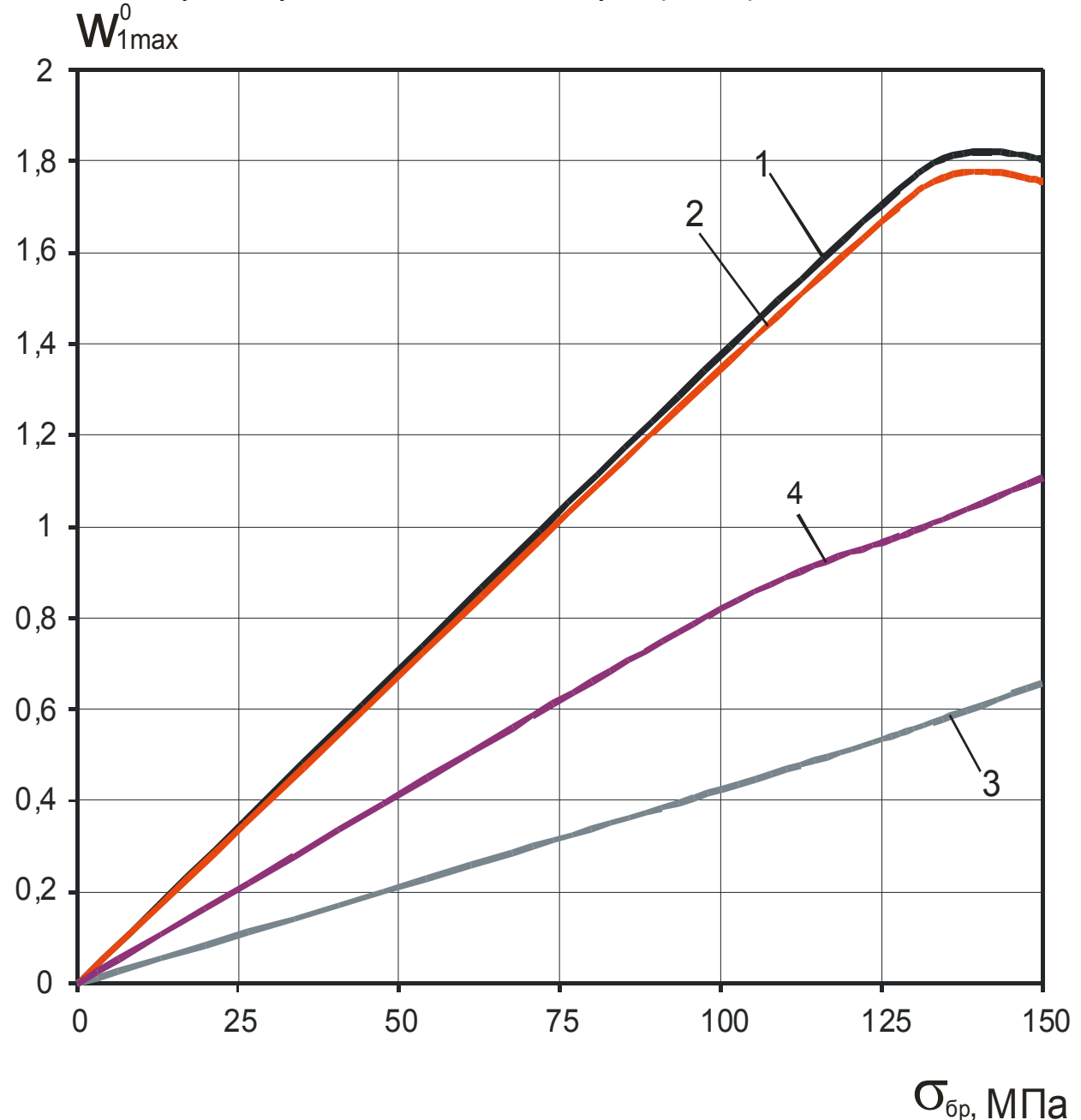


Рис. 13. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине

- 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 раскатки с натягом 0,4% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора – 60° , 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 раскатки с натягом 0,4% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора – 60° , зона обжатия

Выводы:

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

2. Совместное применение метода раскатки с натягом 0,4% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм приводит к снижению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 2,16–2,4 раза, максимальных главных деформаций в 2,13–2,33 раза и удельной энергии деформирования в 2,42–3,07 раза по сравнению с этими характеристиками для пластины с тремя отверстиями без упрочнения отверстий. Сравнение проводится в сечении по оси крайнего отверстия.

3. Полученный результат позволяет оценить эффективность применяемого метода упрочнения отверстий и совместно с результатами экспериментальных исследований провести оценку усталостной долговечности испытуемых образцов.

4. 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. Волов А.Г., Гребеников В.А., Гуменный А.М. Влияние локального утолщения на характеристики действительного НДС и циклическую долговечность пластин с зенкованным отверстием // Открытые информационные и компьютерные технологии. – Х. – 1998. – Вып. 21. – С. 211-229.

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