

Влияние последовательного применения дорнования и барьерного обжата на характеристики локального НДС стрингера с отверстиями для перетекания топлива

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

Конструкция планера самолета имеет большое количество функциональных отверстий, которые являются источниками концентрации напряжений и возникновения усталостных трещин. Среди большого разнообразия отверстий можно выделить отверстия для перетекания топлива, расположенные в стрингерах кессон-баков крыла. Данный класс отверстий и зоны, в которых они расположены, требуют повышенного внимания в процессе проектирования и эксплуатации. Зоны конструкции крыла, где расположены данные отверстия, представляют собой монолитные герметичные конструкции, доступ к которым затруднен или невозможен. Это приводит к необходимости разработки различных конструктивно-технологических мероприятий, повышающих усталостную долговечность и снижающих вероятность зарождения трещин в данных зонах.

Эффективным технологическим методом повышения усталостной долговечности зон конструкции, содержащих отверстия для перетекания топлива, является обработка 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 зоны. Для повышения эффективности использования данных методов упрочнения участков конструкции, содержащих отверстия для перетекания топлива, целесообразно совместное последовательное применение нескольких из них. В данной работе рассмотрено последовательное применение дорнования и барьерного обжата.

Целью работы является анализ характеристик локального НДС стрингера с тремя отверстиями диаметром 8 мм, фаской $0,5 \times 45^\circ$, упрочненного методом последовательного применения дорнования и барьерного обжата, для прогнозирования влияния данного метода упрочнения на его усталостную долговечность. При анализе характеристик локального НДС вблизи концентратора не учитывают шероховатость обрабатываемой поверхности и дефекты, возникающие в процессе выполнения отверстий.

Геометрические размеры стрингера показаны на рис. 1. Трехмерные модели стрингера и технологического инструмента, используемого для упрочнения, изображены на рис. 2–4. Стрингер изготовлен из алюминиевого сплава Д16Т [6]. Были рассмотрены два варианта конструктивного исполнения зоны радиусного перехода толщин стенки стрингера: R8, как показано на рис. 1, и R35.

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

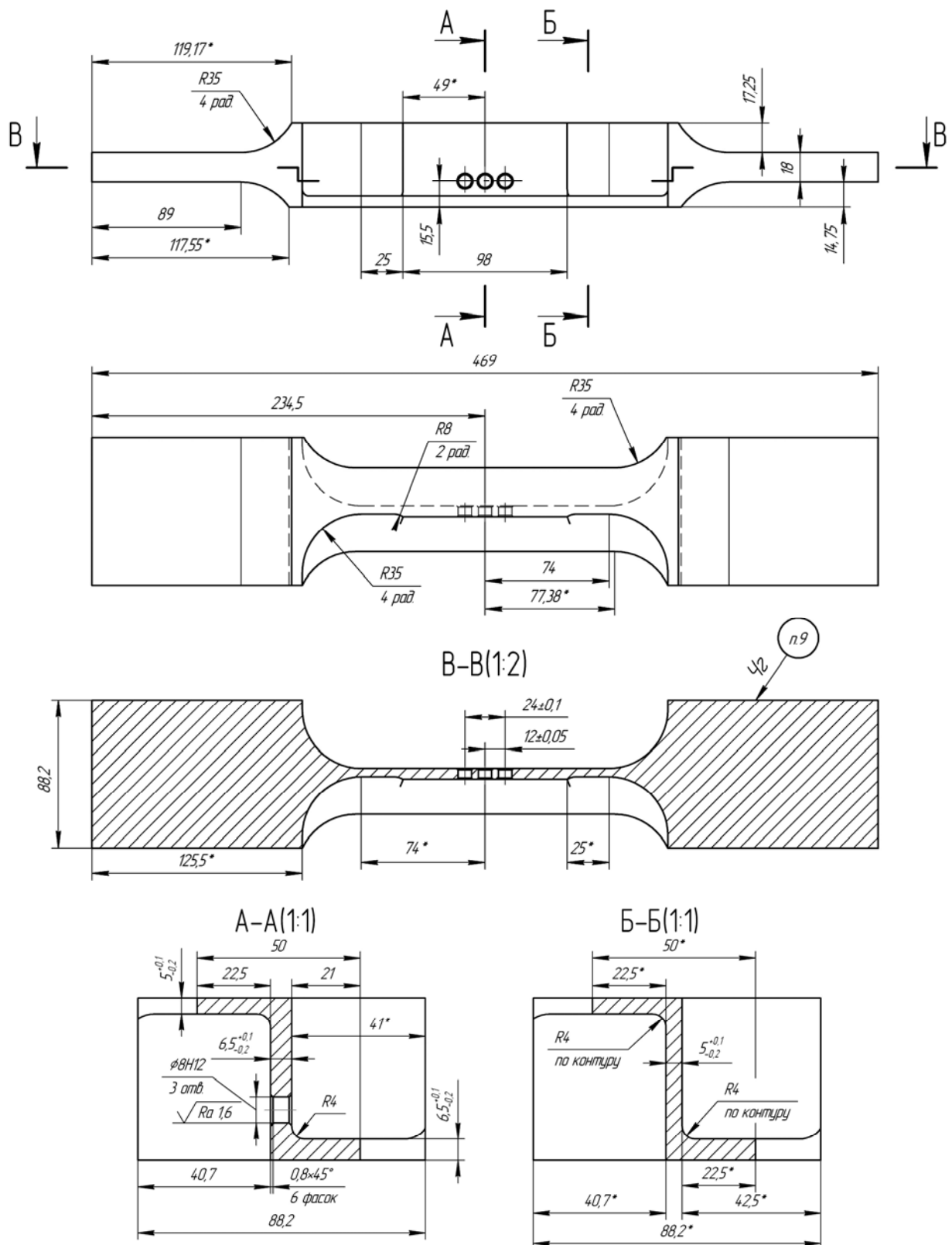


Рис. 1. Образец стрингера с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм

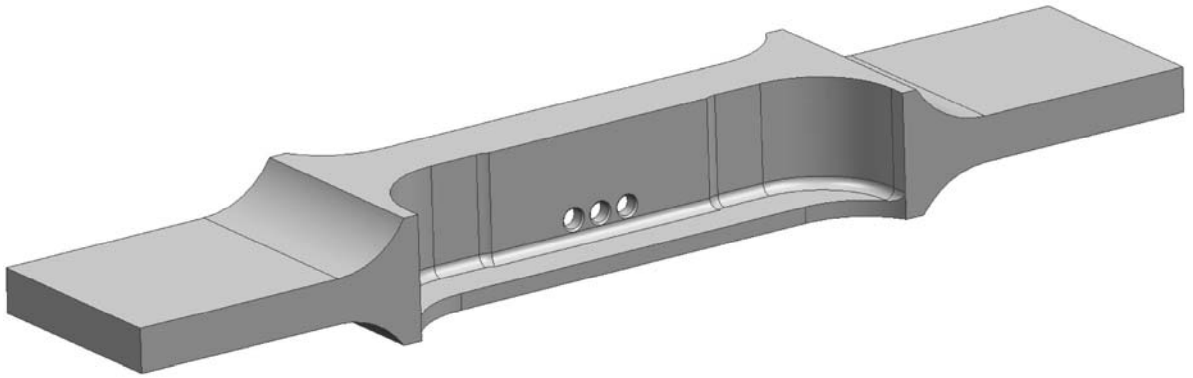


Рис. 2. Трехмерная модель стрингера с отверстиями для перетекания топлива

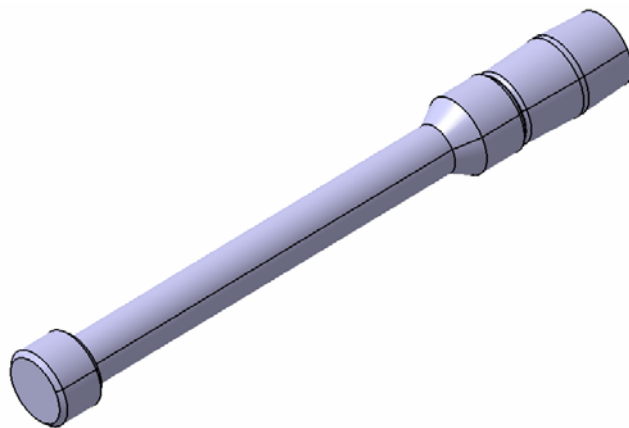
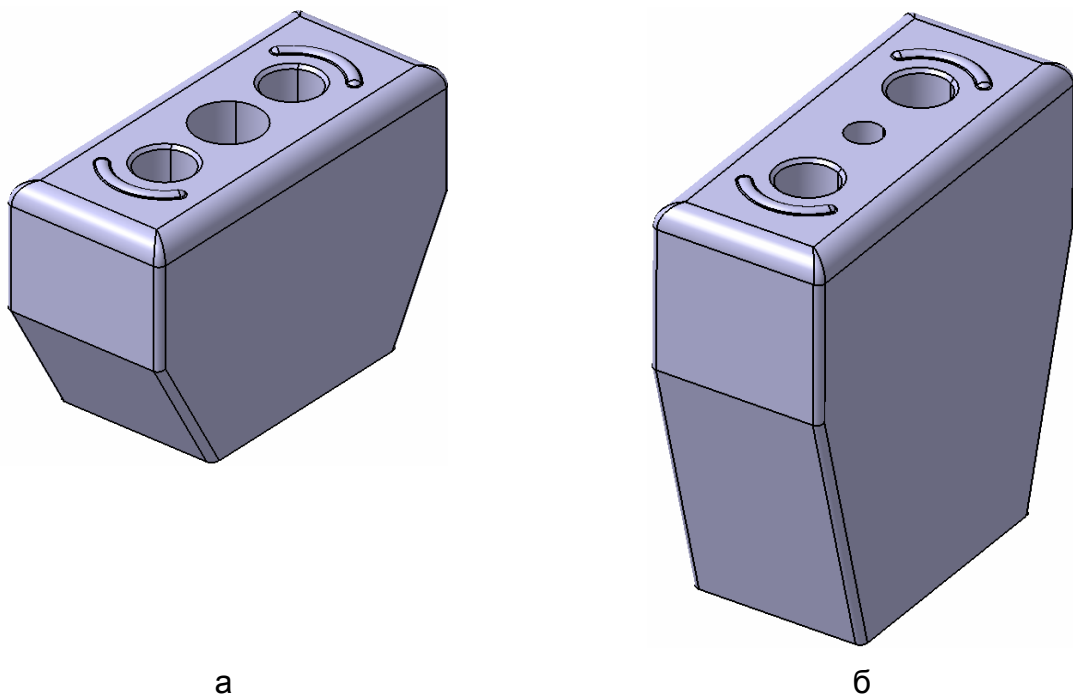


Рис. 3. Трехмерная модель дорна



а

б

Рис. 4. Трехмерные модели обжимок:
а – верхняя обжимка; б – нижняя обжимка

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

1. Создание геометрических моделей стрингера с тремя отверстиями и технологического инструмента, применяемого для его упрочнения.
2. Разработку расчетных схем.
3. Задание физико-механических свойств материала и кривой деформирования.
4. Создание конечно-элементной модели стрингера с тремя отверстиями, а также учет контактного взаимодействия технологического инструмента с упрочняемыми участками поверхности стрингера.
5. Задание граничных условий.
6. Моделирование процесса дорнования, включающего в себя внедрение дорнов в стенки отверстий, путем перемещения дорна в осевом направлении на величину 0,3 мм. Определение напряжений и деформаций после внедрения дорна.
7. Моделирование процесса дорнования путем перемещения дорна в осевом направлении на величину 12 мм. Определение напряжений и деформаций после дорнования. Анализ геометрии отверстия после дорнования.
8. Моделирование процесса барьерного обжата поверхностей стрингера вблизи отверстий на глубину 0,3 мм. Определение напряжений и деформаций после обжата.
9. Моделирование процесса отведения обжимок в исходное положение. Определение остаточных напряжений и деформаций в стрингере после отведения обжимок.
10. Приложение растягивающих напряжений $\sigma_{захв}$ в торцевом сечении стрингера (по захватной части образца). Определение напряжений и деформаций в стрингере в нагруженном состоянии.
11. Моделирование процесса разгрузки стрингера. Определение напряжений и деформаций после разгрузки.
12. Расчет характеристик локального НДС стрингера с тремя отверстиями, упрочненного методом последовательного применения дорнования и барьерного обжата 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 стрингере в зонах крайнего отверстия и обжата.
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 2% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм.

Величина эксплуатационных напряжений при численных исследованиях составляет $\sigma_{\sigma p}^0 = 0; 100; 114; 130$ и 150 МПа.

Созданные в системе Unigraphics NX2 геометрические модели стрингера и технологического инструмента (см. рис. 2–4) переданы в систему инженерного анализа ANSYS с использованием формата импорта Parasolid и послужили основой для построения конечно-элементных моделей.

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

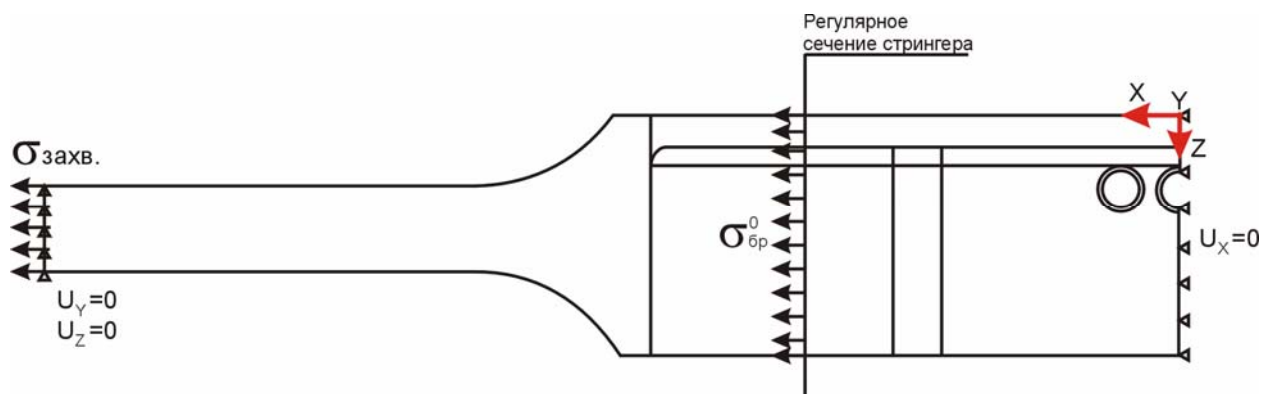


Рис. 5. Расчетная схема стрингера с тремя отверстиями

При выполнении расчетов принято допущение: технологический инструмент, используемый для упрочнения стрингера в зоне отверстий, считается абсолютно жестким. Данное допущение правомерно, поскольку жесткость технологического инструмента в три раза выше жесткости стрингера 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 стрингера и соответствующего технологического инструмента (см. рис. 6). Основой для построения конечно-элементных моделей явились трехмерные модели стрингера с тремя отверстиями и модели деформирующих элементов, созданные с помощью системы Unigraphics NX2 и переданные в препроцессор системы ANSYS.

В результате решения задач были получены численные значения параметров, характеризующих НДС стрингера в зоне отверстий и в зонах радиусных переходов.

В качестве параметров, характеризующих НДС, рассмотрены: главные растягивающие напряжения σ_1 и деформации ε_1 , а также их произведение $\sigma_1 \times \varepsilon_1$. Определен характер распределения напряжений и деформаций в стрингере в зоне отверстий для всего диапазона прикладываемых напряжений ($\sigma_{\sigma p}^0 = 0; 100; 114; 130$ и 150 МПа), используемый для качественной предварительной оценки результата (см. рис. 8 – 12).

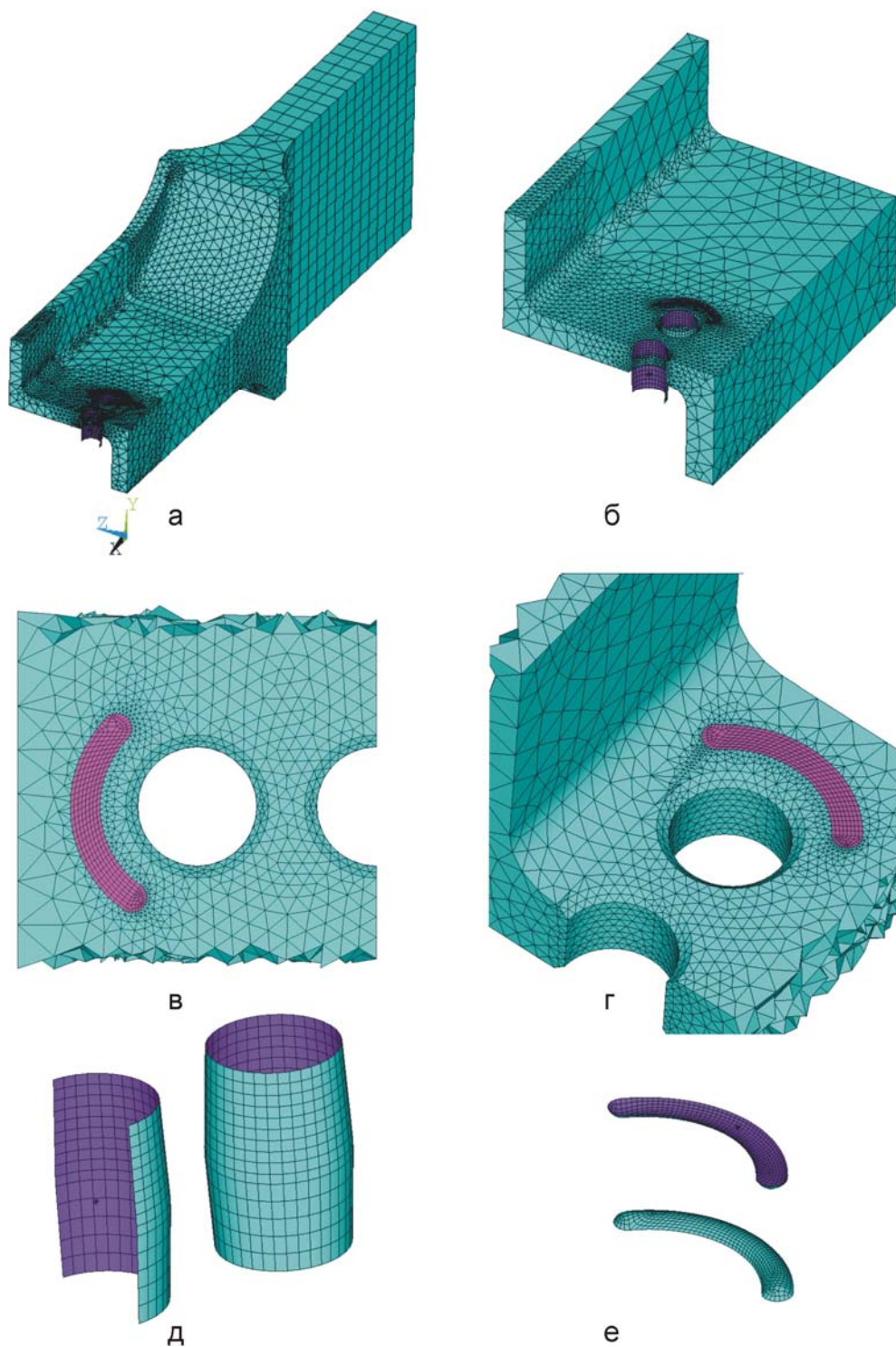


Рис. 6. Конечно-элементная модель стрингера с тремя отверстиями, упрочняемого методом последовательного применения дорнования и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации:
 а – конечно-элементная модель стрингера с тремя отверстиями и технологического инструмента; б – фрагмент конечно-элементной модели стрингера с тремя отверстиями в зоне отверстий; в, г – фрагмент конечно-элементной модели стрингера с тремя отверстиями в зоне выштамповки сегментных лунок; д – конечно-элементные модели дорнов; е – конечно-элементные модели обжимок

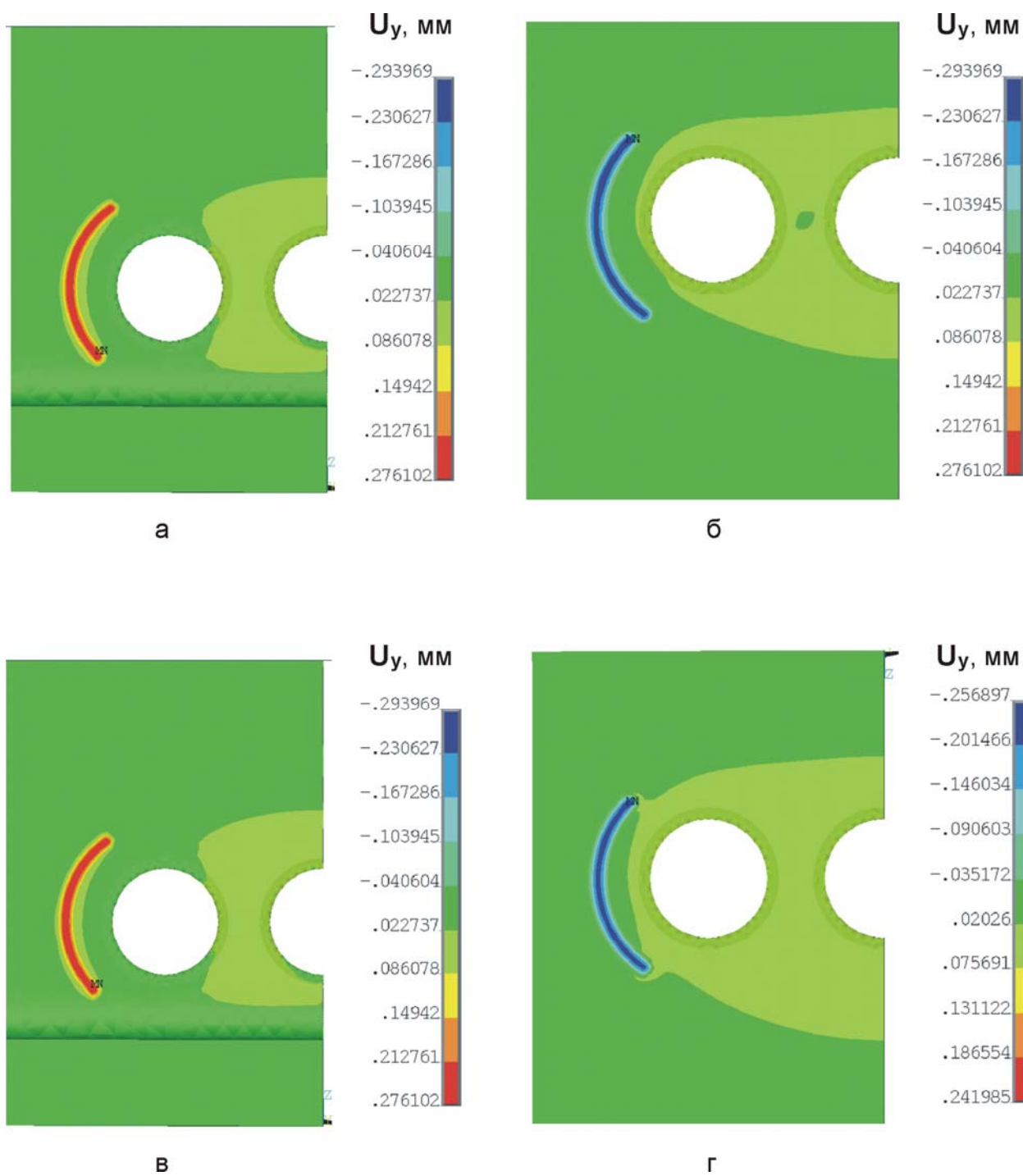


Рис. 7. Характер распределения перемещений в зоне обжатия:
а – верхней поверхности стенки стрингера в процессе обжатия;
б – нижней поверхности стенки стрингера в процессе обжатия;
в – верхней поверхности стенки стрингера после обжатия;
г – нижней поверхности стрингера после обжатия

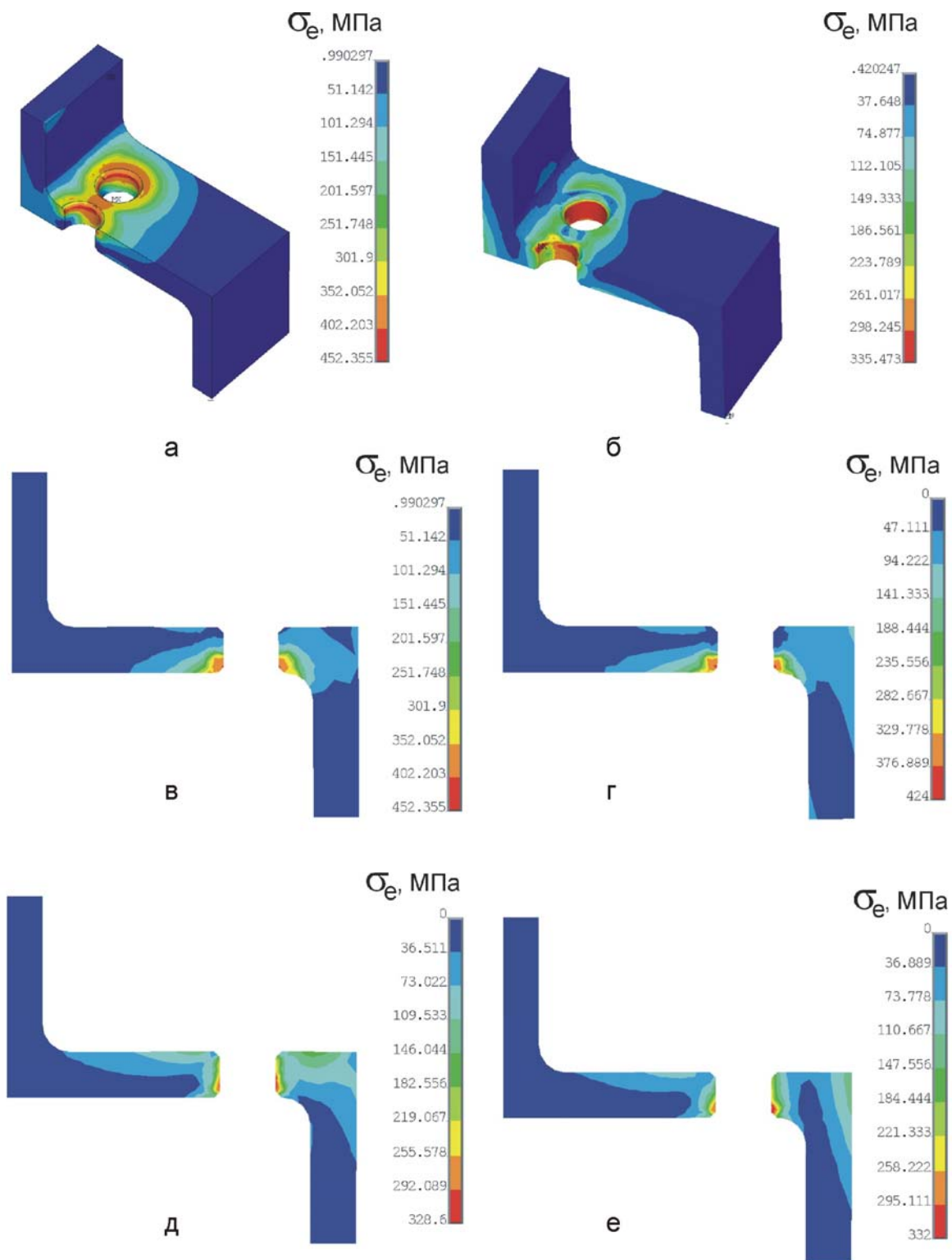


Рис. 8. Характер распределения эквивалентных напряжений Мизеса в стрингере с тремя отверстиями, в процессе выполнения операции дорнования:
 а – на начальном этапе – внедрение дорнов; б – после дорнования;
 в – на начальном этапе – внедрение дорнов в сечении по оси крайнего отверстия;
 г – на начальном этапе – внедрение дорнов в сечении по оси центрального отверстия; д – после дорнования – в сечении по оси крайнего отверстия;
 е – после дорнования – в сечении по оси центрального отверстия

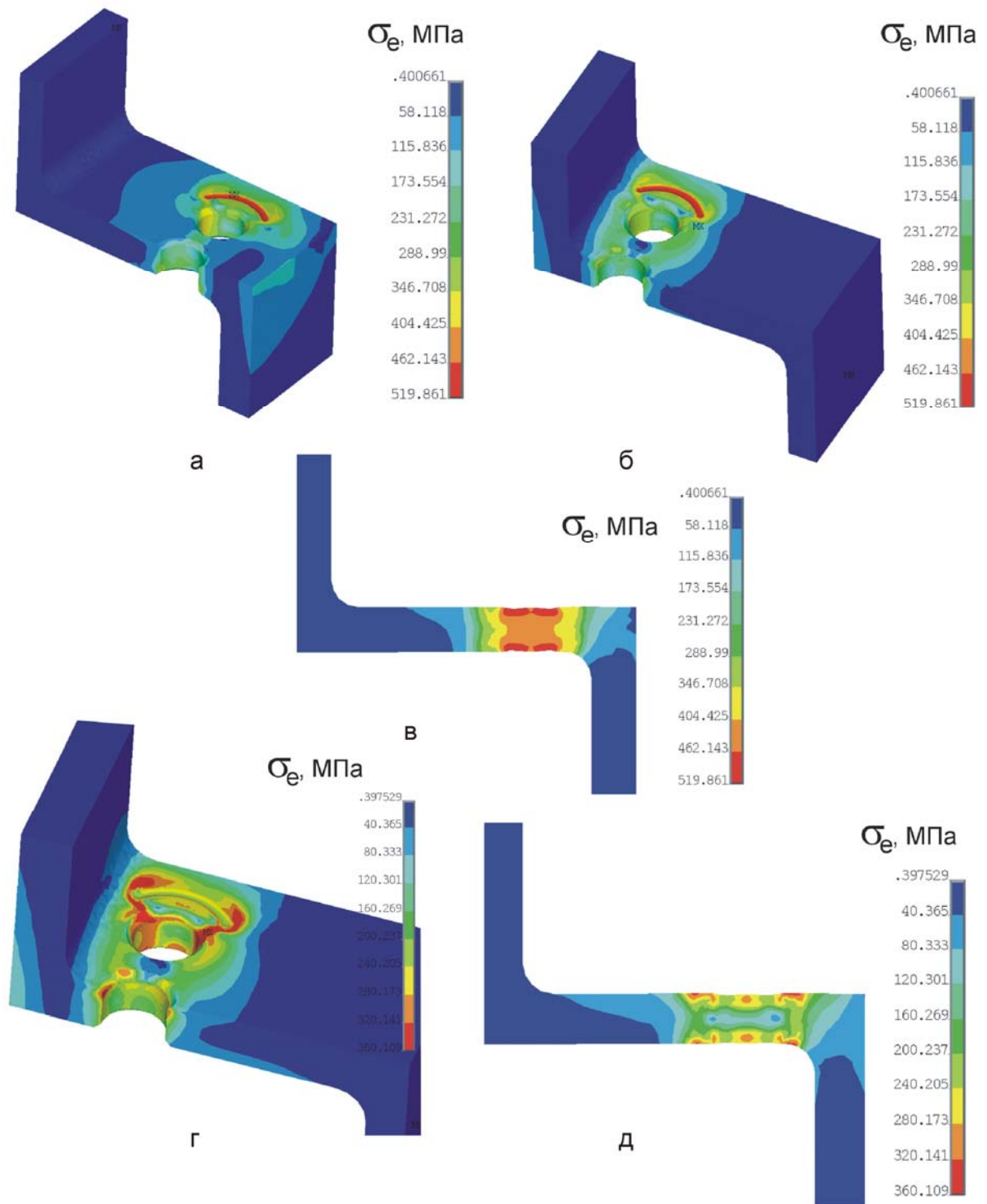


Рис. 9. Характер распределения эквивалентных напряжений Мизеса в стрингере с тремя отверстиями, упрочненного методом последовательного применения дорнования с натягом 2% и барьерного обжата на глубину 0,3 мм:
а – после дорнования и последующего обжата на глубину 0,3 мм – верхняя поверхность полки стрингера; б – после дорнования и последующего обжата на глубину 0,3 мм – нижняя поверхность полки стрингера; в – после дорнования и последующего обжата на глубину 0,3 мм – в сечении в зоне обжата;
г – после упрочнения; д – после упрочнения – в сечении в зоне обжата

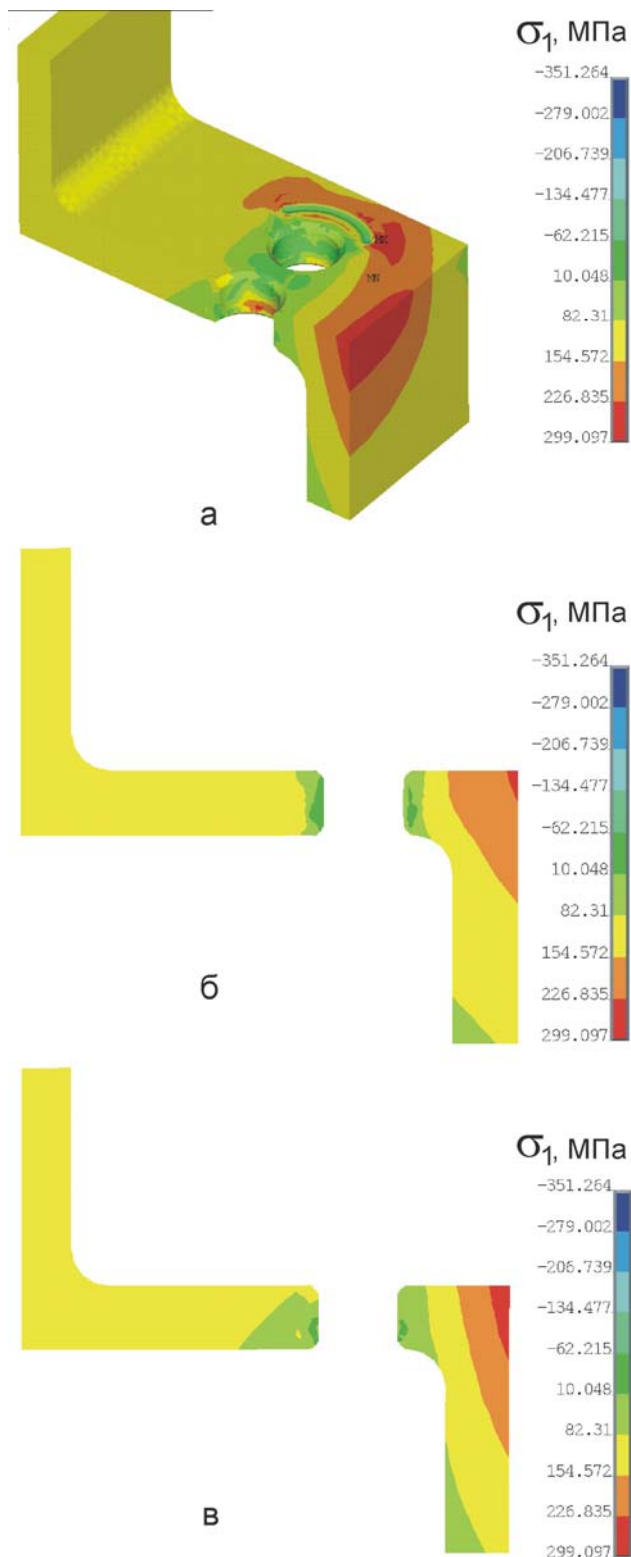


Рис. 10. Характер распределения главных растягивающих напряжений в стрингере с тремя отверстиями, упрочненного методом последовательного применения дорнования с натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации глубиной 0,3 мм ($\sigma_{\text{бр}}^0 = 114$ МПа):
 а – в зоне отверстий и обжатия; б – в сечении по оси крайнего отверстия;
 в – в сечении по оси центрального отверстия

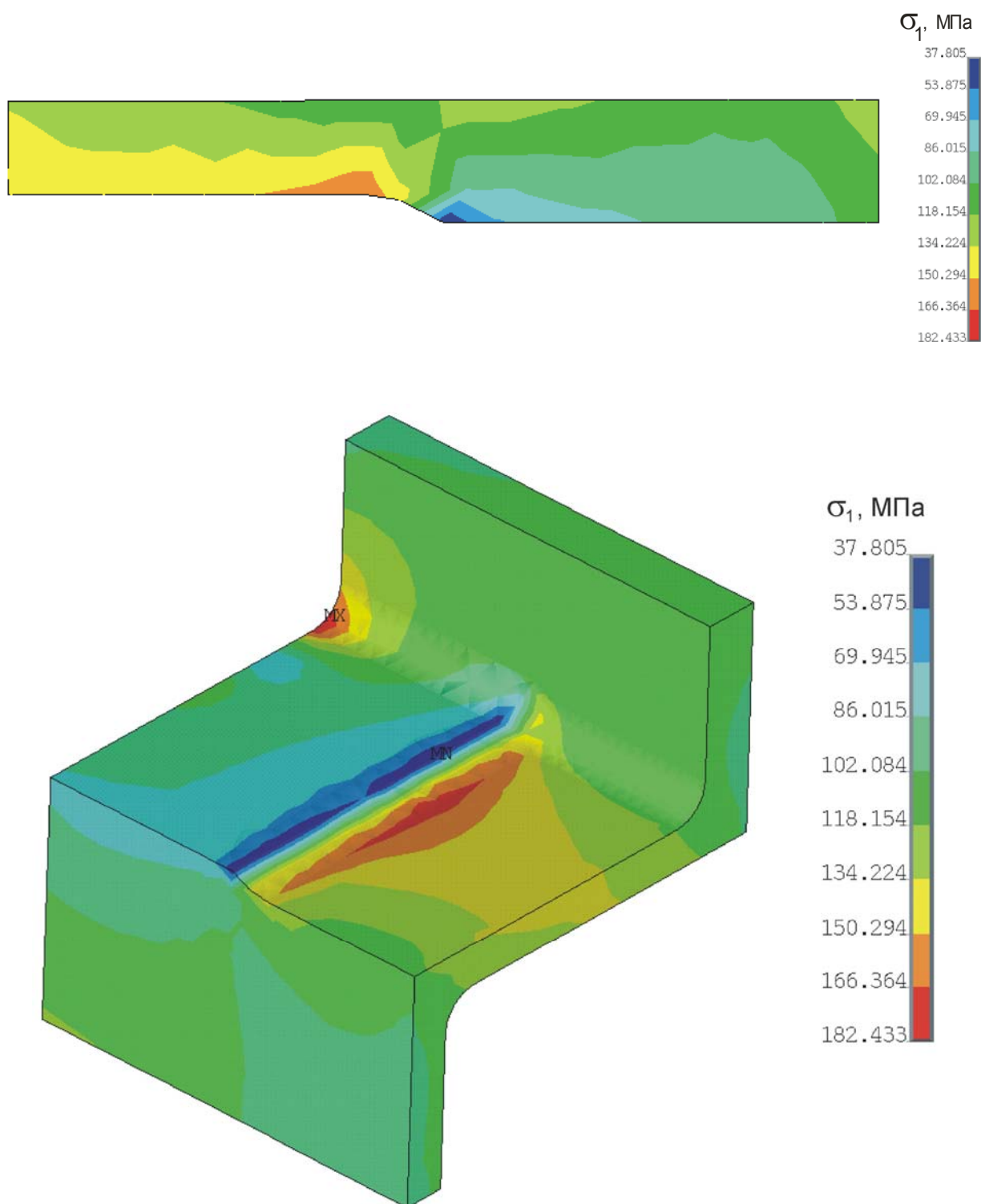


Рис. 11. Характер распределения главных растягивающих напряжений в зоне радиусного перехода толщин стенки стрингера, упрочненного методом последовательного применения дорнования с натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации глубиной 0,3 мм ($\sigma_{\text{доп}}^0 = 114$ МПа)

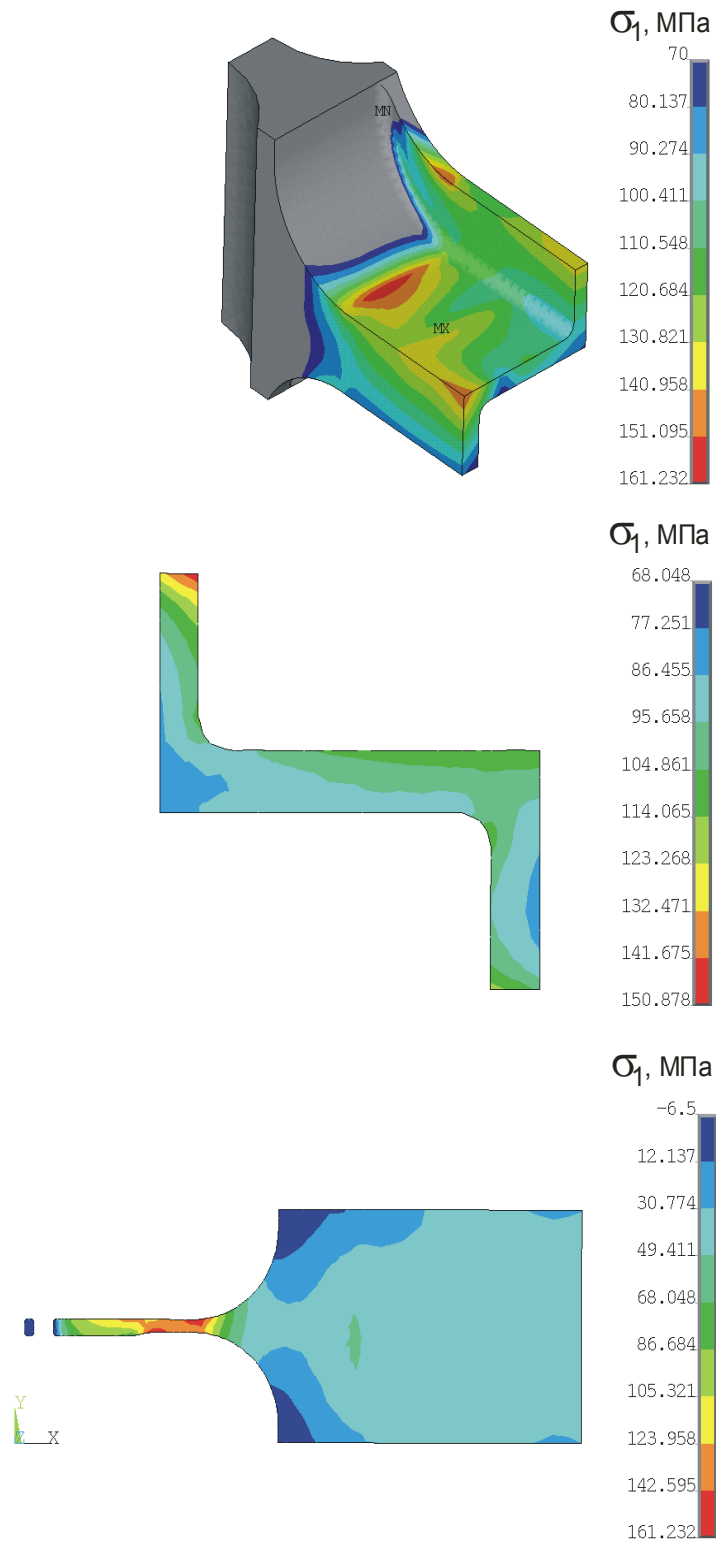


Рис. 12. Характер распределения главных растягивающих напряжений в зоне радиусного перехода регулярной зоны к захвату стрингера, упрочненного методом последовательного применения дорнования с натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации глубиной 0,3 мм ($\sigma_{\sigma p}^0 = 114$ МПа)

Анализ характера распределения главных растягивающих напряжений и деформаций показывает, что в процессе последовательного применения дорнования и барьерного обжатия возникают дополнительные зоны концентрации напряжений в зоне обжатия. Кроме того, рассмотрена зона радиусного перехода толщин стенки стрингера и зоны радиусных переходов от регулярной части образца стрингера к захватам.

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

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

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 $\sigma_{op}^0 = 0; 100; 114; 130$ и 150 МПа (рис. 13–15).

На графиках, представленных на рис. 13–15, цифрами обозначены результаты расчета:

- 1 – в пластине с отверстием $\varnothing 8$ мм, фаска – $0,5 \times 45^\circ$, без упрочнения, по оси отверстия;
- 2 – в пластине с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска – $0,5 \times 45^\circ$, без упрочнения, по оси крайнего отверстия;
- 3 – в стрингере с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска – $0,5 \times 45^\circ$, R8, без упрочнения, по оси крайнего отверстия;
- 4 – в стрингере с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска – $0,5 \times 45^\circ$, R8, упрочненного методом последовательного применения дорнования с натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, глубина обжатия – 0,3 мм, по оси крайнего отверстия;

- 5 – в стрингере с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска – $0,5 \times 45^\circ$, R8, упрочненного методом последовательного применения дорнования с натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, глубина обжатия – 0,3 мм, зона обжатия;
- 6 – в стрингере с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска – $0,5 \times 45^\circ$, R8, упрочненного методом последовательного применения дорнования с натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, глубина обжатия – 0,3 мм, зона радиусного перехода толщин стенки
- 7 – в стрингере с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска – $0,5 \times 45^\circ$, R35, без упрочнения, зона радиусного перехода "толстой" полки к захвату;
- 8 – в стрингере с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска – $0,5 \times 45^\circ$, R35, без упрочнения, зона радиусного перехода стенки к захвату;
- 9 – в стрингере с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска – $0,5 \times 45^\circ$, R35, без упрочнения, зона радиусного перехода толщин стенки

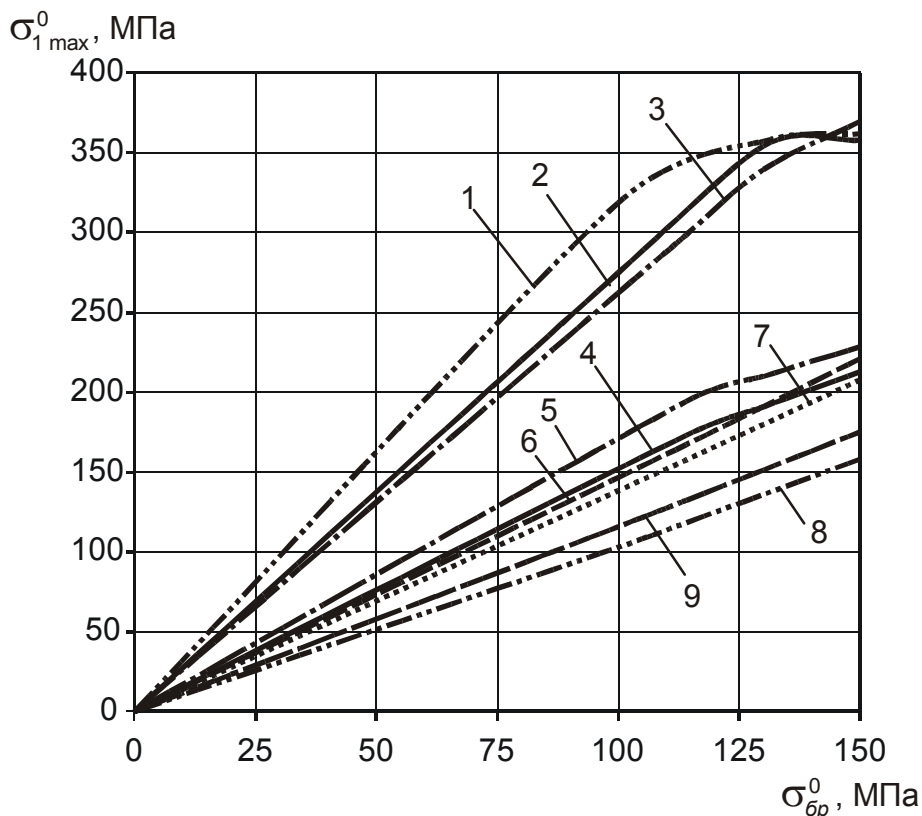


Рис. 13. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальных главных напряжений эквивалентного отнулевого цикла

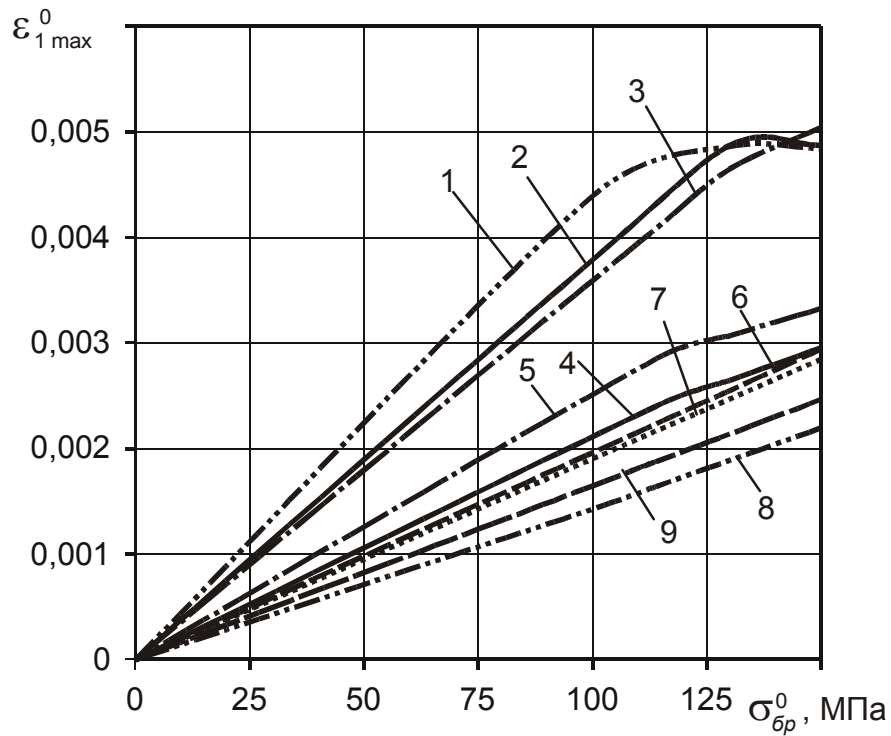


Рис. 14. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальных главных деформаций эквивалентного отнулевого цикла

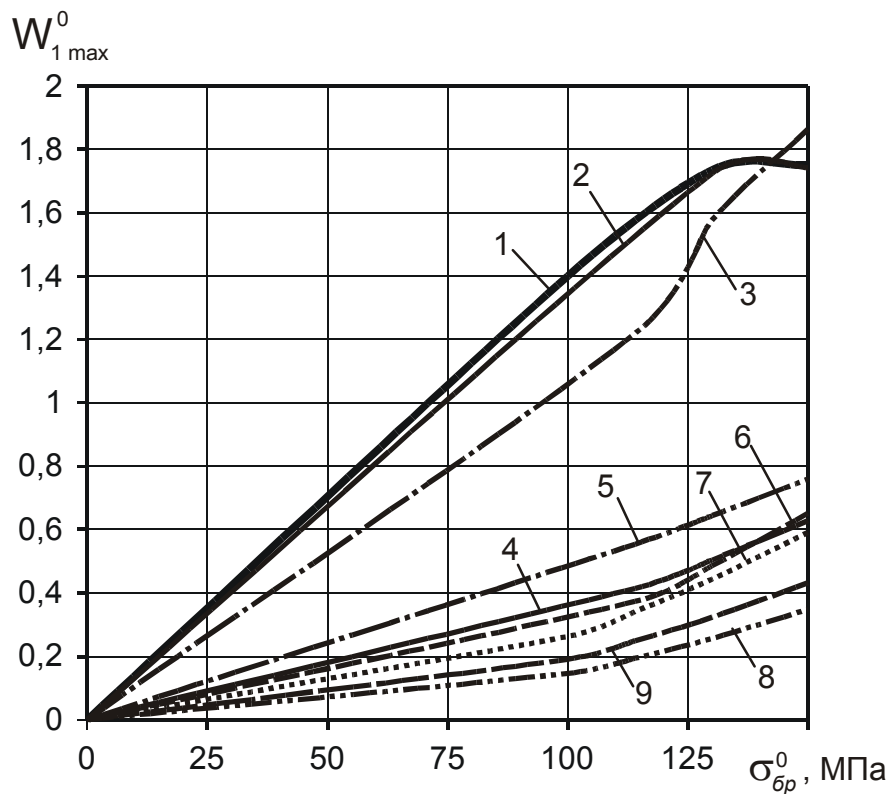


Рис. 15. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла

Последовательное применение дорнования стенок отверстий с натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации глубиной 0,3 мм приводит к снижению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,54–1,63 раза, максимальных главных деформаций – в 1,43–1,52 раза и удельной энергии деформирования – в 2,2–2,4 раза по сравнению с этими характеристиками для стрингера с тремя отверстиями без упрочнения отверстий.

Выводы:

1. Разработан метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия стрингера с тремя отверстиями на характеристики локального НДС в зонах вероятного усталостного разрушения.

2. При последовательном применении дорнования и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации происходит смещение максимальных значений главных растягивающих напряжений на край полки стрингера, тем самым зона вблизи отверстий разгружается и снижается вероятность образования в данной зоне усталостной трещины. При наличии механических повреждений в процессе изготовления стрингеров и их обработки могут возникать усталостные трещины вне зоны отверстий.

Список литературы

1. Соппротивление 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 / В.Ф. Пширков. – М.: Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации», 1980. – 170 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. Бронз Л.Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов / Л.Д. Бронз. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
5. Гребеников А.Г. Анализ характеристик локального НДС с помощью системы ANSYS в пластине с отверстиями, подверженной упрочнению дорнованием или глубокого пластического деформированию и растяжению / А.Г. Гребеников, Ю.А. Мовчан, В.А. Гребеников // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып 32(1). – Х., 2003. – С. 124–138.
6. Авиационные материалы: в 9 т. – М.: ОНТИ, – 1983. – Т. 4: Алюминиевые и бериллиевые сплавы / под общей ред. д-ра техн. наук Р.Е. Шалина. – 350 с.
7. ANSYS Analysis Guide. Structural Analysis Guide. Chapter 8. Nonlinear structural analysis. 001087. 4th Edition. SAS IP©.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. зав. каф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.