

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОНЦЕРН «УКРОБОРОНПРОМ»  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «АНТОНОВ»

*На правах рукописи*

СЕМЕНЦОВ ВИКТОР ФЕДОРОВИЧ

УДК 629.735.33

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСА ПЛАНЕРА САМОЛЕТА  
В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ**

Специальность 05.07.02 – проектирование,  
производство и испытания летательных аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Бычков Сергей Андреевич

Киев – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 5  |
| <i>Раздел 1</i> АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ<br>ОСОБЕННОСТЕЙ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСА<br>ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ<br>ОТВЕРСТИЙ.....                               | 13 |
| 1.1. Общие требования к обеспечению усталостной долговечности и ресурса<br>силовых элементов планера самолета транспортной категории .....  | 13 |
| 1.2. Анализ конструктивных и технологических особенностей силовых<br>элементов планера с функциональными отверстиями .....  | 26 |
| 1.3. Анализ конструктивно-технологических методов обеспечения ресурса<br>планера самолета в зонах функциональных отверстий.....   | 29 |
| 1.4. Постановка цели и задач исследования.....  | 36 |
| <i>Раздел 2</i> НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-<br>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ<br>ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ<br>ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ .....             | 38 |
| 2.1. Влияние величины одностороннего утолщения в зоне отверстия<br>на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее<br>растяжении .....  | 40 |
| 2.2. Влияние величины двухстороннего утолщения в зоне отверстия<br>на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее<br>растяжении .....  | 45 |
| 2.3. Влияние величины радиального натяга при дорновании<br>и уровня нагружения при растяжении на характеристики локального<br>напряженно-деформированного состояния полосы с отверстием ..... | 50 |
| 2.4. Влияние барьерного обжатия на характеристики локального НДС<br>полосы с отверстием при ее растяжении .....   | 58 |
| 2.5. Метод определения влияния конструктивно-технологических<br>параметров на характеристики локального НДС пластины<br>с отверстием при нагружении ее сдвигом.....                           | 63 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.6. Экспериментальные исследования усталостной долговечности полосы с отверстием и системой отверстий.....  | 75  |
| 2.7. Выводы по разделу .....   | 79  |
| <i>Раздел 3</i> ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ .....        |     |
| 3.1. Влияние раскатки, дорнования и барьерного обжатия полосы в зоне функциональных отверстий на характеристики ее локального напряженно-деформированного состояния .....                                | 81  |
| 3.2. Влияние раскатки, дорнования и барьерного обжатия конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий на характеристики локального напряженно-деформированного состояния.... | 93  |
| 3.3. Выводы по разделу .....   | 109 |
| <i>Раздел 4</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ.....                    |     |
| 4.1. Исследование влияния раскатки и дорнования на статическую прочность полосы с отверстиями.....   | 110 |
| 4.2. Экспериментальное исследование влияния раскатки, дорнования и барьерного обжатия на усталостную долговечность полос с тремя отверстиями.....  | 112 |
| 4.3. Экспериментальное исследование влияния методов обработки на усталостную долговечность конструктивно-подобных образцов стрингеров с функциональными отверстиями.....                                 | 126 |
| 4.4. Выводы по разделу .....   | 131 |
| <i>Раздел 5</i> ТЕХНОЛОГИЯ И СРЕДСТВА ОСНАЩЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ .....   |     |
| 5.1. Технологическая точность и стабильность процессов обработки зоны функциональных отверстий.....  | 134 |

|   |            |
|---|------------|
| 5.2. Технология обработки конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий методом раскатки .....         | 156        |
| 5.3. Технология обработки конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий методом дорнования .....       | 157        |
| 5.4. Технология обработки конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий методом барьерного обжата..... | 158        |
| 5.5. Сравнительная оценка эффективности методов обработки.....  | 158        |
| 5.6. Рекомендуемые конструктивно-технологические методы обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий.....  | 164        |
| 5.7. Выводы по разделу .....  | 165        |
| <b>ВЫВОДЫ.....</b>  | <b>167</b> |
| <b>Список использованных источников.....</b>  | <b>169</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

---

**Актуальность темы.** Современный рынок самолетов транспортной категории характеризуется высокой конкуренцией, что приводит к ужесточению требований к их ресурсу и безопасности полетов. Одним из приоритетных направлений развития мирового самолетостроения является значительное увеличение ресурсных характеристик планера самолета. Большинство самолетов транспортной категории отечественного и зарубежного производства проектируются с учетом заданного ресурса, величина которого достигает от 20 тысяч полетов (60 тысяч летных часов) для тяжелых самолетов до 60 тысяч полетов (80 тысяч летных часов) для средних магистральных самолетов при сроке их эксплуатации не менее 25 – 30 лет [1–3, 30–32].

Рентабельность самолета является функцией его эффективности, которая определяется отношением полезной работы самолета, выполненной им на протяжении срока эксплуатации, к сумме затрат на его создание, серийный выпуск и эксплуатацию [50]:

$$E = \frac{V_p \cdot G_k \cdot T}{S_0 + S_n + S_e},$$

где  $V_p$  – средняя рейсовая скорость, км/ч;  $G_k$  – масса полезной нагрузки, т;  $T$  – технический ресурс (количество часов налета);  $S_0$  – затраты на создание экспериментальных образцов, отнесенные на один серийный самолет;  $S_n$  – средние затраты на производство одного серийного самолета;  $S_e$  – средние затраты на эксплуатацию одного самолета.

Ресурс самолета, в основном, определяется усталостной долговечностью силовых элементов конструкции планера. Безопасный ресурс определяется соотношением [19, 47, 66]

$$T = N/\eta,$$

где  $N$  – среднее значение долговечности;  $\eta$  – коэффициент надежности (запаса), который зависит от принципов проектирования и может изменяться от 1,2 до 4.

Проектирование и эксплуатация современной авиационной техники по техническому состоянию (безопасной повреждаемости) является комплексной научно-

технической проблемой для решения которой требуются усилия ученых и инженеров в области авиационной науки и техники, владеющих методами информационных и компьютерных интегрированных технологий проектирования, производства и инженерного анализа.

Для сохранения конкурентоспособности отечественного самолетостроения на мировом рынке авиационных и транспортных услуг, необходимо вести новые научные разработки по обеспечению ресурса и надежности конструкции самолетов на этапах проектирования, производства и эксплуатации [30 – 32].

Во многом ресурс планера самолета определяется ресурсом конструктивных элементов с функциональными отверстиями. По своему функциональному назначению их можно разделить на следующие группы [34]:

I группа. Представляет собой наиболее многочисленную группу отверстий под крепежные элементы продольных швов (крепление стрингерного набора к полотну панелей и панелей между собой верхней и нижней поверхностей кессона крыла), которых насчитывается от нескольких тысяч до сотен тысяч.

II группа. К этой группе следует отнести отверстия для крепления поперечного набора кессона крыла (крепление нервюр). Таких концентраторов насчитывается от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч.

III группа. Представляет собой отверстия под крепежные элементы поперечных стыков силовых элементов продольного набора кессона крыла. Их насчитывается от нескольких сотен до нескольких тысяч.

IV группа. К четвертой группе концентраторов напряжений отнесем отверстия для перетекания топлива, которые выполняются в вертикальных стенках стрингеров продольного набора крыла и обеспечивают достижение минимального количества невырабатываемого и несливаемого остатков топлива в баках кессонах, что улучшает эксплуатационные возможности самолета. Таких концентраторов насчитывается от нескольких десятков до нескольких сотен.

V группа. Пятую группу представляют различные отверстия для функционирования систем самолета (отверстия для прохода трасс системы управления самолета, других систем, дренажные отверстия внутренних объемов кессона крыла и др.). Таких концентраторов насчитывается от нескольких десятков до нескольких сотен.

Отдельной группой следует представить отверстия в виде больших люков, вырезов для различных систем самолета, обеспечения сборки, осмотров изнутри и ремонтов в эксплуатации силовых элементов конструкции кессона крыла и систем, расположенных внутри кессона. Их насчитывается от нескольких единиц до нескольких десятков. Как правило, зоны конструкции с такими концентраторами требуют тщательного проектирования и экспериментальной отработки.

Следовательно, разработка конструктивно-технологических методов обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий является весьма *актуальной* задачей, а создание методов и способов достижения регламентируемых ресурсных характеристик элементов конструкции планера самолета имеет большое практическое значение в решении проблемы обеспечения безопасности полетов в условиях длительной эксплуатации самолетов.

**Связь работы с научными программами, планами и темами.** Тема диссертационной работы непосредственно связана с реализацией стратегии развития авиационной промышленности Украины до 2020 года.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка конструктивно-технологических методов обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ конструктивно-технологических особенностей и методов обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий;
- научно обосновать конструктивно-технологические методы обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий;
- исследовать влияние методов локального пластического деформирования на характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий;
- провести экспериментальные исследования влияния методов обработки на характеристики усталостной долговечности конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий;
- разработать технологию и средства оснащения для процессов обработки конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий;
- внедрить методы обеспечения ресурса конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий в производство на ГП «АНТОНОВ»;

ХГАПП, а также учебный процесс Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

*Объект исследования* – проектирование и производство самолетных конструкций с учетом усталости.

*Предмет исследования* – конструктивно-технологические методы обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий.

*Методы исследования.* При решении поставленных задач широко применялись: метод конечных элементов, реализованный в системе CAD/CAE ANSYS; расчетно-экспериментальные методы определения влияния конструктивно-технологических параметров на характеристики сопротивления усталости; методы параметрического трехмерного моделирования с помощью системы CAD/CAM/CAE/PLM Siemens NX; экспериментальные методы исследования характеристик сопротивления усталости типовых конструктивных элементов; технологические методы производства конструктивных элементов с функциональными отверстиями.

Адекватность расчетных моделей проверена при усталостных испытаниях типовых конструктивно-подобных образцов с функциональными отверстиями.

#### **Научная новизна полученных результатов:**

– впервые разработаны научные основы применения методов локального пластического деформирования конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий для повышения их усталостной долговечности путем выбора конструктивных параметров и технологических способов обработки раскаткой, дорнованием и барьерным обжатием;

– усовершенствованы методы определения характеристик локального напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий путем учета технологии обработки и истории их нагружения с помощью системы CAD\CAE ANSYS;

– получили дальнейшее развитие технологические способы и средства оснащения процессов обработки зон функциональных отверстий раскаткой, дорнованием и барьерным обжатием.

#### **Практическое значение полученных результатов:**

1. Разработанные методы анализа влияния технологических способов обработки (обжатие, дорнование, раскатка) на характеристики локального напряженно-



деформированного состояния силовых элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий позволяют на стадии проектирования прогнозировать зоны вероятного усталостного разрушения конструктивных элементов, выбирать конструктивно-технологические способы обработки и конструктивные параметры этих зон, обеспечивающие достижение заданных ресурсных характеристик.

2. Конструктивно-технологические методы обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий (утолщение, раскатка, дорнование, барьерное обжатие) позволяют повысить усталостную долговечность в 2 – 10 раз на эксплуатационных уровнях нагружения и достичь заданных ресурсных характеристик элементов конструкции без увеличения массы конструкции.

3. Разработанные технологии и средства оснащения обработки конструктивных элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий методами раскатки, дорнования отверстий и барьерного обжатия обеспечивают технологическую точность и стабильность процессов обработки.

Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в производство на ГП «АНТОНОВ», ХГАПП и в учебный процесс Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты, которые составляют суть диссертационной работы, получены автором лично. Постановка задачи, анализ и трактовка основных результатов, формулирование научных выводов выполнены совместно с научным руководителем. Без соавторов опубликованы работы [2, 3] в которых соискатель провел анализ существующих конструктивно-технологических методов повышения усталостной долговечности силовых элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий и поставил задачи исследований, разработал метод анализа влияния радиального натяга при дорновании на характеристики локального НДС полосы с отверстием. В опубликованной научной работе [1] и статьях [4, 5, 6, 7, 8], написанных в соавторстве, соискателю принадлежит следующее: разработал методы анализа влияния дорнования, раскатки и барьерного обжатия на характеристики локального напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий. Разработал программу экспериментальных исследований по определению влияния конструктивных и технологических параметров на характеристики усталостной долговечности образцов с функциональными отверстиями, проанализировал

результаты усталостных испытаний [1]; разработал метод анализа влияния барьерного обжатия на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее растяжении [4]; разработал метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия полосы с отверстием на характеристики напряженно-деформируемого состояния при ее растяжении [5]; разработал метод анализа влияния величины одностороннего утолщения в зоне отверстия на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее растяжении [6]; разработал метод анализа влияния двухстороннего утолщения в зоне отверстия на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее растяжении [7]; провел анализ результатов исследования влияния конструктивно-технологических параметров на характеристики локального НДС пластины с отверстием при нагружении ее сдвигом [8]; усовершенствовал технологические способы обработки зон функциональных отверстий раскаткой, дорнованием и барьерным обжатием [1].

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на Международных конференциях «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки» (г. Харьков, 2015 – 2016 гг.), «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні (ІКТМ)» (г. Харьков, 2015 г.), научно-технических конференциях, проводившихся в рамках VIII и IX-го Международного авиационно-космического салона «АВІАСВІТ-XXI» (Киев, 2012, 2014 г.), семинарах кафедры проектирования самолетов и вертолетов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» (2014 – 2016 гг.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 печатных работах, из которых – 1 научное издание [1], 7 статей (2 без соавторов) в сборниках, включенных в перечень научных изданий Украины для публикации результатов квалификационных работ и включенных в международную наукометрическую базу данных Index Copernicus [2 – 8] и 5 публикаций в материалах конференций и тезисах докладов [9 – 13]:

1. Семенцов, В. Ф. Конструктивно-технологические методы повышения усталостной долговечности элементов конструкции планера самолета в зоне функциональных отверстий [Текст] / Д. С. Кива, Г. А. Кривов, В. Ф. Семенцов и др. – К.: КВИЦ, 2015. – 188 с.

2. Семенцов, В. Ф. Анализ конструктивно-технологических методов повышения

усталостной долговечности силовых элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий [Текст] / В. Ф. Семенцов // Проблемы тертя та зношування. – 2015. – № 1 (66). – С. 82 – 93.

3. Семенцов, В. Ф. Влияние величины радиального натяга при дорновании и уровня нагружения при растяжении на характеристики локального напряженно-деформированного состояния полосы с отверстием [Текст] / В. Ф. Семенцов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2015. – № 67. – С. 123 – 134.

4. Семенцов, В. Ф. Влияние барьерного обжатия на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее растяжении [Текст] / В. Ф. Семенцов, Е. Т. Василевский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2015. – № 68. – С. 23 – 34.

5. Семенцов, В. Ф. Влияние последовательного применения дорнования и барьерного обжатия полосы с отверстием на характеристики напряженно-деформируемого состояния при ее растяжении [Текст] / С. А. Бычков, В. Ф. Семенцов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (83). – Х., 2015. – С. 23 – 32.

6. Семенцов, В. Ф. Влияние величины одностороннего утолщения в зоне отверстия на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее растяжении / Е. Т. Василевский, В. Ф. Семенцов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 69. – Х., 2015. – С. 158 – 164.

7. Семенцов, В. Ф. Влияние величины двустороннего утолщения в зоне отверстия на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее растяжении [Текст] / В. Ф. Семенцов, Е. Т. Василевский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 70. – Х., 2015. – С. 152 – 159.

8. Семенцов, В. Ф. Метод определения влияния конструктивно-технологических параметров на характеристики локального НДС пластины с отверстием при нагружении ее сдвигом [Текст] / Е. Т. Василевский, А. Г. Гребеников, А. М. Гуменный, С. П. Светличный, В. Ф. Семенцов // Открытые информацион-

ные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 71. – Х., 2016. – С. 5 – 17.

9. Семенцов, В. Ф. Анализ принципов проектирования для обеспечения ресурса авиационной техники [Текст] / С. А. Бычков, Е. Т. Василевский, В. Ф. Семенцов, В. А. Гребеников // Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: міжнар. наук.-техн. конф.: тези доп., 15-16 квіт. 2015 р. – Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Х., 2015. – С. 19 – 21.

10. Семенцов, В. Ф. Анализ конструктивно-технологических методов повышения усталостной долговечности силовых элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий [Текст] / Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: міжнар. наук.-техн. конф.: тези доп., 15-16 квіт. 2015 р. – Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Х., 2015. – С. 16.

11. Семенцов, В. Ф. Политика в области качества Государственного предприятия «АНТОНОВ» [Текст] / Д. С. Кива, М. А. Гвоздев, С. А. Бычков, В. Ф. Семенцов // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ'2015: всеукр. наук.-техн. конф.: тези доп. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Т. 1. – Х., 2015. – С. 45 – 46.

12. Семенцов, В. Ф. Влияние последовательного применения дорнования и барьерного обжатия полосы с отверстием на характеристики напряженно-деформируемого состояния при ее растяжении [Текст] / С. А. Бычков, В. Ф. Семенцов // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ'2015: всеукр. наук.-техн. конф.: тези доп. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Т. 1. – Х., 2015. – С. 47.

13. Семенцов, В. Ф. Влияние глубины обжатия на характеристики локального НДС пластины с отверстием при нагружении ее сдвигом / Е. Т. Василевский, А. Г. Гребеников, А. М. Гуменный, С. П. Светличный, В. Ф. Семенцов [Текст] / Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки: міжнар. наук.-техн. конф.: тези доп., 20–21 квіт. 2016 р. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Х., 2015. – С. 29.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов и списка использованных источников. Общий объем составляет 176 страниц, из них 145 страниц основного текста, 195 рисунков, 6 таблиц, список использованных источников из 91 наименования на 8 страницах.

*Раздел 1***АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ  
И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСА ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В  
ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ**

---

Усталостная долговечность конструктивных элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий определяется характером и уровнем их эксплуатационной нагруженности, конструктивно-технологическими параметрами, усталостными характеристиками применяемых материалов, характеристиками локального напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов в зонах их вероятного усталостного разрушения, технологией обработки силовых элементов в зоне отверстий.

Специалистами авиационной науки и техники проведен значительный объем работ [13, 17, 26, 27, 36, 41, 42, 43, 50, 56, 57, 71, 72] по обеспечению регламентируемой усталостной долговечности конструктивных элементов планера самолета с одиночными отверстиями.

В данной разделе представлен анализ выполненных работ по вопросам повышения усталостной долговечности силовых элементов, рассмотрена эффективность обеспечения долговечности путем местного утолщения силовых элементов в зоне одиночных отверстий, выполнения близко расположенных отверстий, дорнования, раскатки, кольцевого обжатия, выполнения барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации.

**1.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
И РЕСУРСА СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА ТРАНСПОРТНОЙ  
КАТЕГОРИИ**

Одним из главных критериев современных методов проектирования авиационных конструкций является требование создания и функционирования надежной, безопасно повреждаемой конструкции минимальной массы с заданным ресурсом.

Создание безопасно повреждаемой конструкции предусмотрено Нормами прочности и Авиационными правилами, а проектирование на заданный ресурс при минимальной массе отражает экономические проблемы.

При создании нового изделия (рисунок 1.1), конструкторской и технологической подготовке его производства с помощью интегрированных систем CAD/CAM/CAE/PLM в интегрированной информационной среде описываются структура изделия, его состав и все входящие компоненты: детали, узлы, панели, агрегаты, комплектующие изделия, материалы, технология сборки и изготовления конструктивных элементов.



Рисунок 1.1 – Мастер-геометрия самолета Ан-178

Процесс проектирования конструктивных элементов планера самолета включает следующие этапы [10, 14, 15, 28, 29, 49]:

1. Выбор концепции конструкции (монокотловая, сборная, кессонная, лонжеронная и т.д.). При этом в качестве критериев принимаются такие: минимальная масса; стоимость материалов; трудоемкость изготовления; экономическая эффективность; опыт и традиции фирмы. В результате инженерного анализа принимается решение о концепции проектирования силовых конструктивных элементов.

2. Выбор конструктивно-силовой схемы (КСС). На этом этапе проводятся анализы и многофакторные исследования по определению оптимальных параметров КСС с учетом конструктивно-технологических ограничений. Определяются, прежде всего, количество лонжеронов, шаг нервюр, шаг стрингеров. При этом учитываются такие факторы, как интенсивность нагружения, обеспечение минимальной массы верхней и нижней поверхностей, требования обеспечения заданных характеристик прочности и ресурса, требования по обеспечению осмотров и др.

3. Выбор и обоснование допускаемых уровней напряжений для обеспечения статической прочности, усталостной долговечности и характеристик живучести. Для элементов конструкции планера самолета работающих преимущественно на растяжение в качестве допускаемых напряжений принимаются минимальные из рассмотренных:

- напряжения, обеспечивающие статическую прочность при работе на растяжение;
- напряжения, обеспечивающие усталостную долговечность для достижения

заданного в тактико-технических требованиях ресурса;

- напряжения, скорректированные по условиям обеспечения характеристик живучести (медленного роста трещин усталости и заданного уровня остаточной прочности).

4. Расчет распределения мощности элементов продольного набора агрегатов самолета по размаху и хорде, который проводится на основании геометрических параметров теоретического контура агрегата, разработанной конструктивно-силовой схемы, внешних нагрузок, принятых уровней допускаемых напряжений, анализа свойств материалов, исследований характеристик устойчивости элементов продольного набора.

5. Разработка схемы обработки элементов продольного набора, которая ведется на основе конструктивно-технологических ограничений по оборудованию, технологической оснастке, инструменту, оптимизации программ для станков с числовым программным управлением.

6. Разработка технологии изготовления элементов продольного набора. Особое внимание при этом уделяется обеспечению стабильности и качества изготовления конструктивных элементов, привязке их изготовления к существующему оборудованию, минимизации стоимости изготовления и др.

7. Разработка схемы антикоррозионной защиты элементов продольного набора агрегатов самолета.

8. Расчетно-экспериментальный анализ нерегулярностей силового набора. На этом этапе проводится расчетно-экспериментальный анализ ресурсных характеристик нерегулярностей на поисковых образцах поперечных и продольных стыков, люков, вырезов, конструктивных элементов с одиночными и групповыми функциональными отверстиями и др.

9. Расчетно-экспериментальная отработка вариантов ремонта при изготовлении и эксплуатации.

10. Выпуск конструкторской документации.

**Анализ конструктивно-технологических особенностей силовых элементов планера самолета транспортной категории в зонах функциональных отверстий.** Рассмотрим конструктивно-технологические особенности крыла, как

одного из основных агрегатов самолета, определяющего ресурс самолета в целом. К крылу современного транспортного дозвукового самолета (рисунок 1.2) предъявляется ряд требований, которые определяют особенности его конструкции по сравнению с крыльями самолетов предыдущих поколений. Главные требования: повышенные безопасность и надежность; повышенный ресурс, достигающий 80 000 часов налета; размещение мощной взлетно-посадочной механизации на передней и задней кромках крыла; использование всего внутреннего объема крыла для размещения топлива; высокий коэффициент весовой отдачи конструкции (эта задача стоит особенно остро в связи со значительным увеличением геометрических размеров самолетов) [1, 3, 70, 82].

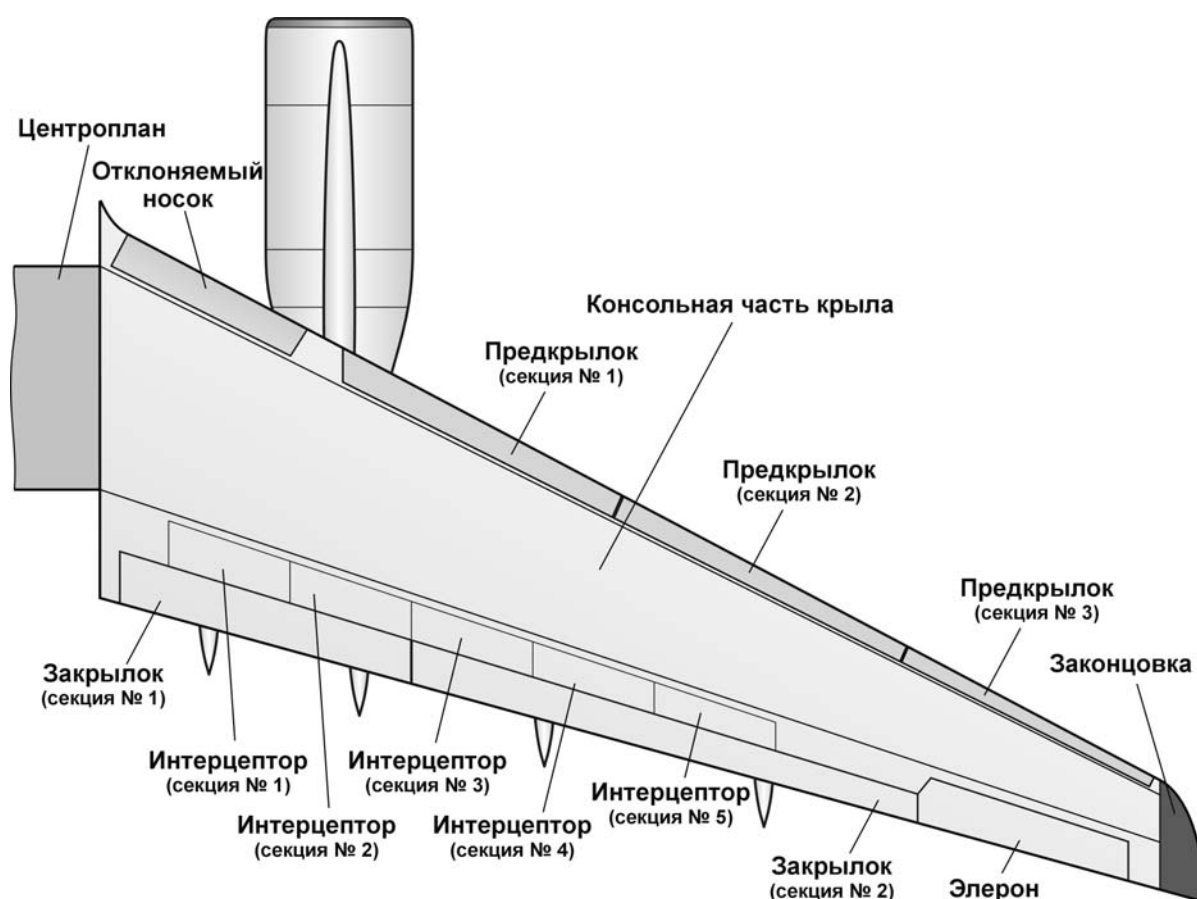


Рисунок 1.2 – Схема крыла современного транспортного самолета

Одним из главных требований обеспечения ресурса является выбор материала. Как показал анализ конструкций растянутых панелей крыла, на современном этапе развития авиационной техники основными материалами являются сплавы Д16чТ, 1161Т, 1163Т [35, 39, 61, 64, 67, 75].

Удовлетворение требованиям, предъявляемым к современному транспортно-



му самолету, требует решения новых задач, стоящих перед конструктором, и разработки новых конструктивных решений [10, 48, 49]. Силовые конструкции крыльев современных самолетов имеют кессонную конструкцию.

Анализ конструктивных особенностей самолетов ГП «АНТОНОВ» показал, что в них применяются как монолитно-оребранные, так и сборно-монолитные конструкции с функциональными отверстиями (рисунок 1.3).

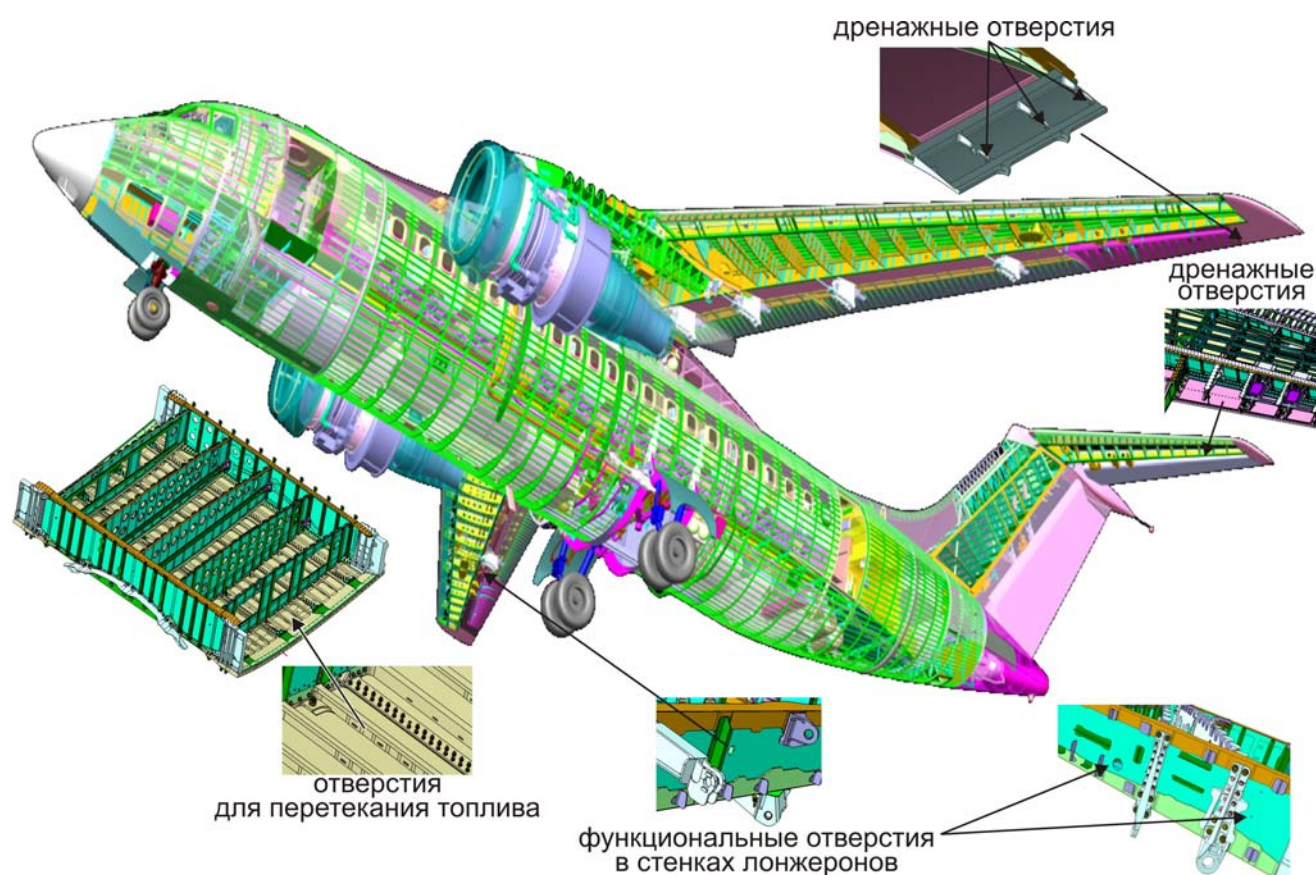


Рисунок 1.3 – Конструктивные элементы планера самолета с функциональными отверстиями

Анализ конструктивно-технологических особенностей панелей крыла показал, что конструкцию растянутой панели крыла можно разделить на ряд характерных зон [14, 60, 66, 70]:

1) регулярная зона – продольные швы и стыки (рисунок 1.4 – 1.5), определяющие основную массу силовой конструкции, работающие в основном в условиях однопараметрического нагружения;

2) конструктивные нерегулярности – поперечные стыки панелей крыла (рисунок 1.6), люки, вырезы (рисунок 1.7), скосы стрингеров, перестыковка стрингеров, «брошенные» стрингеры, отверстия для перетекания топлива

(рисунок 1.8), работающие в однопараметрическом силовом поле.

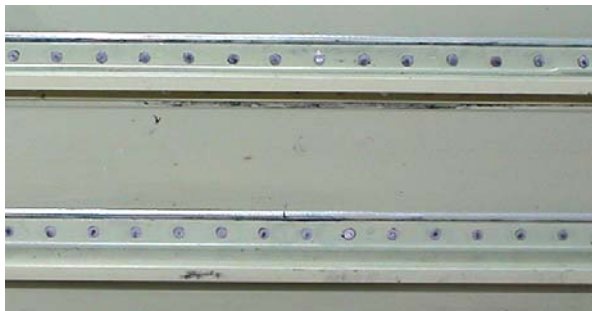


Рисунок 1.4 – Фрагмент продольного шва соединения обшивки и стрингера



Рисунок 1.5 – Фрагмент продольного стыка монолитных панелей крыла



Рисунок 1.6 – Фрагмент поперечного стыка панелей крыла



Рисунок 1.7 – Фрагмент растянутой панели крыла с вырезом под установку блока топливных насосов и отверстиями для перетекания топлива

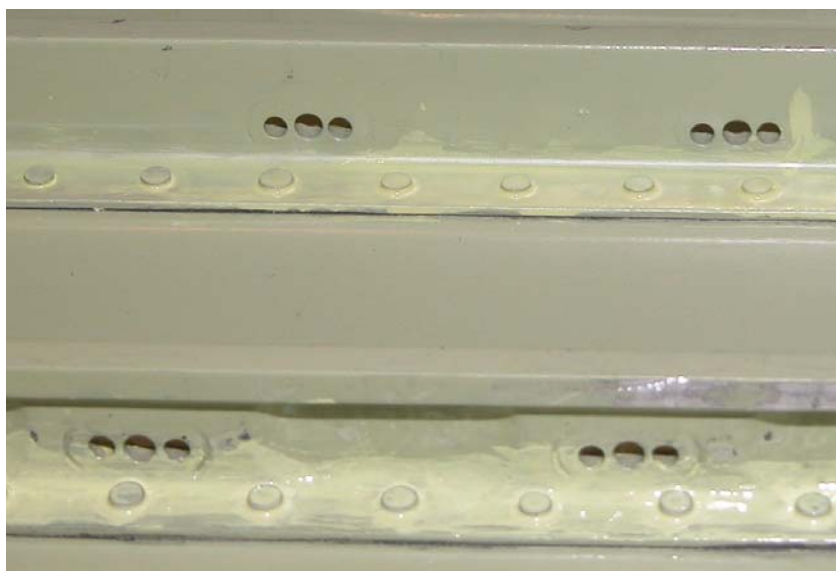


Рисунок 1.8 – Фрагмент растянутой панели крыла с отверстиями для перетекания топлива

На современных транспортных самолетах практически весь запас топлива размещается в крыле. Требования, предъявляемые к надежному функционированию

топливной системы, не всегда совпадают с «интересами» конструкции крыла. Но здесь должен быть однозначно сформулирован приоритет требований надежности топливной системы, поскольку это связано с обеспечением безопасности полета. Но при этом должно быть сокращено до минимума количество вырезов и функциональных отверстий в растянутых панелях крыла; агрегаты топливной системы необходимо по возможности размещать так, чтобы вырезы под них располагались по одной линии вдоль размаха крыла (при таком их размещении легче обеспечить необходимое усиление мест вырезов и более плавное течение силового потока); вырезы при этом необходимо располагать как можно дальше от мест поперечных стыков для обеспечения наиболее равномерного их нагружения.

Функциональные отверстия в ребрах стрингеров (рисунок 1.7 – 1.8), стенках лонжеронов и дренажные отверстия (рисунок 1.9 – 1.11) целесообразно размещать со смещением их по размаху и хорде агрегата.

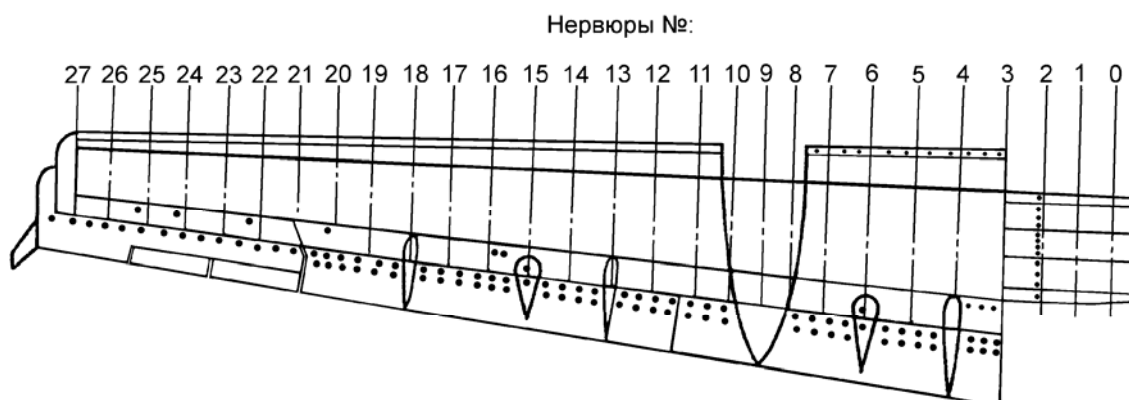


Рисунок 1.9 – Схема расположения дренажных отверстий на крыле самолета Ан-140-100 (вид снизу)

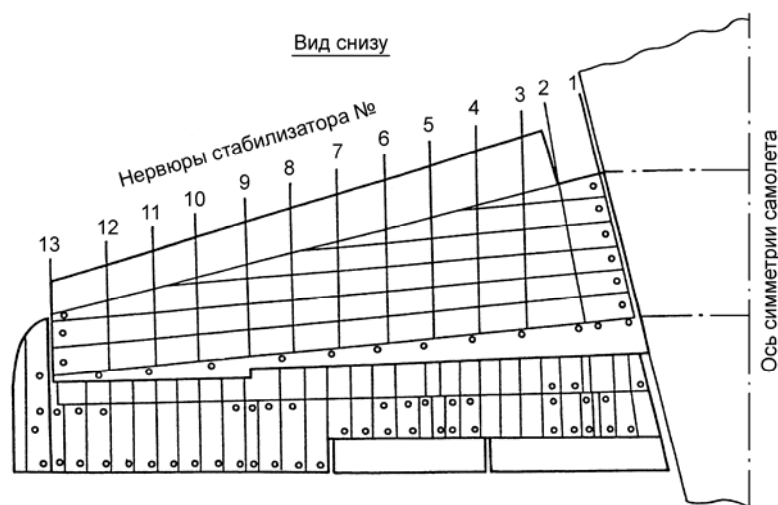


Рисунок 1.10 – Схема расположения дренажных отверстий на горизонтальном оперении самолета Ан-140-100

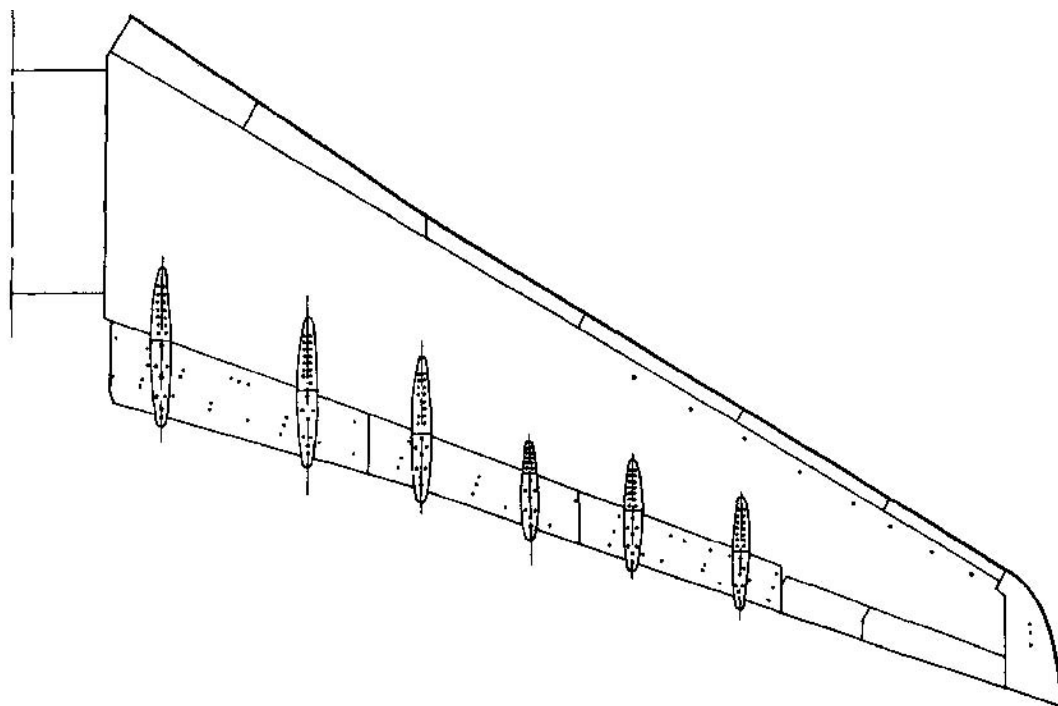


Рисунок 1.11 – Схема расположения дренажных отверстий на крыле самолета Ан-124-100 (вид снизу)

В зонах функциональных отверстий необходимо обеспечить долговечность превышающую долговечность продольных соединений планера самолета.

**Анализ методов обеспечения ресурса планера самолета в зоне функциональных отверстий.** При создании нового самолета обеспечение ресурса по условиям выносливости является одной из важнейших задач. Как показывают практика эксплуатации самолетов и проведенные ресурсные испытания натуральных конструкций, ресурс конструкции в целом определяется ресурсом отдельных типовых нерегулярностей [13, 14, 21, 23, 33, 50, 64, 68, 69, 79].

Значительный вклад в разработку методов проектирования и обеспечения усталостной долговечности силовых элементов планера самолета, при минимизации массы, внесли ученые и специалисты ЦАГИ, Академии наук Украины, ГП «АНТОНОВ», АНТК им. С.В. Ильюшина, АНТК им. А.Н. Туполева, Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Национального авиационного университета Украины, Национального технического университета Украины «КПИ», Московского авиационного института (государственный технический университет) (МАИ), Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева, Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева,

НИИАТ, ОАО УкрНИИАТ, ОАО УкрНИИТМ и многих других.

При проектировании и конструировании нерегулярных зон конструкции их долговечность должна быть равна долговечности регулярной зоны или превышать ее.

На рисунке 1.12 представлены результаты усталостных испытаний натуральных образцов крыльев, проведенных в ЦАГИ.

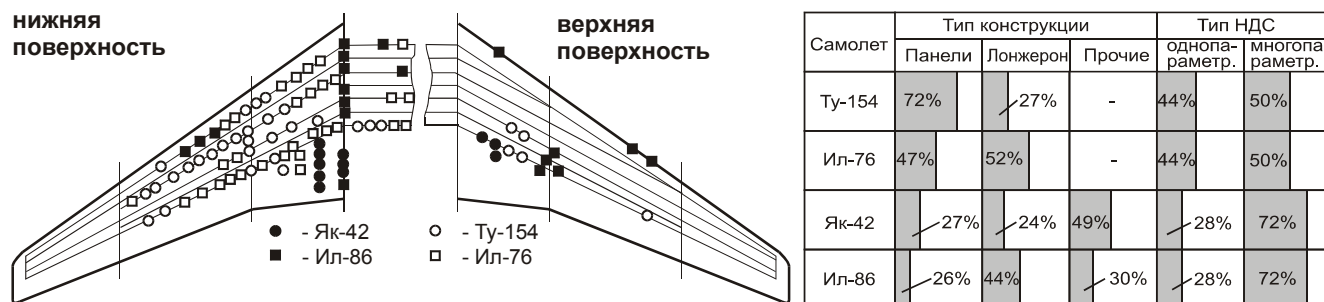


Рисунок 1.12 – Зоны разрушения крыльев при натуральных ресурсных испытаниях

На рисунке 1.13 представлены зоны и характер усталостного разрушения элементов конструкции планера самолета в зонах дренажных отверстий.

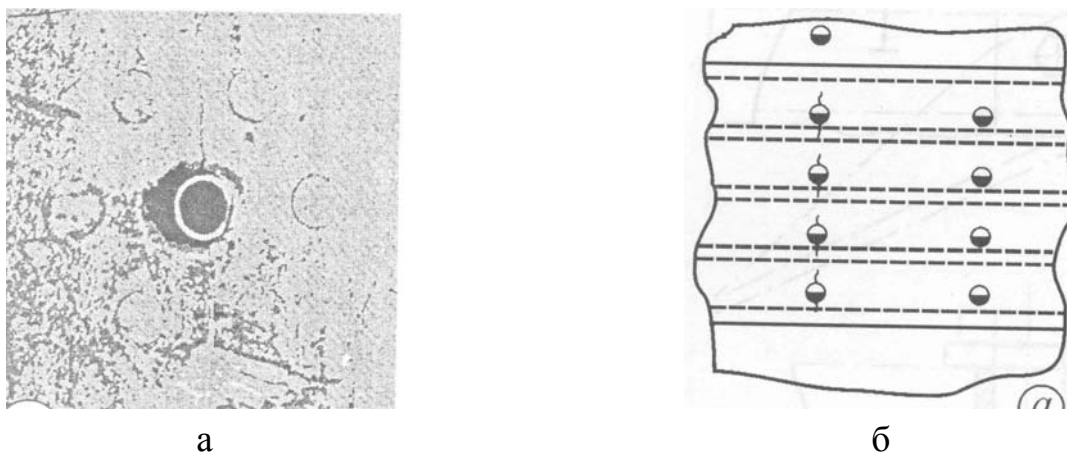


Рисунок 1.13 – Трещины в элементах конструкции планера самолета с дренажными отверстиями: а – трещина в полотне нижней панели крыла самолета Ан-24 от дренажного отверстия; б – грубая обработка дренажных отверстий привела к появлению трещин после 25 000 полетов

Проведенный анализ показал, что обеспечение назначенных ресурсных характеристик силовых элементов планера самолета достигается путем выбора конструкционных материалов, уровня расчетных директивных напряжений, конструктивно-технологических методов повышения характеристик сопротивления усталости регулярных и нерегулярных зон конструкции, обеспечивающих макси-

мально возможное снижение уровня амплитуды напряжений и деформаций в циклически нагруженных элементах силовой конструкции и зонах интенсивного развития фреттинг-коррозии [25, 46, 55, 66, 68, 69, 70, 81, 90].

Для каждого критического места конструкции должен быть определен типовой спектр нагружения в эксплуатации, который основывается на типовом (среднем) полете или совокупности типовых полетов, включающих в себя все режимы полета (буксировку, выруливание на старт, опробование двигателей на земле, разбег, набор высоты, крейсерский полет, снижение, заход на посадку, посадку, пробег и заруливание на стоянку), с учетом их продолжительности и совокупности других параметров, характеризующих каждый из указанных режимов. Типовые спектры нагружения должны также учитывать и другие нагрузки, если они могут повлиять на ресурс рассматриваемой конструкции. Типовой полет по известным зависимостям пересчитывается в эквивалентный по повреждаемости цикл нагружения [14, 15, 23, 66]. Для планера самолета данный цикл принят отнулевым (с коэффициентом асимметрии цикла нагружения, равным нулю). В общем виде пересчет эксплуатационного блока типового полета, включающего в себя цикл земля – воздух – земля (ЗВЗ), проводится по формуле Одингга

$$\sigma_{0 \text{ экв}} = \begin{cases} \sqrt{2 \cdot \sigma_a \cdot \sigma_{max}} & \sigma_m \geq 0; \\ \sqrt{2 \cdot (\sigma_a + 0,2\sigma_m)}, & \sigma_m \leq 0 \text{ и } \sigma_{max} \geq 0; \\ 0 & \sigma_{max} < 0. \end{cases}$$

где  $\sigma_{0 \text{ экв}}$  – эквивалентные напряжения отнулевого цикла нагружения;

$\sigma_a$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_{max}$  – амплитудные, средние и максимальные напряжения цикла нагружения.

По эквивалентным напряжениям осуществляем расчет усталостной долговечности элемента конструкции, определенного в первом приближении по допускаемым напряжениям исходя из условий статической прочности. Если результаты расчета удовлетворяют требуемым значениям параметров ресурса, заданным в ТТТ на самолет, уточнение допускаемых напряжений по условиям усталостной долговечности не проводится. Если же результаты расчета не удовлетворяют требованиям ТТТ по ресурсу, осуществляется снижение допускаемых напряжений,

обеспечивающее достижение требуемых характеристик ресурса.

Для определения степени снижения уровня допускаемых напряжений необходимо воспользоваться степенной зависимостью кривой усталости полосы с отверстием, выполненной из такого же материала, что и панель:

$$N(\sigma_0)^m = const ,$$

где  $N$  – усталостная долговечность на уровне напряжения отнулевого цикла  $\sigma_0$ ;  $m$  – показатель степени.

Как известно, показатель степени  $m$  определяется по результатам усталостных испытаний конструктивных элементов с отверстиями из различных материалов.

Для элементов из алюминиевых сплавов типа Д16Т, В95 этот показатель близок к четырем. Отсюда степень снижения уровня допускаемых напряжений во втором приближении для элементов из алюминиевых сплавов можно определить по формуле

$$K = \sqrt[4]{T_{нотр} / T_{1-го\ прибли} } ,$$

где  $K$  – коэффициент снижения допускаемых напряжений;  $T_{нотр}$  – требуемый по ТТТ ресурс;  $T_{1-го\ прибли}$  – ресурс, определенный в 1-м приближении.

Тогда уровень допускаемых напряжений для 2-го приближения

$$[\sigma_0]_2 = [\sigma_0] / K .$$

Принимая в качестве допускаемых напряжений указанный уровень, выполняется уточнение геометрических параметров продольного набора во втором приближении. Далее по нагрузкам типового полета и уточненной геометрии продольного набора рассчитываются напряжения в характерных точках типового полета и определяются усталостная долговечность и ресурс во втором приближении. Как правило, полученное значение ресурса во втором приближении удовлетворяет требованиям ТТТ на самолет [15, 23]. В противном случае проводится уточнение допускаемых напряжений и определяется ресурс в следующем приближении.

Наличие достаточно надежного метода определения усталости регулярных зон конструкции является особенно важным, поскольку уровень напряжений в

этих зонах определяет в основном вес агрегатов, а ошибки в выборе материала и уровня напряжений в регулярных зонах являются практически непоправимыми и приводят к необходимости преждевременного списания конструкции или ее части. Продольные стыки панелей крыла с поясами лонжеронов и стрингерами представляют собой в конструкции крыла набор самых массовых типовых концентраторов. Накопленный на крыльях большого удлинения опыт показывает, что в натурных конструкциях удается достичь усталостных характеристик, весьма близких к кривой усталости для плоского образца с ненагруженным отверстием при  $K_t = 3,1$ . Поэтому принято считать, что ресурс крыла определяется ресурсом продольных соединений силовых элементов крыла. Анализ характеристик сопротивления усталости панелей крыла показал, что их усталостная долговечность соизмерима с усталостной долговечностью полосы с отверстием из соответствующего материала [11, 13, 15, 51, 54, 58, 66, 72, 78, 81, 84].

На рисунке 1.14 приведены результаты испытаний натурных панелей [66], имитирующих продольные стыки пояса лонжерона с панелью (материал Д16чТ).

На рисунке цифрами обозначены следующие кривые усталости: 1 – образца с одним концентратором (болтом-заклепкой); 2 – продольного соединения панели с лонжероном (число концентраторов  $n = 174$ ); 3 – продольного стыка панелей ( $n = 3000$ ); 4 – базовой кривой усталости полосы с отверстием ( $B/d = 6$ ).

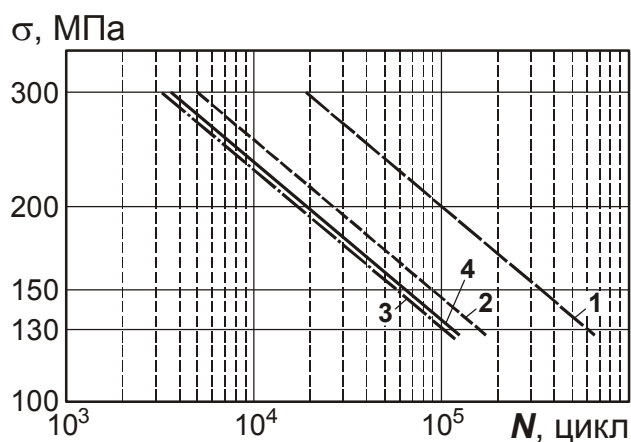


Рисунок 1.14 – Результаты испытаний натурных панелей

Из приведенных данных видно, что базовая кривая усталости и кривая для натурной конструкции, включающей в себя 3000 болтов-заклепок, совпадают.

На рисунке 1.15 приведены результаты анализа типовых усталостных разрушений и долговечности стыков крыла, испытанных в ЦАГИ.

Установлено, что долговечность поперечных стыков панелей самолетов спроектированных в XX веке находится в диапазоне долговечности полосы с отверстием. Установлено также, что одним из наиболее эффективных способов по-



вышения усталостной долговечности срезных болтовых соединений является установка болтов в отверстия соединяемых деталей с осевым и радиальным натягами [9, 13, 17, 20, 22, 23, 37, 46, 66, 68, 69, 73, 74, 80, 81].

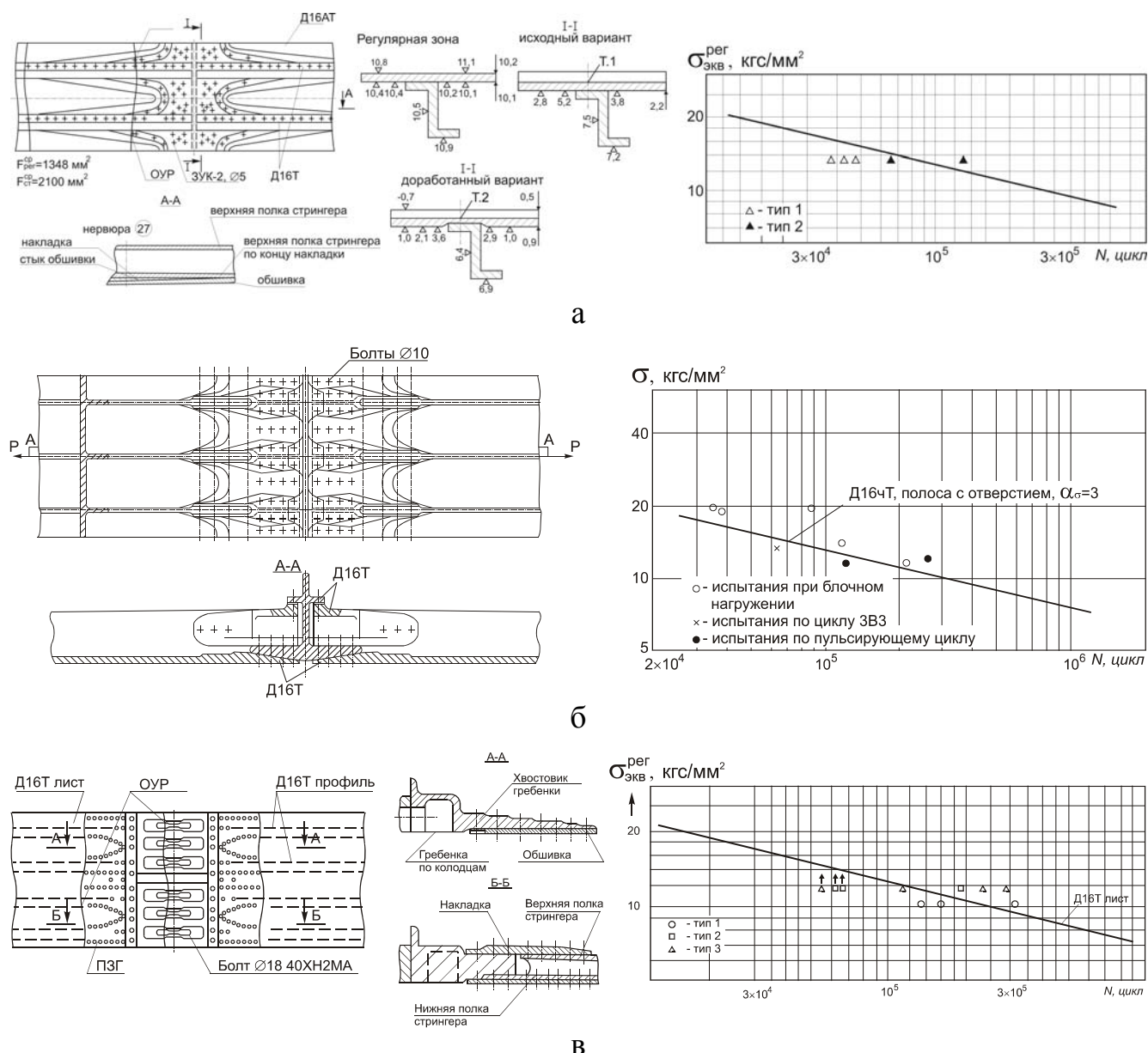


Рисунок 1.15 – Анализ типовых усталостных разрушений и долговечности стыков крыла (по материалам ЦАГИ): а – разрушение в зоне поперечного стыка обшивки растянутых панелей крыла Ту-154; б – разрушение в зоне поперечного стыка растянутых панелей крыла Ил-86; в – разрушение в зоне фланцевого соединения растянутых панелей крыла Ту-154Б

При проектировании и конструировании силовых элементов планера самолета с функциональными отверстиями необходимо обеспечить их долговечность, равную долговечности регулярной зоны конструкции или превышающую её.

## 1.2. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

Для снижения отрицательного влияния функциональных отверстий на усталостную долговечность и ресурс самолета специалистами авиационной промышленности разработан ряд конструктивных и технологических способов.

К конструктивным способам относятся: выбор рациональной формы отверстий, их взаимного расположения; выбор параметров местного утолщения вертикальной полки стрингера; рациональное расположение отверстий по размаху крыла [28, 44, 66].

В работе [44] представлены результаты численных исследований влияния конструктивных параметров (количество отверстий, размеры фаски, смещение отверстия) полосы с отверстиями на характеристики локального НДС.

Анализ результатов показывает:

1. Полоса с одиночным отверстием обладает наихудшими характеристиками НДС из всех рассмотренных вариантов.

2. Выполнение дополнительных отверстий (вариант – три и пять отверстий) приводит к уменьшению величины действующих напряжений и деформаций в зоне концентрации напряжений в 1,16 – 1,24 раза.

3. Выполнение фаски приводит к незначительному росту концентрации напряжений и деформаций по сравнению с концентрацией напряжений и деформаций в полосах с отверстиями без фаски.

4. Смещение оси центрального отверстия на 2 мм приводит к увеличению коэффициента концентрации напряжений и деформаций в среднем в 1,004 раза. По своим характеристикам полоса со смещенным центральным отверстием близка к полосе с отверстием.

5. Применение трех отверстий вместо одного приводит к снижению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,01 – 1,18 раза, максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в 1,17 раза и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в 1,04 – 1,36 раза.

6. Использование пяти отверстий вместо одного приводит к снижению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,05 – 1,25 раза, максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в 1,23 раза и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в 1,12 – 1,53 раза.

В работе [28] представлены результаты исследования влияния конструкторских параметров функциональных отверстий на долговечность силовых элементов, которые были проведены на образцах, имитирующих типовой участок нижних панелей крыла транспортного самолета и представляющих собой монолитную панель со стрингером таврового сечения, в вертикальной полке которого выполнены отверстия для перетекания топлива. Материал образцов – Д16Т, прессованный профиль – Пк301-14. Испытания проводились по форсированному циклу 3ВЗ при  $\sigma_{max} = 150$  МПа и  $\sigma_{min} = -87$  МПа.

Результаты исследований показали [28]:

1) отверстие для перетекания топлива в стрингере снижает выносливость регулярной зоны более, чем в пять раз;

2) изменением формы отверстий можно повысить выносливость в 2,4 – 2,9 раза; однако этот эффект может быть достигнут только путем ужесточения технологии выполнения этих отверстий: так, наличие перекоса оси трех отверстий ( $\alpha = 5^\circ$ ) уже не дает повышения выносливости по сравнению с образцами с круглыми отверстиями;

3) местное усиление вертикальной полки стрингера в зоне отверстий до толщины, равной 1,5 исходной (толщины вертикальной полки стрингера), существенно повышает выносливость исходных образцов с круглыми отверстиями: при одностороннем (несимметричном) усилении – в 2,45 раза, при симметричном усилении – в 3,5 раза, но при этом увеличивается масса конструкции;

4) выносливость образцов с тремя отверстиями с местным односторонним усилением практически близка к выносливости регулярной зоны;

5) местное усиление в зоне овальных отверстий не привело к повышению выносливости этих образцов, что объясняется низким качеством их выполнения (ручная распиловка).

Результаты исследований, представленные в работе [66], показывают, что значения коэффициентов концентрации для некоторых форм отверстий, расположенных вблизи полотна панели, могут изменяться от 2,0 до 3,3. Замена круглого отверстия, расположенного в ребре вблизи полотна панели, на эллиптическое или тройное с крайними отверстиями меньшего диаметра позволяет снизить коэффициент концентрации с 3,39 до 2,7. С удалением отверстий от полотна степень концентрации напряжений понижается.

Введение компенсации (утолщения) в зоне отверстия на потерю площади [66] приводит к повышению усталостной долговечности. Однако эффективность этого приема в значительной степени зависит от принятых геометрических параметров утолщения и формы отверстия. В большинстве случаев для принятия обоснованного решения об усилении зон отверстий необходимы как расчетная оценка характеристик локального НДС и усталостной долговечности, так и экспериментальная проверка конструктивных решений с учетом технологии серийного изготовления. Экспериментально установлено, что компенсация на величину порядка  $\Delta F' \approx 5...8\%$ , где  $\Delta F' = [(F_2 - F_1)/F_1] \cdot 100\%$  (здесь  $F_1$  – площадь регулярного сечения;  $F_2$  – площадь по сечению отверстия, которую чаще всего можно получить исходя из размеров заготовок), не приводит к значительному повышению усталостной долговечности.

В результате проведенного анализа конструктивных факторов установлено следующее [28, 44, 66]:

- 1) необходимо избегать расположения отверстий в одном сечении конструкции;
- 2) переход на отверстия сложных форм (эллиптические или тройные) дает положительный эффект, но делает необходимым повышение требований к точности выполнения этих отверстий в серийном производстве;
- 3) местное усиление (компенсация) зон отверстий дает положительный эффект, но существенно усложняет технологию изготовления конструктивных элементов планера и, как правило, требует применения дополнительных технологических способов обработки элементов в зоне отверстий;
- 4) для обеспечения ресурса современных самолетов транспортной категории необходима разработка новых научно обоснованных методов обеспечения ресурса и усталостной долговечности конструктивных элементов в зонах функциональных отверстий.

### 1.3. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСА ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ

Существующие технологические способы в ряде случаев являются более эффективным средством повышения усталостной долговечности и ресурса конструктивных элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий. Большинство из них заключается в обработке силовых элементов конструкции в зоне функциональных отверстий методами пластического деформирования металла [12, 27, 41, 43, 53, 56, 57, 59, 65, 71].

Практика показывает, что при подгонке деталей и разделке отверстий в процессе сборки агрегатов и узлов изделий нарушение целостности упрочненного слоя резко снижает эффект упрочнения [57].

Для нейтрализации вредного влияния концентраторов напряжений в виде отверстий, радиусных переходов и восстановления сплошности поверхностного слоя детали применяются методы местной обработки, такие, как: дорнование, раскатка, выглаживание [76, 77]. Но в отдельных случаях эти методы недостаточно повышают усталостную долговечность деталей и агрегатов, работающих в условиях циклических нагрузок.

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 [41, 43, 57, 71].

Украинским научно-исследовательским институтом авиационной технологии совместно с ГП «АНТОНОВ» проведено исследование влияния различных технологических способов и вариантов обработки в зоне цилиндрических отверстий различных диаметров (6, 10, 16 и 20 мм) в образцах толщиной соответственно 6, 12, 20 и 38 мм из конструкционных алюминиевых сплавов Д16Т, В95Т1 с продольным расположением волокон. Наряду с этим анализировалось влияние обработки на детали, в которых отверстия выполнены с зенкованными гнездами под болты с  $\varnothing 8$  мм с потайными головками. Эти сочетания диаметров отверстий и толщины образцов характерны для поперечных и продольных стыков панелей, лонжеронов, кронштейнов [57].

Для определения оптимальных методов и вариантов обработки управляемым

пластическим деформированием металла внутри отверстий и металла, окружающего отверстия, была изготовлена оснастка (рисунок 1.16, 1.17) с различными сочетаниями параметров формообразующих элементов в зависимости от способа обработки МГПД.

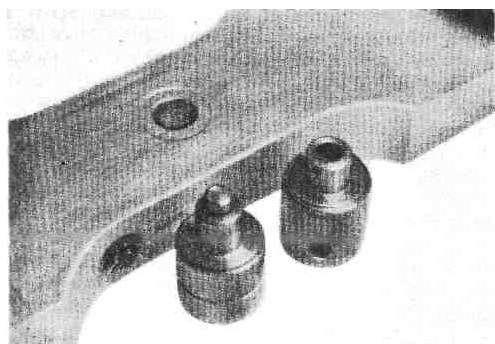


Рисунок 1.16 – Образец с отверстием и обжимки (пуансоны) для формообразования концентрических подсечек, прилегающих к отверстию, и радиусного перехода в отверстии

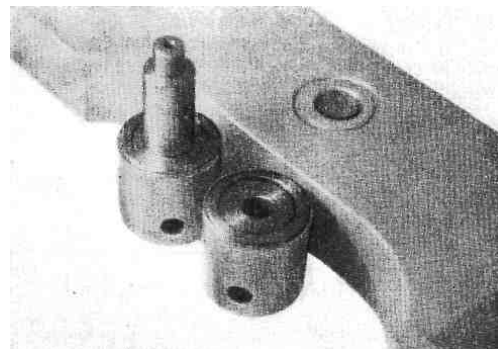


Рисунок 1.17 – Образец с цилиндрическим отверстием и обжимки (пуансоны) для формообразования концентрических кольцевых канавок вокруг отверстия

Образцы с цилиндрическими отверстиями обрабатывались с образованием концентрических площадок различной глубины и ширины (рисунок 1.18). Были проведены также исследования вариантов с образованием кольцевых канавок радиусной и трапецеидальной форм (рисунок 1.19).

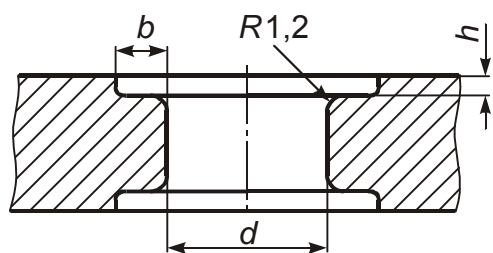


Рисунок 1.18 – Обжатие в зоне цилиндрического отверстия с образованием концентрических подсечек (площадок):  $h$  – глубина подсечки;  $b$  – ширина пояса подсечки;  $R$  – радиус скругления кромок отверстия

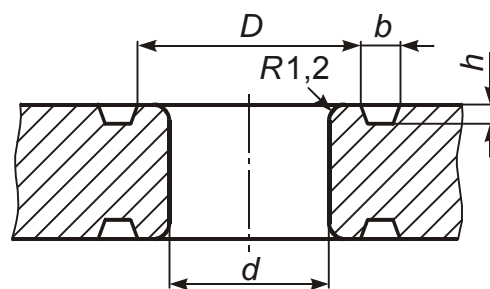


Рисунок 1.19 – Обжатие в зоне цилиндрического отверстия с образованием концентрических канавок трапецеидальной формы:  $D$  – внутренний диаметр кольцевой канавки;  $h$  – глубина канавки;  $b$  – ширина канавки;  $R$  – радиус скругления кромок отверстия

В зенкованных отверстиях  $\varnothing 8$  мм в сплавах Д16Т и В95Т1 толщиной 10 и 15 мм упрочнялись переходная зона от конусной к цилиндрической части и на-

ружные кромки с образованием концентрических площадок (рисунок 1.20).

Обжатие с образованием концентрических площадок (см. рисунок 1.18) проводилось на глубину  $h$  от 0,2 до 1,0 мм и ширину от 1,5 до 5,5 мм.

Высота формообразующих буртиков обжимок (пуансонов) выполнялась на 0,1 мм больше планируемой глубины обжатия подсечки, диаметр направляющего пуансона – на 0,1 мм больше исходного отверстия под обработку.

Обработка цилиндрических отверстий раздачей с помощью гладких разрезных втулок и проталкиваемых или протягиваемых через них конусных оправок проводилось с различным припуском от 0,15 до 2,5 мм.

Зенкованные отверстия под болты с потайными головками обжимались с образованием подсечек с шириной пояска от 2 до 3 мм на глубину от 0,15 до 0,35 мм. Одновременно образовывалось кольцевое углубление в зоне перехода с конусной на цилиндрическую часть отверстия глубиной 1,0 мм.

Обжатие отверстий выполнялось на стационарных гидравлических прессах с помощью гидроскобы и протяжного устройства. Усилия обжатия при упрочнении сплава Д16Т находились в пределах от 60 до 650 кН, для сплава В95Т1 – в пределах 90...800 кН в зависимости от вариантов и параметров упрочнения.

Отверстия под обработку обжатием выполнялись с припуском 0,2 мм.

В процессе обжатия отверстий диаметром 6 – 10 мм с образованием концентрических подсечек происходит уменьшение диаметра на 0,1...0,2 мм, для отверстий диаметром свыше 10 мм диаметр уменьшается на 0,1...0,2 мм только вблизи кромок, а в средней части он увеличивается до 0,2 мм, т. е. отверстие приобретает бочкообразную форму. Поэтому после обжатия отверстий обязательна калибровка для получения требуемого класса точности.

Упрочнение вызывает уплотнение металла, о чем свидетельствует уменьшение расстояния между волокнами. Волокна плавно огибают подсечку. Разрывов

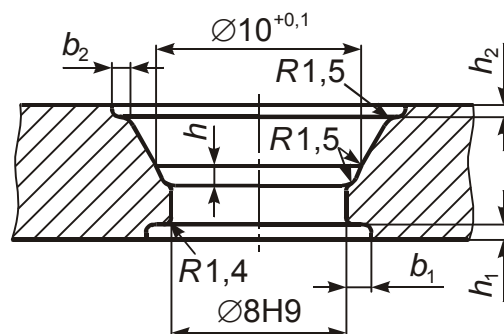


Рисунок 1.20 – Обжатие в зоне зенкованного отверстия образованием концентрических площадок и кольца в зоне перехода от конусной к цилиндрической части

волокон не наблюдается. При этом микротвердость сплава Д16Т, измеренная на приборе ПМТ-3, увеличивается на 14...15% на глубину до 400 мкм. В материале В95Т1 изменения микротвердости не обнаружено.

Основным критерием оценки исследуемых способов и параметров обработки является усталостная долговечность. Сравнительные усталостные испытания образцов проводились на одном уровне нагружения в асимметричном цикле с нагружениями  $\sigma_{min} = 36$  МПа и  $\sigma_{max} = 186$  МПа.

Проведенные экспериментальные исследования [57] показали: усталостная долговечность образцов толщиной 38 мм увеличивается с увеличением глубины и ширины обжатия; для образцов толщиной 20 мм эффект обжатия определяется в основном шириной обжатой зоны и возрастает линейно с ее увеличением, причем для сплава Д16Т эффект более значителен, чем для В95Т1; при обжатии элементов из сплава В95Т1 толщиной 12 мм усталостная долговечность увеличивается с ростом глубины и уменьшается с увеличением ширины подсечек.

Оптимальным вариантом обработки цилиндрических отверстий является обжатие концентрических подсечек (см. рисунок 1.18) При этом для сплава Д16Т ( $\delta = 20$  мм) получено максимальное увеличение долговечности в 15,5 раза, для сплава В95Т1 ( $\delta = 20$  мм) – в 9,2 раза. Обжатие с образованием кольцевых концентрических канавок повышает усталостную долговечность образцов из сплава Д16Т до 11 раз, а с помощью гладких разрезных втулок и конусных оправок для образцов из сплавов Д16Т и В95Т1 – в 4 и 2,3 раза соответственно.

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

Рассмотренные методы обработки конструктивных элементов могут быть рекомендованы для апробации их применения в силовых элементах планера самолета в зоне функциональных отверстий для повышения усталостной долговечности деталей в эксплуатации [57].

**Анализ влияния дорнования стенок отверстий на усталостную долговечность срезных болтовых соединений конструктивных элементов.** Для повышения долговечности соединений конструктивных элементов планера самолета, путем предварительного дорнования стенок отверстий был разработан технологический процесс (рисунок 1.21) [57].



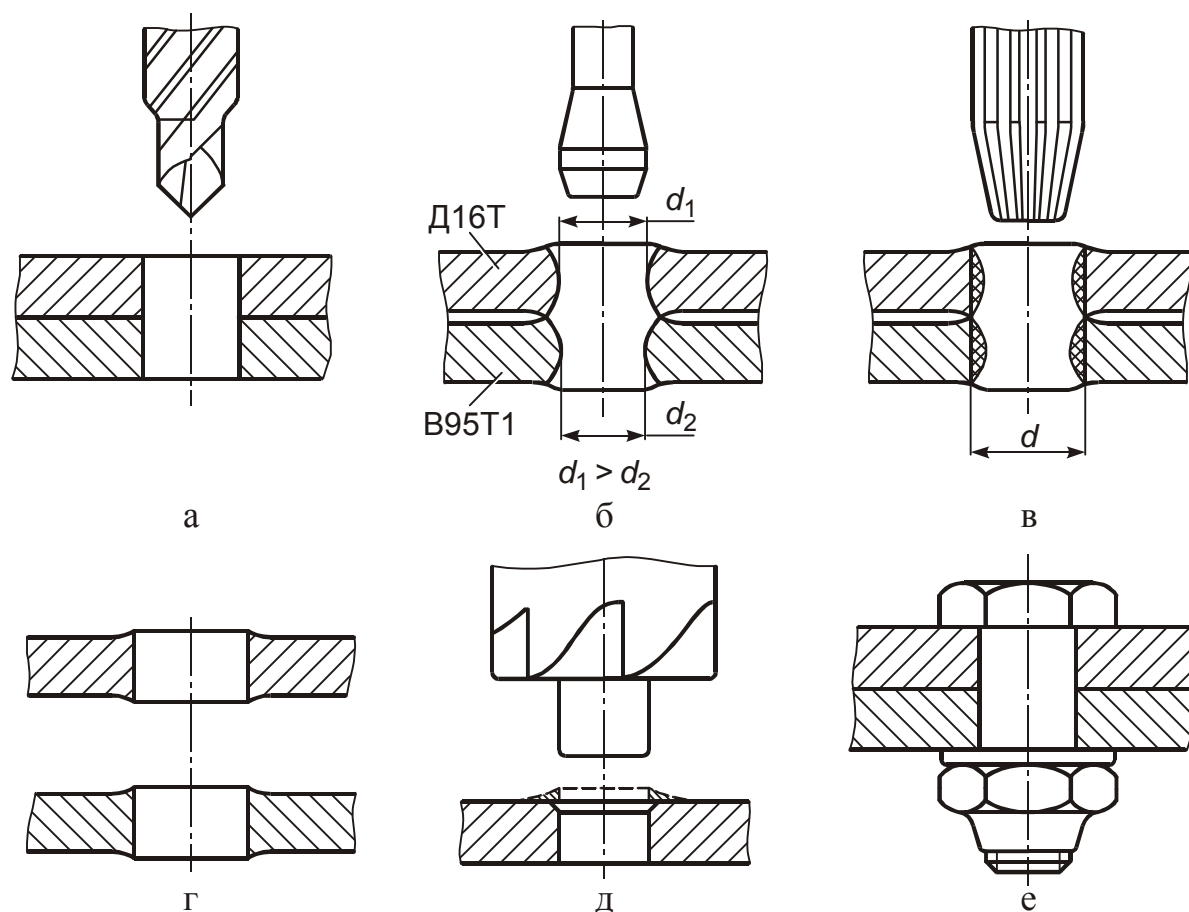


Рисунок 1.21 – Технологический процесс выполнения высокоресурсного соединения: а – сверление ступенчатым сверлом; б – дорнование отверстий однозубым дорном с натягом 1,3...4,0%; в – калибрование отверстий разверткой; г – разборка пакета; д – снятие наплывов; е – окончательная сборка болтового соединения

Разработанный техпроцесс дорнования предусматривает применение: двухступенчатых сверл; весьма простых по конструкции однозубых дорнов с углом заборного конуса рабочего кольца  $1,5...3^\circ$  и цилиндрическим пояском шириной  $0,5...1,0$  мм; зенкеров для снятия наплывов.

Для устранения возможных подрезов на торцах угол между режущими кромками зубьев был выполнен в пределах  $176...177^\circ$ .

Эффективность разработанного технологического процесса [57] исследовали на односрезахных двухрядных образцах с обшивкой из сплава В95Т1 ( $\sigma_{\text{в}} = 560$  МПа) и накладками из сплава Д16Т. В образцы ставили болты из стали 30ХГСА с шестигранной головкой по восемь штук на образец.

Испытания таких образцов с болтами  $\varnothing 8\text{p}6$  при максимальном напряжении

цикла  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа показали, что дорнование с последующим калиброванием разверткой по 9-му качеству повышает долговечность по сравнению с обработкой отверстий только развертыванием с  $7,4 \cdot 10^4$  до  $24,2 \cdot 10^4$  циклов или в 3,3 раза.

Однако эффективность дорнования стенок функциональных отверстий конструктивных элементов планера самолета не исследовалась и отсутствуют практические рекомендации для его применения на самолетах транспортной категории.

**Анализ влияния обработки силовых элементов в зоне отверстий путем выштамповки лунок сегментной конфигурации.** Одним из способов МГПД является обжатие с образованием вокруг отверстия лунок сегментной конфигурации [71]. 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 обжатием целесообразно обрабатывать отверстия со свободными размерами (например, для перетекания топлива, дренажа).

Экспериментально были определены оптимальные параметры обработки отверстий диаметром 5 – 10 мм: расстояние от кромки отверстия до центра канавки – 2,5...3 мм; ширина канавки – 1,5...2 мм; угол обхвата отверстия канавкой – 100...110°; глубина канавки – 0,3...0,4 мм; усилие обжатия – 46...96 кН; уменьшение диаметра отверстия после упрочнения – 0,15...0,2 мм.

Этим способом можно обрабатывать одиночные круглые или овальные отверстия, а также группу отверстий, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга (например, группу трех отверстий для перетекания топлива, состоящих из одного центрального диаметром 10 мм и двух боковых диаметром 9 мм).

Были проведены усталостные испытания плоских образцов на испытательной машине МУП-50 при асимметричном циклическом растяжении на следующих режимах: максимальное напряжение – 145...150 МПа, минимальное напряжение – 33...40 МПа, частота нагружения – 610 циклов в минуту. Усталостная долговечность после образования вокруг отверстий дугообразных канавок увеличилась в 3,5 – 4,8 раза.

Однако в литературных источниках нет практических рекомендаций и научного обоснования применения локального обжатия силовых элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий для повышения их усталостной долговечности и ресурса.

**Анализ влияния обработки элементов конструкции в зоне отверстий раскаткой.** Значение оптимального натяга при раскатывании отверстий составляет 0,6...0,8% [65]. После раскатывания с этим натягом отверстий в пластине из алюминиевого сплава Д16Т величина остаточных напряжений на глубине около 0,3 мм достигает 160...200 МПа. Вблизи поверхности отверстия величина этих напряжений уменьшается в 2,5 – 4 раза. Применение раскатки отверстий под болты позволяет увеличить долговечность болтовых соединений в 2 – 3 раза.

Достоинствами процесса раскатывания отверстий, кроме указанного обеспечения благоприятного НДС вблизи отверстия, являются:

- снижение шероховатости поверхности отверстия в результате его раскатывания;
- отсутствие необходимости в применении специального механизированного инструмента.

К недостаткам процесса раскатывания отверстий следует отнести:

- отклонения диаметров отверстий после раскатки, превышающие предельные отклонения по Н9;
- сложность конструкции раскатников и, соответственно, их высокая стоимость;
- невозможность создания надежной конструкции раскатников для обработки отверстий диаметром менее 8 мм;
- необходимость периодической регулировки раскатников для обеспечения заданной точности обработки отверстий;
- необходимость выдерживания в процессе раскатки осевой подачи в пределах 0,4...0,8 мм/об. Раскатывание с меньшей подачей приводит к многократному прокатыванию роликов по одному и тому же месту поверхности отверстия, что вызывает перенаклеп и шелушение поверхности.

В результате анализа существующих технологических методов обеспечения долговечности силовых элементов планера самолета установлено, что:

- 1) обработка полосы в зоне отверстия раскаткой повышает ее долговечность

в 2 – 3 раза (материал – Д16Т, натяг при раскатывании 0,6...0,8%);

2) обработка полосы в зоне отверстий путем выштамповки лунок сегментной конфигурации повышает ее долговечность в 3,5 – 4,8 раза (отверстия диаметром 5 – 10 мм, угол обхвата отверстия канавкой – 100...110°; глубина канавки – 0,3...0,4 мм; усилие обжатия – 46...96 кН);

3) обработка полосы в зоне отверстия методом дорнования повышает ее долговечность в 3 – 5 раз (материал – В95Т, натяг – 3,0...3,5%);

4) обработка полосы в зоне отверстий путем выполнения обжатия поясков вокруг отверстий повышает его долговечность более чем в 10 раз (материал – Д16Т, Ø6, 8, 10 мм).

Однако следует отметить, что все параметры обработки были получены экспериментальным путем. В представленных работах не проводилось исследование влияния параметров обработки в зоне функциональных отверстий на характеристики локального напряженно-деформированного состояния. Нет практических рекомендаций по применению методов локального пластического деформирования конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий для достижения заданного ресурса.

Поэтому необходима разработка конструктивно-технологических методов повышения ресурса конструктивных элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий путем применения методов локального пластического деформирования, обеспечивающих уменьшение удельной энергии деформирования ( $W = \sigma \cdot \varepsilon$ ) в зонах вероятного усталостного разрушения.

#### 1.4. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ исследований в области конструктивно-технологических методов повышения усталостной долговечности конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий, представленных в подразд. 1.1 – 1.3, позволяет сформулировать цель данной работы и определить задачи, решение которых обеспечивает ее достижение.

Целью работы является разработка конструктивно-технологических методов обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ конструктивно-технологических особенностей и методов обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий;
- научно обосновать конструктивно-технологические методы обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий;
- исследовать влияние методов локального пластического деформирования на характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий;
- провести экспериментальные исследования влияния методов обработки на характеристики усталостной долговечности конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий;
- разработать технологию и средства оснащения для процессов обработки конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий;
- внедрить методы обеспечения ресурса конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий в производство на ГП «АНТОНОВ», ХГАПП, а также учебный процесс Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

## Раздел 2

## НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ

---

Усталостная долговечность конструктивных элементов в нерегулярных зонах конструкции определяется величиной средних и амплитудных значений  $\sigma$  и  $\varepsilon$  в локальных зонах их концентрации. Прогнозирование изменения долговечности ведется по изменению характеристик локального напряженно-деформированного состояния в зонах вероятного усталостного разрушения.

Усталостная долговечность конструктивных элементов ( $N$ ) со свободными отверстиями при эксплуатационных нагрузках определяется величиной удельной энергии деформирования ( $W = \sigma_{0_{ЭКВ}} \cdot \varepsilon_{0_{ЭКВ}}$ ) в локальных зонах её концентрации. Прогнозирование изменения усталостной долговечности ведется по изменению характеристик локального НДС в зонах вероятного усталостного разрушения ( $N = C/W^m$ ).

Очевидно, что для повышения усталостной долговечности и ресурса конструктивных элементов в зоне функциональных отверстий необходимо конструктивными и технологическими методами уменьшить величину упругой составляющей удельной энергии деформирования в зонах вероятного усталостного разрушения.

Коэффициент уменьшения удельной энергии деформирования  $k_{W_{0_{ЭКВ}}} = W_{0_{ЭКВ_i}} / W_{0_{ЭКВ_{баз}}}$  (где  $W_{0_{ЭКВ_i}}$  – значение удельной энергии деформирования в зонах функциональных отверстий, обработанных методами локального пластического деформирования;  $W_{0_{ЭКВ_{баз}}}$  – значение удельной энергии деформирования базового образца (полоса со свободным отверстием)), определяет уровень изменения долговечности конструктивных элементов с функциональными отверстиями.

Разработан метод (рисунок 2.1) анализа влияния утолщения, раскатки, дорнования, обжатия на характеристики локального НДС конструктивных элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий с учетом истории нагружения.

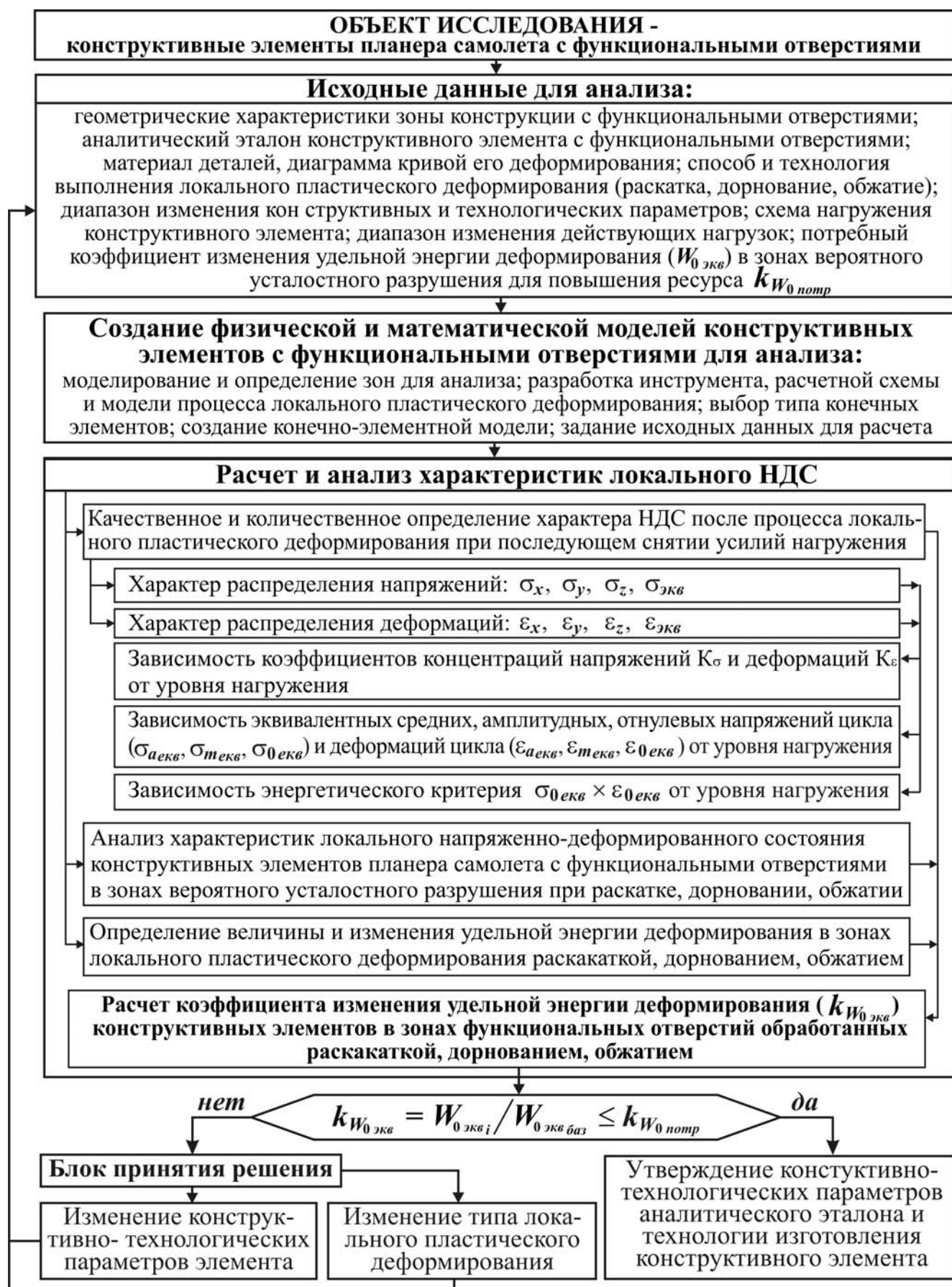


Рисунок 2.1 – Метод анализа влияния конструктивно-технологических параметров на характеристики локального НДС конструктивных элементов планера самолета с функциональными отверстиями

## 2.1. ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОДНОСТОРОННЕГО УТОЛЩЕНИЯ В ЗОНЕ ОТВЕРСТИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОКАЛЬНОГО НДС ПОЛОСЫ С ОТВЕРСТИЕМ ПРИ ЕЕ РАСТЯЖЕНИИ

Значительные трудности в обеспечении усталостных характеристик силовых элементов конструкции с функциональными отверстиями представляет задача исключения их усталостных разрушений. Эти отверстия часто являются источниками усталостных трещин, приводящих к преждевременному разрушению конструкции. Анализ разрушений натуральных конструкций кессон-баков показывает, что в тех случаях, когда не применяют специальные методы повышения характеристик сопротивления усталости зон с отверстиями, значения показателей качества  $K_y$  по отдельным концентраторам могут достигать четырех [66]. Одним из конструктивных приемов снижения отрицательного влияния отверстий на статическую прочность и долговечность конструкции является применение местного утолщения в зоне отверстия.

В данном подразделе исследовано влияние величины одностороннего утолщения в зоне отверстия на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее растяжении. Толщина полосы – 5 мм. Величина утолщения (параметр  $thk$ ) варьируется в диапазоне от 1 до 3,5 мм. Величина растягивающих напряжений в сечении брутто составляет 0, 50, 100, 130, 150 и 200 МПа.

Исследование выполнено с применением метода конечных элементов, реализовано в системе инженерного анализа ANSYS.

Геометрические размеры полосы с отверстием, принятые для анализа, показаны на рисунке 2.2. Материал полосы – алюминиевый сплав 1163 со следующими механическими характеристиками: модуль упругости  $E = 72000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , предел текучести  $\sigma_m = 265$  МПа [8]. Модель поведения материала – полилинейная упругопластическая с кинематическим упрочнением [87].

С учетом геометрической симметрии модели и характера нагружения при моделировании рассмотрена 1/4 конструкции с заданием соответствующих условий симметрии. Расчетная схема полосы с отверстием показана на рисунке 2.3.

Для аппроксимации расчетной модели полосы выбраны восьмиузловые элементы твердого деформируемого тела, обладающие тремя степенями свободы в каждом из узлов (линейные перемещения вдоль осей X, Y, Z) [86].

Конечноэлементная модель полосы с отверстием показана на рисунке 2.4.



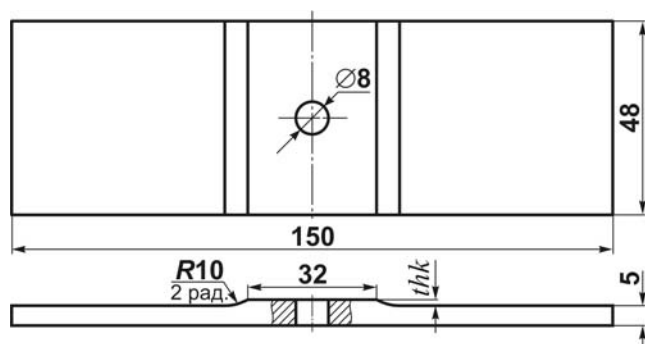


Рисунок 2.2 – Геометрические размеры полосы с отверстием

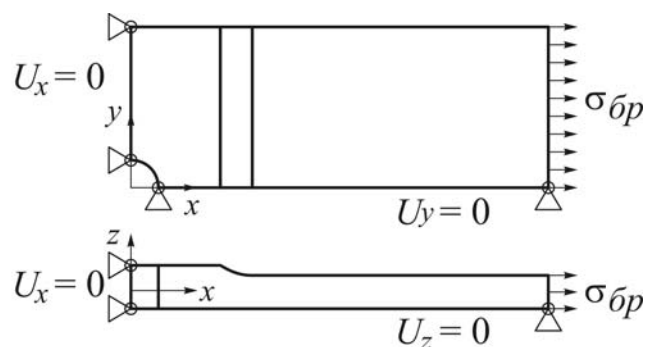


Рисунок 2.3 – Расчетная схема полосы с отверстием

На рисунке 2.5 показан характер распределения главных растягивающих напряжений в полосе с отверстием при уровне растягивающих напряжений в сечении брутто 130 МПа.

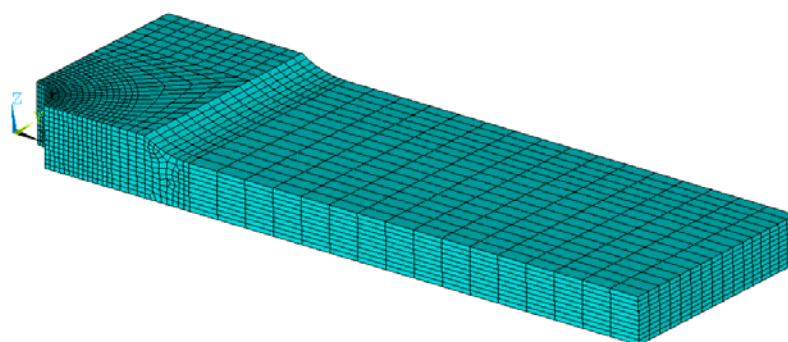
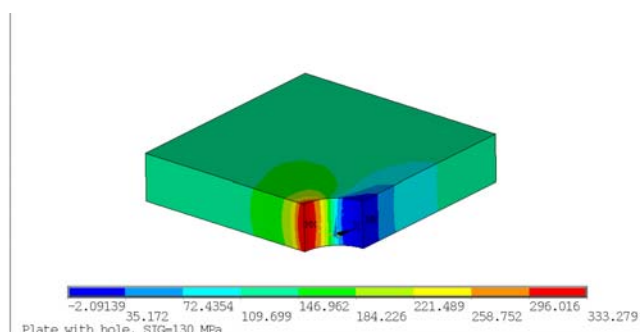
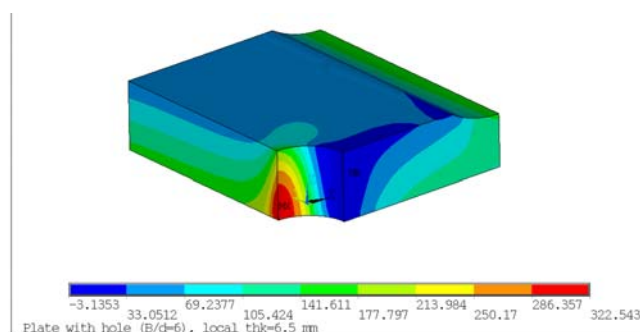


Рисунок 2.4 – Конечноэлементная модель полосы с отверстием



а

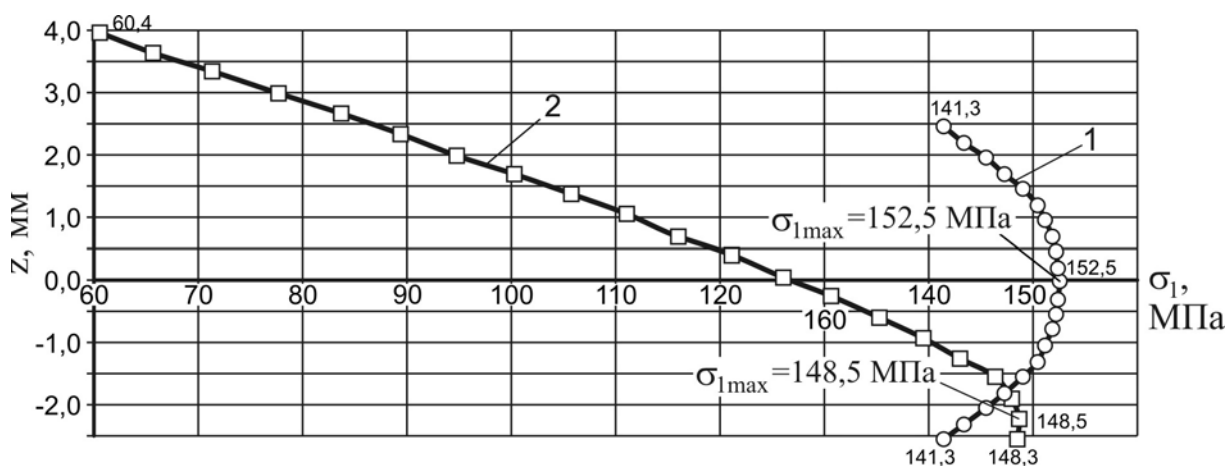


б

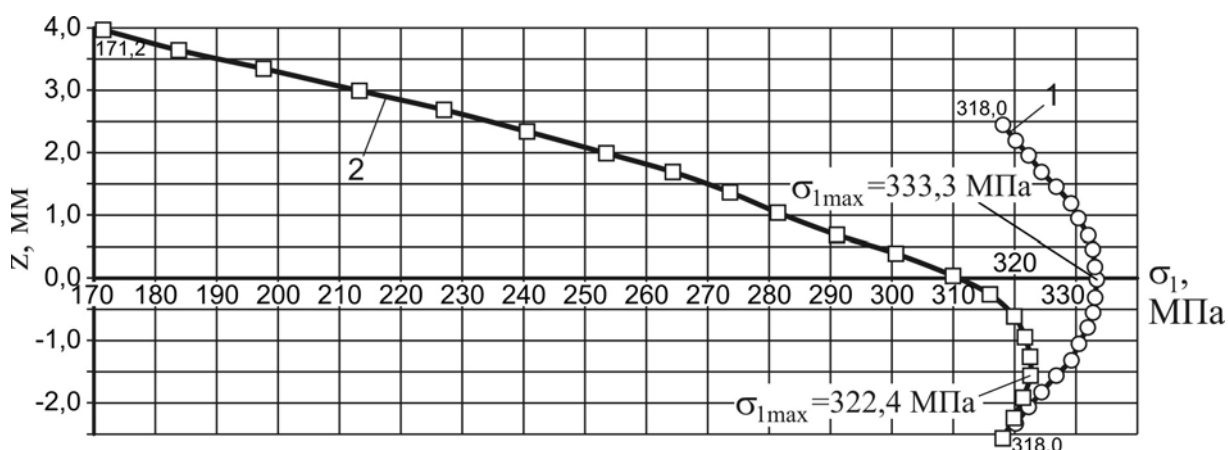
Рисунок 2.5 – Характер распределения главных растягивающих напряжений в полосе с отверстием при уровне растягивающих напряжений в сечении брутто 130 МПа: а – полоса с отверстием (без утолщения); б – полоса с отверстием (утолщение 1,5 мм)

На рисунке 2.6 показан характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине полосы в сечении по оси отверстия при уровне растягивающих напряжений в сечении брутто 50 и 130 МПа.

На рисунке 2.7 показан характер распределения главных растягивающих напряжений по радиусному переходу в сечении по оси продольной симметрии полосы при уровне растягивающих напряжений в сечении брутто 50 и 130 МПа.

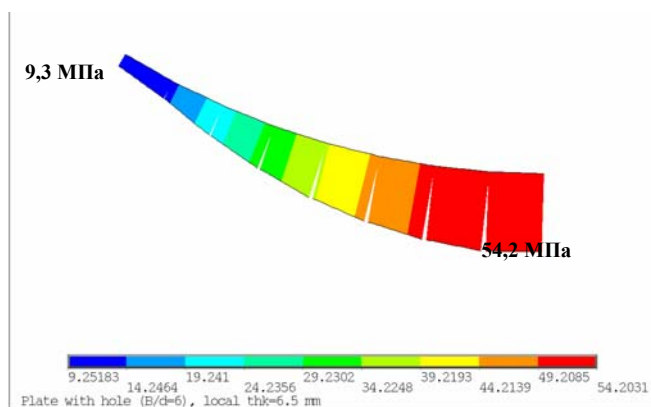


а

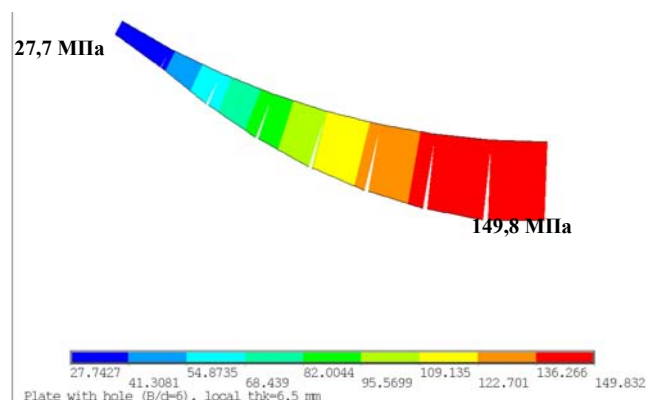


б

Рисунок 2.6 – Характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине полосы: а –  $\sigma_{\bar{p}} = 50$  МПа; б –  $\sigma_{\bar{p}} = 130$  МПа: 1 – полоса с отверстием без утолщения; 2 – полоса с отверстием с утолщением 1,5 мм



а



б

Рисунок 2.7 – Характер распределения главных растягивающих напряжений по радиусному переходу: а –  $\sigma_{\bar{p}} = 50$  МПа; б –  $\sigma_{\bar{p}} = 130$  МПа

Анализируя характер распределения главных растягивающих напряжений, необходимо отметить следующее. Для полосы с отверстием без утолщения зона

максимальных напряжений находится на кромке отверстия с локализацией в точке, расположенной посередине толщины полосы, а для полосы с утолщением в зоне отверстия наблюдается смещение зоны максимальных напряжений ближе к нижней поверхности полосы в силу локального изгиба, вызванного эксцентриситетом в передаче нагрузки. При этом с увеличением уровня напряжений в сечении брутто наблюдается увеличение разницы между максимальными главными растягивающими напряжениями для полосы без утолщения и с утолщением. Распределение главных растягивающих напряжений по радиусному переходу характеризуется резким снижением уровня напряжений, при этом в начале радиусного перехода уровень напряжений соответствует уровню напряжений в сечении брутто.

На рисунке 2.8 показан результат влияния величины утолщения на распределение главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в сечении по оси отверстия при уровне растягивающих напряжений в сечении брутто 130 МПа.

Из графика видно, что усиление полосы в зоне отверстия приводит к перераспределению напряжений по сечению, при этом величина максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла уменьшается на 3,2% по сравнению с аналогичным значением для полосы с отверстием без утолщения.

На рисунках 2.9 – 2.11 показаны результаты исследования влияния величины утолщения в зоне отверстия на величины главных растягивающих напряжений, упругих деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла.

На рисунках цифрами обозначены следующие варианты полосы: 1 – полоса с отверстием без утолщения; 2 – утолщение 1,0 мм; 3 – утолщение 1,5 мм; 4 – утолщение 2,5 мм; 5 – утолщение 3,5 мм.

В результате проведенных исследований:

1. Установлено, что одностороннее утолщение полосы в зоне отверстия не приводит к существенному изменению (не более 3%) величины максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в сечении по оси отверстия.

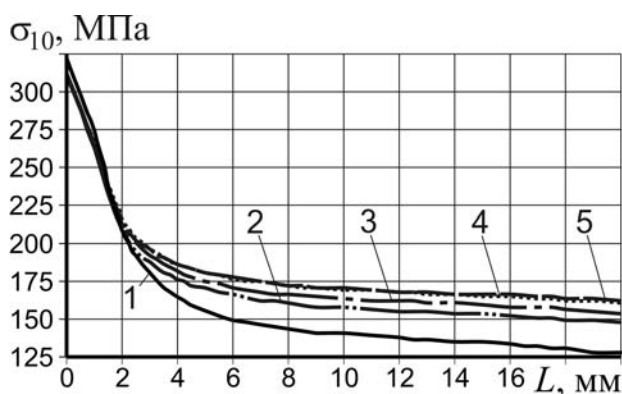


Рисунок 2.8 – Характер распределения главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

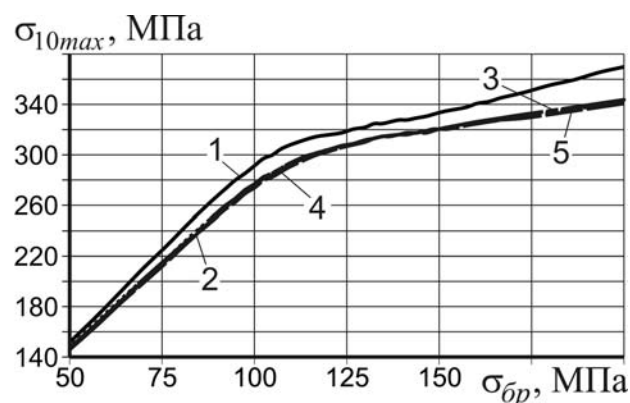


Рисунок 2.9 – Влияние уровня нагружения и величины утолщения на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

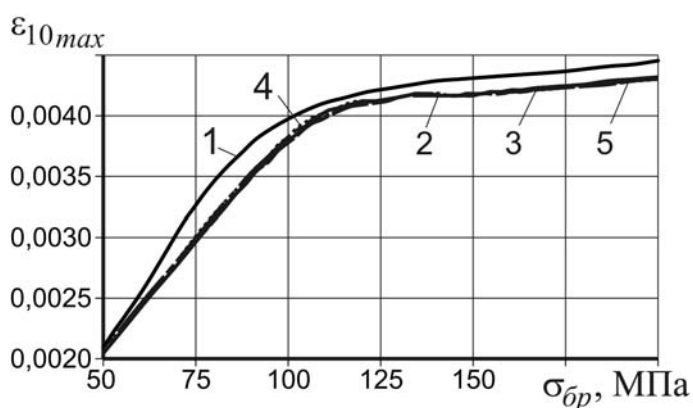


Рисунок 2.10 – Влияние уровня нагружения и величины утолщения на изменение максимальных главных растягивающих упругих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

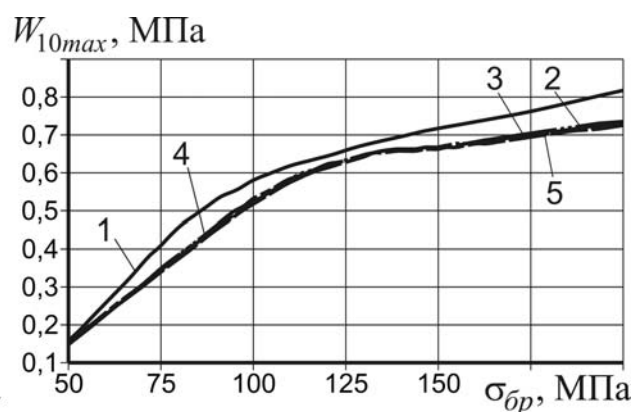


Рисунок 2.11 – Влияние уровня нагружения и величины утолщения на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

2. Показано, что для полосы с отверстием в диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 100 до 200 МПа применение утолщения в зоне отверстия способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,03 – 1,1 раза по сравнению с напряжением в полосе с отверстием без усиления. При этом величины максимальных главных растягивающих деформаций и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла уменьшаются в 1,04 раза и 1,03 – 1,14 раза соответственно.

3. Для гарантированного достижения заданных характеристик долговечности конструктивных элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий

необходима разработка и внедрение новых методов, не требующих увеличения массы конструкции.

## 2.2. ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДВУХСТОРОННЕГО УТОЛЩЕНИЯ В ЗОНЕ ОТВЕРСТИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОКАЛЬНОГО НДС ПОЛОСЫ С ОТВЕРСТИЕМ ПРИ ЕЕ РАСТЯЖЕНИИ

Для обеспечения характеристик прочности и усталостной долговечности конструктивных элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий выполняют одностороннее и двухстороннее утолщение в зоне отверстия. В подразделе 2.3 [16] показано, что одностороннее утолщение полосы с отверстием незначительно влияет на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в сечении по оси отверстия из-за эксцентриситета передачи нагрузки.

Целью данного подраздела работы является исследование влияния величины двухстороннего утолщения в зоне отверстия на характеристики локального НДС полосы с отверстием. Величина утолщения (параметр  $thk$ ) варьируется в диапазоне от 0,5 до 1,75 мм. Величина растягивающих напряжений в сечении брутто составляет 0, 50, 100, 130, 150 и 200 МПа.

Исследование выполнено с применением метода конечных элементов, реализованного в системе инженерного анализа ANSYS.

Геометрические размеры полосы с отверстием, принятые для анализа, показаны на рисунке 2.12. Материал полосы – алюминиевый сплав 1163 со следующими механическими характеристиками: модуль упругости  $E = 72000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , предел текучести  $\sigma_m = 265$  МПа [8]. Модель поведения материала – полилинейная упругопластическая с кинематическим упрочнением [87].

С учетом геометрической симметрии модели и характера нагружения при моделировании рассмотрена 1/8 конструкции с заданием соответствующих условий симметрии. Расчетная схема полосы с отверстием показана на рисунке 2.13.

Для аппроксимации расчетной модели полосы выбраны восьмиузловые элементы твердого деформируемого тела, обладающие тремя степенями свободы в каждом из узлов (линейные перемещения вдоль осей X, Y, Z) [86].

Конечно-элементная модель полосы с отверстием показана на рисунке 2.14.

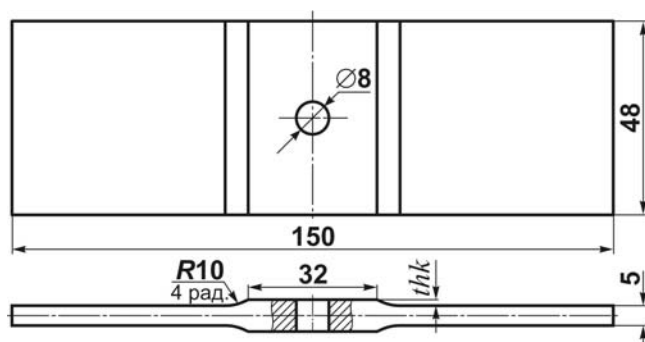


Рисунок 2.12 – Геометрические размеры полосы с отверстием

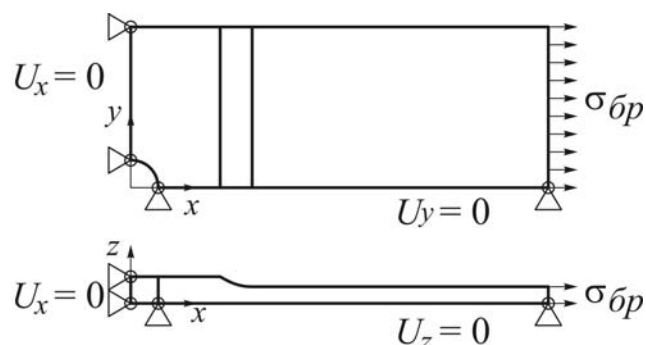


Рисунок 2.13 – Расчетная схема полосы с отверстием

На рисунке 2.15 показан характер распределения главных растягивающих напряжений в полосе с отверстием при уровне растягивающих напряжений в сечении брутто 130 МПа.

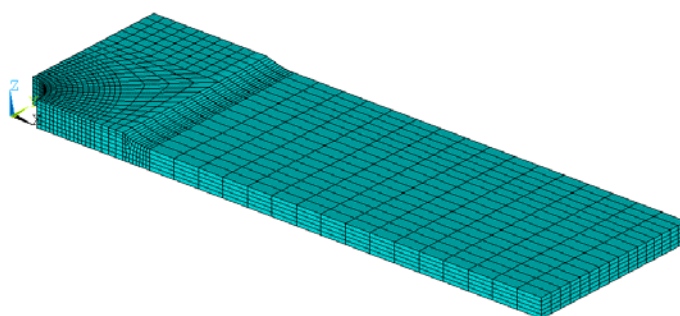
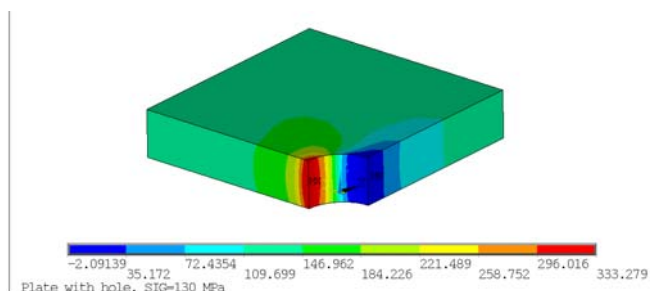
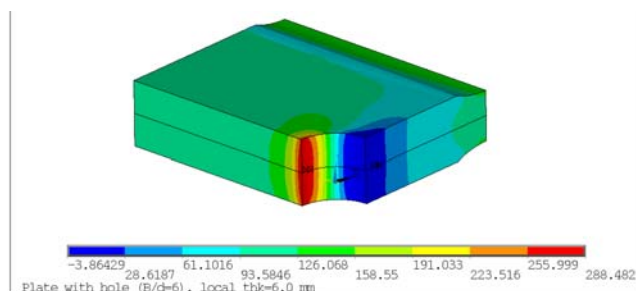


Рисунок 2.14 – Конечно-элементная модель полосы с отверстием



а



б

Рисунок 2.15 – Характер распределения главных растягивающих напряжений в полосе с отверстием при уровне растягивающих напряжений в сечении брутто 130 МПа: а – полоса с отверстием (без утолщения); б – полоса с отверстием (утолщение 0,75 мм с двух сторон)

На рисунке 2.16 показан характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине полосы в сечении по оси отверстия при уровне растягивающих напряжений в сечении брутто 50 и 130 МПа.

На рисунке 2.17 показан характер распределения главных растягивающих напряжений по радиусному переходу в сечении по оси продольной симметрии полосы при уровне растягивающих напряжений в сечении брутто 50 и 130 МПа.

Результат представлен для полосы с отверстием в случае двухстороннего утолщения, равного 0,75 мм.

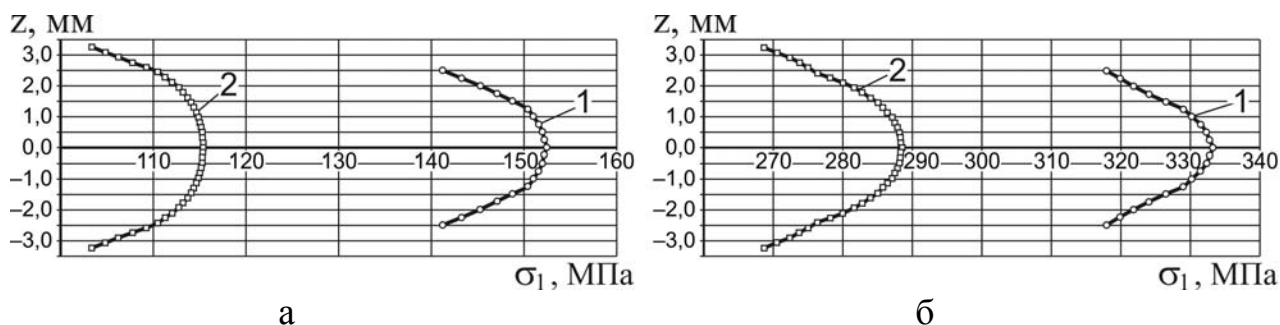


Рисунок 2.16 – Характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине полосы: а –  $\sigma_{бр} = 50$  МПа; б –  $\sigma_{бр} = 130$  МПа: 1 – полоса с отверстием (без утолщения); 2 – полоса с отверстием (утолщение 0,75 мм с двух сторон)

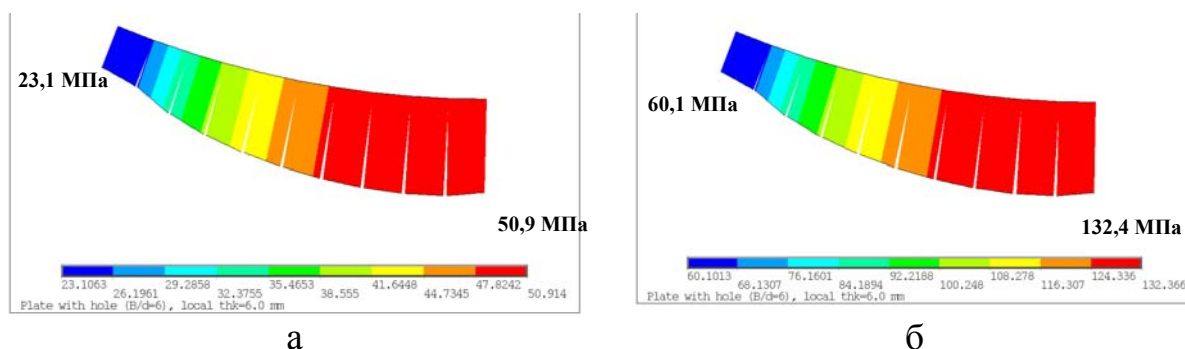


Рисунок 2.17 – Характер распределения главных растягивающих напряжений по радиусному переходу: а –  $\sigma_{бр} = 50$  МПа; б –  $\sigma_{бр} = 130$  МПа

Видно, что в обоих случаях величина главных растягивающих напряжений по радиусному переходу незначительно превышает уровень напряжений в сечении брутто.

На рисунке 2.18 показан результат определения влияния величины утолщения на распределение главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в сечении по оси отверстия при уровне растягивающих напряжений в сечении брутто 130 МПа.

Из рисунка 2.18 видно, что усиление полосы в зоне отверстия приводит к перераспределению напряжений по сечению, при этом величина максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла уменьшается в 1,4 раза по сравнению с аналогичным значением для полосы с отверстием без утолщения.

На рисунках 2.19 – 2.21 показаны результаты исследования влияния величины утолщения в зоне отверстия на величины главных растягивающих напряжений, упругих деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла.

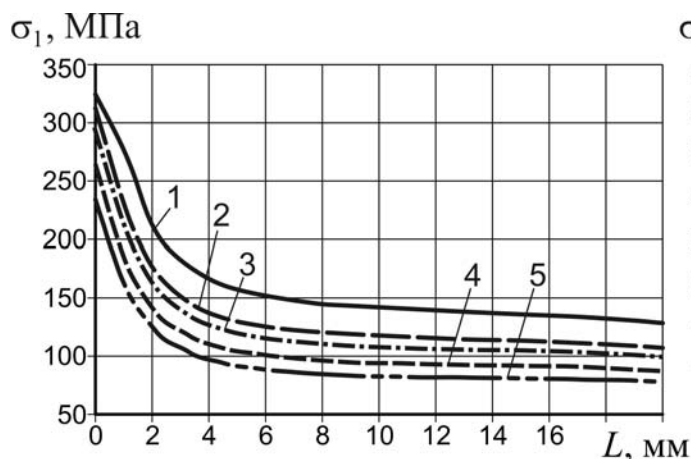


Рисунок 2.18 – Характер распределения главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

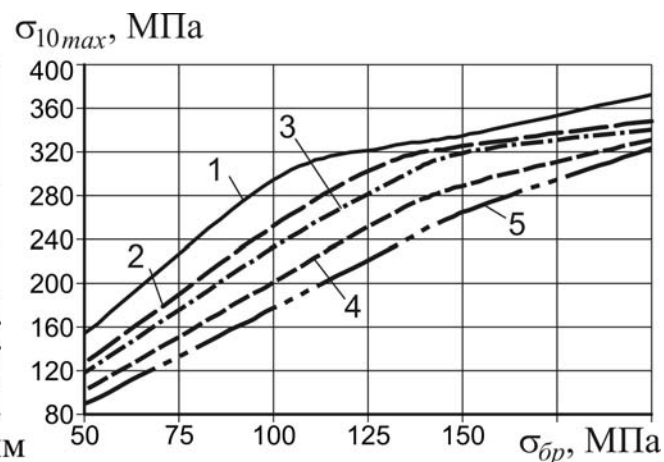


Рисунок 2.19 – Влияние уровня нагружения и величины утолщения на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

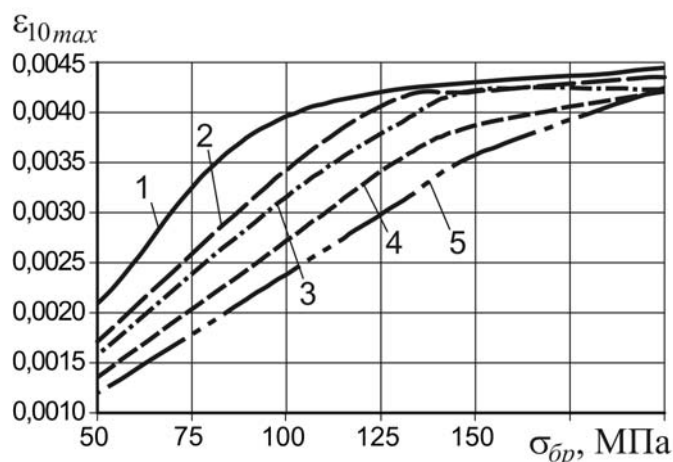


Рисунок 2.20 – Влияние уровня нагружения и величины утолщения на изменение максимальных главных растягивающих упругих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

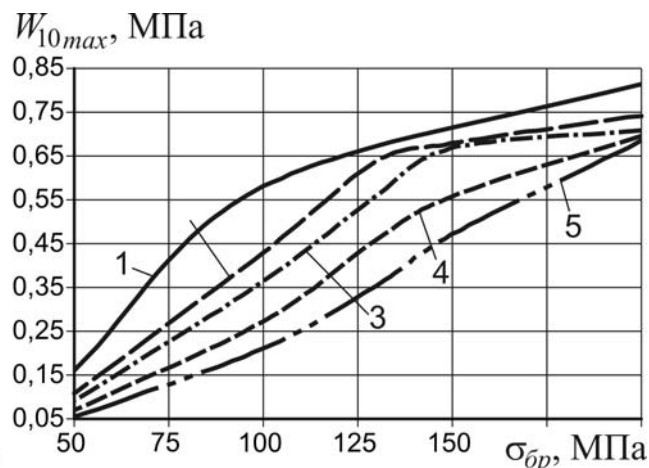


Рисунок 2.21 – Влияние уровня нагружения и величины утолщения на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

На рисунках 2.18 – 2.21 приняты следующие обозначения: 1 – полоса с отверстием (без утолщения), 2 – полоса с отверстием (утолщение 0,5 мм с двух сторон), 3 – полоса с отверстием (утолщение 0,75 мм с двух сторон), 4 – полоса с отверстием (утолщение 1,25 мм с двух сторон), 5 – полоса с отверстием (утолщение 1,75 мм с двух сторон).

Проанализировано изменение характеристик локального НДС в полосе с отверстием для случаев применения одностороннего и двухстороннего утолщения



(см. рисунки 2.22 – 2.24).

На рисунках 2.22 – 2.24 приняты следующие обозначения: 1 – полоса с отверстием (без утолщения), 2 – полоса с отверстием (одностороннее утолщение 1,5 мм), 3 – полоса с отверстием (двухстороннее утолщение 0,75 мм).

Кроме того, исследовано влияние вида и величины утолщения на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием при уровне растягивающих напряжений в сечении брутто  $\sigma_{\bar{\sigma}p} = 130$  МПа (рисунок 2.25).

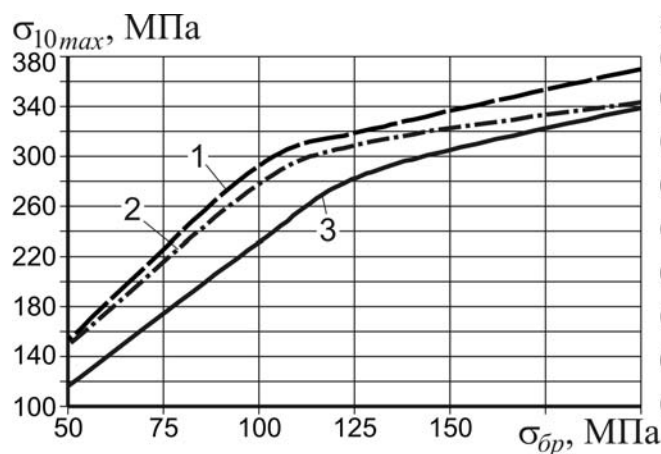


Рисунок 2.22 – Влияние уровня нагружения и величины утолщения на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

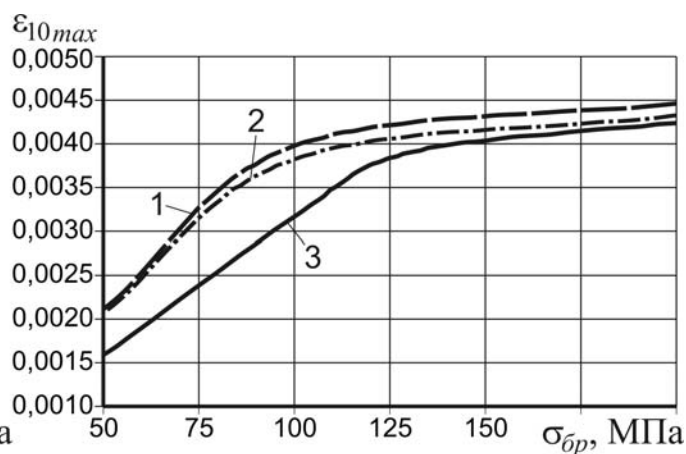


Рисунок 2.23 – Влияние уровня нагружения и величины утолщения на изменение максимальных главных растягивающих упругих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

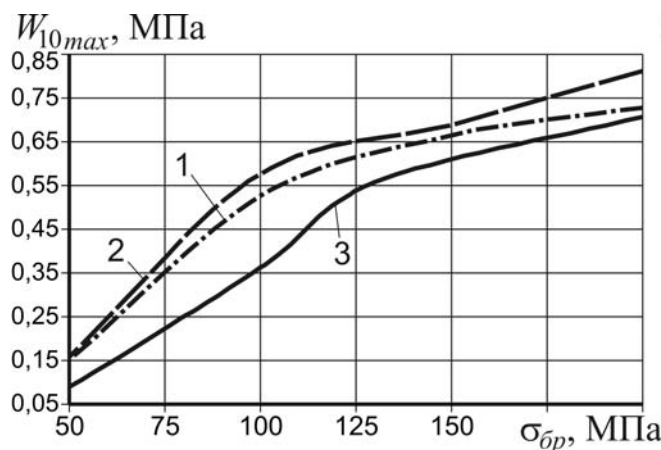


Рисунок 2.24 – Влияние уровня нагружения и величины утолщения на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

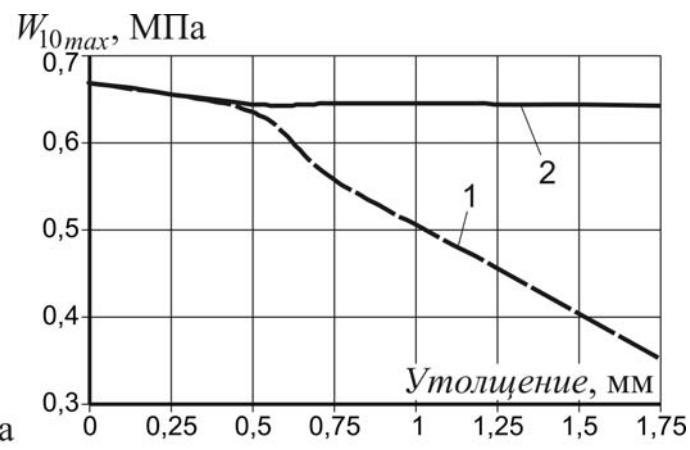


Рисунок 2.25 – Влияние вида и величины утолщения на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием при уровне растягивающих напряжений  $\sigma_{\bar{\sigma}p} = 130$  МПа

На рисунке 2.25 приняты следующие обозначения полосы: 1 – полоса с отверстием с двухсторонним утолщением, 2 – односторонним утолщением.

В результате проведенных исследований:

1. Показано, что для полосы ( $\delta = 5$  мм) с отверстием  $\varnothing 8$  мм в диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 100 до 200 МПа применение двухстороннего утолщения в зоне отверстия в 1,2 – 1,7 раза способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,1 – 1,7 раза по сравнению с напряжением в полосе с отверстием без усиления. При этом величины максимальных главных растягивающих деформаций и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла уменьшаются в 1,02 – 1,67 раза и 1,2 – 2,8 раза соответственно.

2. Расчетным путем показана эффективность двухстороннего утолщения по сравнению с односторонним. Начиная с величины 0,75 мм наблюдается существенное снижение величины максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в 1,2 – 1,9 раза.

### 2.3. ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РАДИАЛЬНОГО НАТЯГА ПРИ ДОРНОВАНИИ И УРОВНЯ НАГРУЖЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОКАЛЬНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОСЫ С ОТВЕРСТИЕМ

Целью данного подраздела работы является исследование влияния величины радиального натяга при дорновании и уровня нагружения при растяжении на характеристики локального НДС растянутой полосы с отверстием.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ характеристик локального напряженно-деформированного состояния полосы с отверстием;
- выполнить анализ характеристик локального напряженно-деформированного состояния полосы с отверстием после дорнования стенок отверстия;
- определить влияние величины радиального натяга при дорновании и уровня нагружения на характеристики локального НДС полосы с отверстием.

Геометрические размеры полосы с отверстием, принятые для анализа, показаны на рисунке 2.26, геометрические размеры дорна – на рисунке 2.27.

Толщина полосы – 5 мм. Материал полосы – алюминиевый сплав 1163.

В процессе анализа исследовали следующие значения радиального натяга при дорновании: 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0%. Величина растягивающих напряжений в сечении брутто дискретно принимали равной 0, 50, 100, 130, 150 и 200 МПа.

С учетом геометрической симметрии модели и характер нагружения при моделировании рассмотрена 1/4 конструкции с заданием соответствующих условий симметрии. Дорн моделировали как абсолютно жесткое тело.

Расчетная схема полосы с отверстием показана на рисунке 2.28.

В качестве параметров, характеризующих локальное НДС полосы с отверстием, рассмотрены следующие: максимальные главные растягивающие напряжения эквивалентного отнулевого цикла ( $\sigma_{1max0}$ ), упругая составляющая максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла ( $\epsilon_{1max0}$ ) и удельная энергия деформирования ( $w_{1max0}$ ).

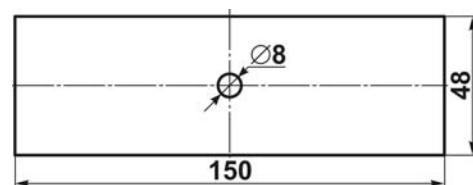


Рисунок 2.26 – Геометрические характеристики полосы с отверстием из материала 1163 л5

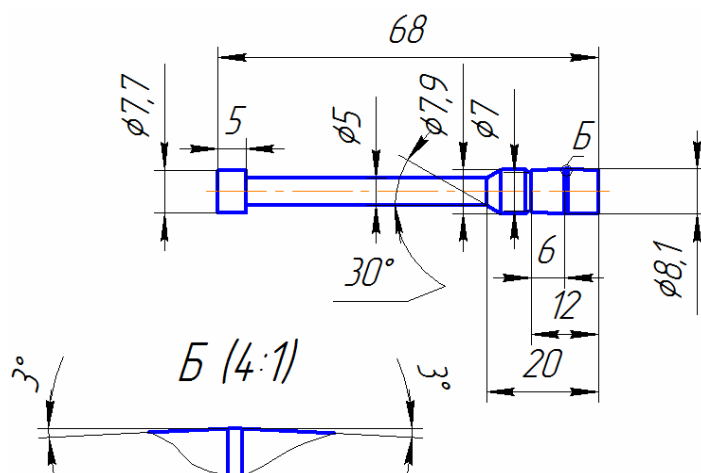


Рисунок 2.27 – Геометрические характеристики дорна

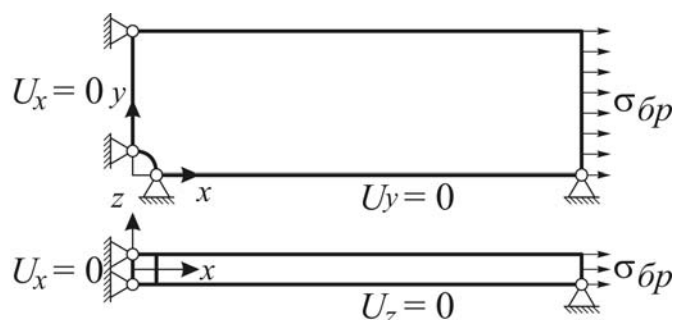


Рисунок 2.28 – Расчетная схема полосы с отверстием

Перечисленные выше параметры определены численным методом 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) [86]. Контактное взаимодействие дорна со стенкой отверстия описано общей моделью контакта типа «поверхность–поверхность» с применением кулоновской модели трения [89].

Значение коэффициента трения скольжения для пары «сталь-алюминий» принято равным 0,6 [85].

Особенностью решаемой задачи является возникновение локальных пластических деформаций стенок отверстия в результате применения поверхностного деформирования стенки отверстия. Эта особенность учтена при решении задачи путем применения полилинейной упругопластической модели поведения материала пластины с кинематическим законом упрочнения, описывающей эволюцию поверхности текучести в зависимости от накопленной пластической деформации в материале [85].

Конечно-элементные модели пластины и дорна показаны на рисунке 2.29.

В ходе моделирования процесса дорнования выявлены следующие особенности:

- при дорновании наблюдается смещение материала в зоне контакта дорна со стенкой отверстия в осевом направлении, в результате чего на свободных поверхностях пластины образуются наплывы материала. Это особенно отчетливо выражено при больших значениях радиального натяга (см. рисунок 2.30);
- характер распределения радиальных перемещений стенок отверстий по высоте является неравномерным (см. рисунок 2.31).

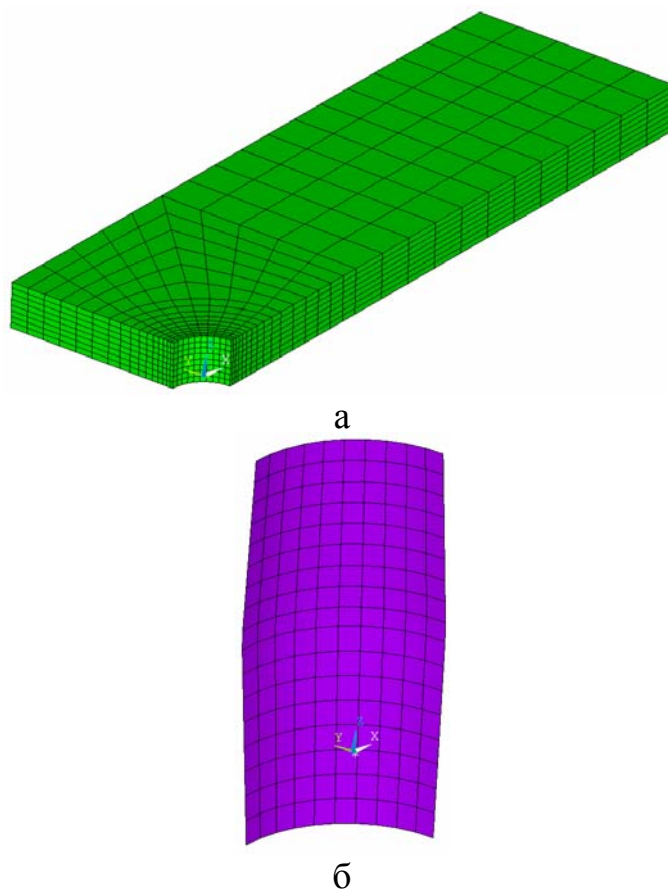


Рисунок 2.29 – Конечно-элементные модели: а – пластины; б – дорна

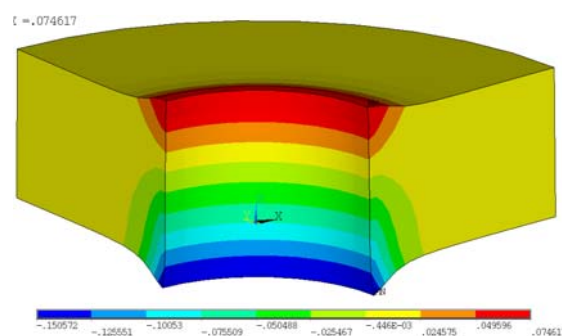


Рисунок 2.30 – Характер распределения осевых перемещений ( $U_z$ , мм) в пластине в зоне отверстия после дорнования (натяг – 3%)

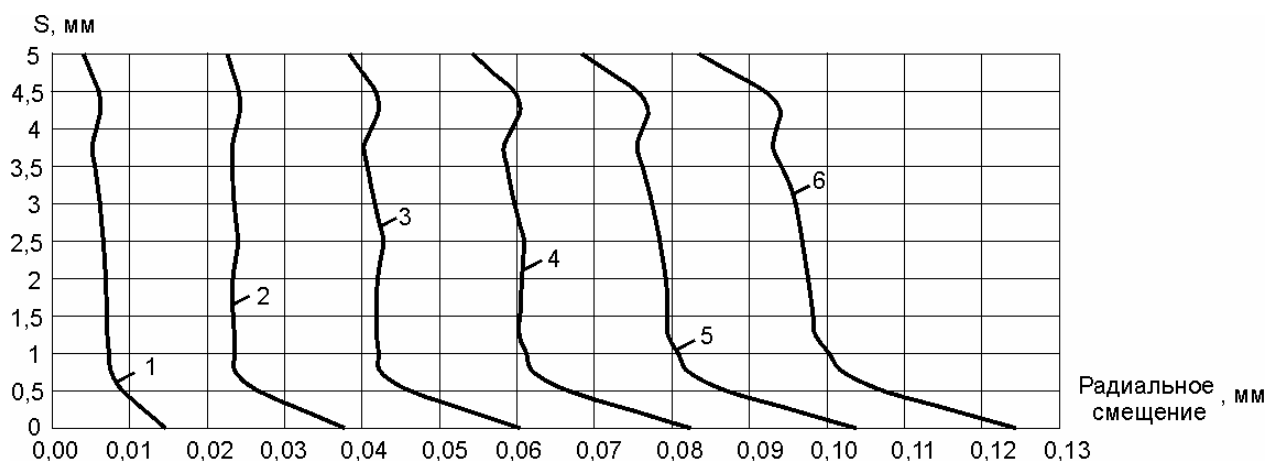


Рисунок 2.31 – Распределение радиальных перемещений ( $U_r$ , мм) в пластине в зоне отверстия после дорнования: 1 – натяг 0,5%, 2 – натяг 1,0%, 3 – натяг 1,5%, 4 – натяг 2,0%, 5 – натяг 2,5%, 6 – натяг 3,0%

При дорновании отверстия в материале пластины в зоне отверстия возникают остаточные сжимающие напряжения, величина которых превышает предел текучести материала. Глубина залегания данных напряжений зависит от величины радиального натяга при дорновании. Наличие остаточных сжимающих напряжений приводит к изменению цикла локальных напряжений в зоне отверстия, который является асимметричным, с определенным значением коэффициента асимметрии цикла. При анализе полученный асимметричный цикл приведен к эквивалентному отнулевому, с параметрами напряжений, определенными по формуле Одингга [84].

В результате решения поставленной задачи получены кривые распределения параметров НДС в сечении по оси отверстия, позволяющие оценить влияние величины радиального натяга при дорновании и уровня нагружения на характеристики локального НДС, а также спрогнозировать изменение долговечности, выбрать величину радиального натяга, обеспечивающего повышение долговечности.

Схема обозначения путей, вдоль которых анализировались данные параметры, изображена на рисунке 2.32.

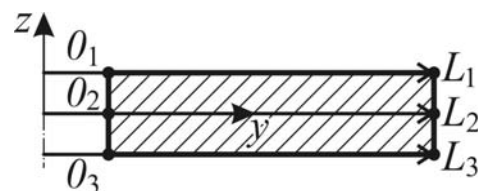


Рисунок 2.32 – Схема обозначения путей  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$

Результаты исследования влияния уровня напряжений в сечении брутто на изменение характеристик локального НДС полосы с отверстием показана на рисунках 2.33 – 2.38.

На рисунках 2.33 – 2.38 приняты следующие обозначения: 1 –  $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 50$  МПа, 2 –  $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 100$  МПа, 3 –  $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 130$  МПа, 4 –  $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 150$  МПа, 5 –  $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 200$  МПа.

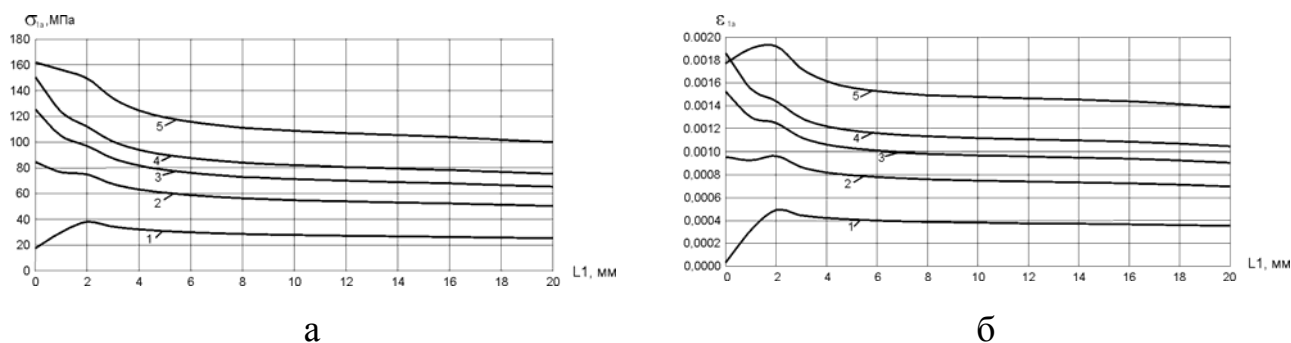


Рисунок 2.33 – Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути  $L1$  в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 0,5% при разных значениях  $\sigma_{бр}$

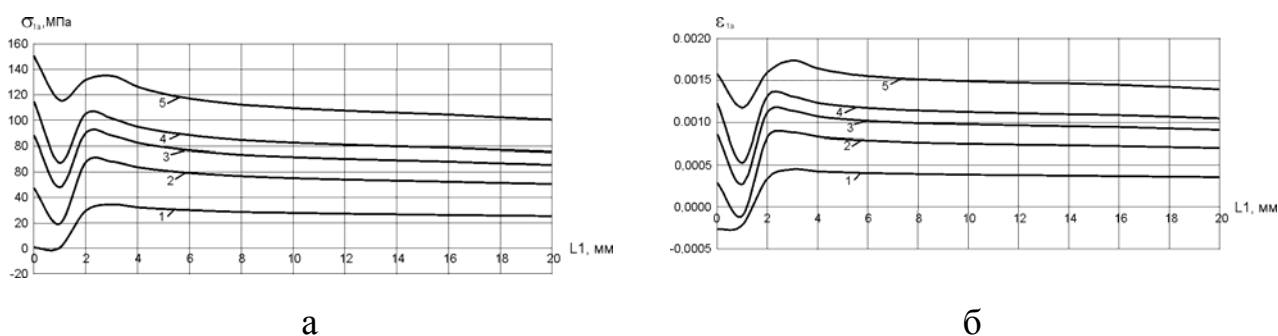


Рисунок 2.34 – Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути  $L1$  в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 1,0% при разных значениях  $\sigma_{бр}$

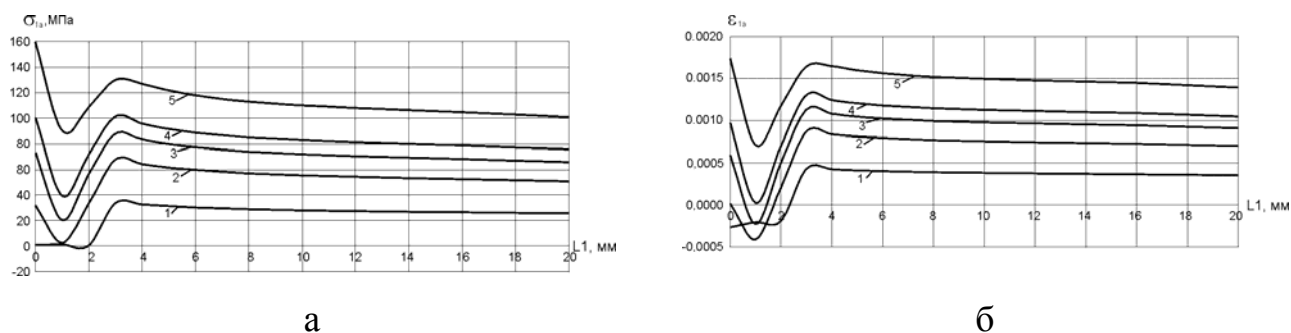


Рисунок 2.35 – Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути  $L1$  в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 1,5% при разных значениях  $\sigma_{бр}$

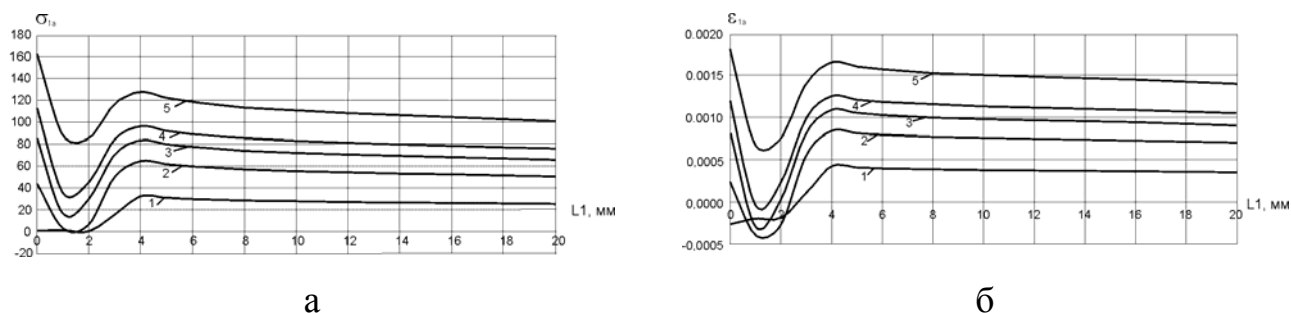


Рисунок 2.36 – Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути  $L1$  в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 2,0% при разных значениях  $\sigma_{бр}$

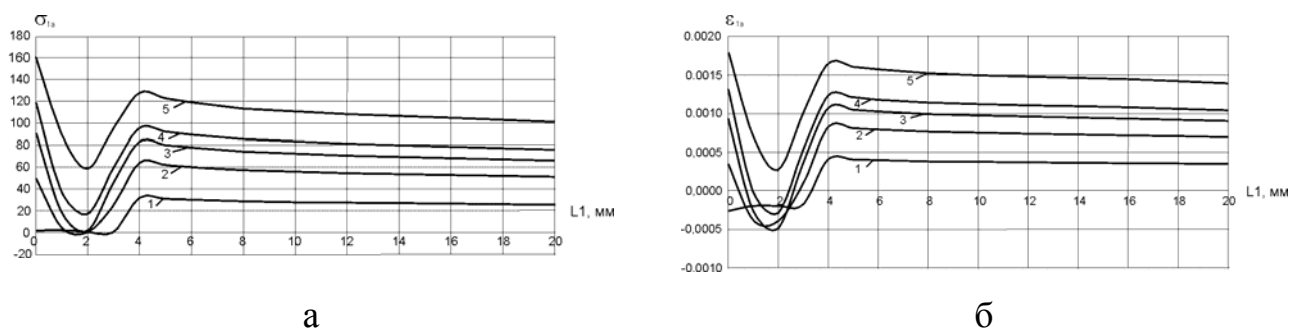


Рисунок 2.37 – Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути L1 в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 2,5% при разных значениях  $\sigma_{бр}$

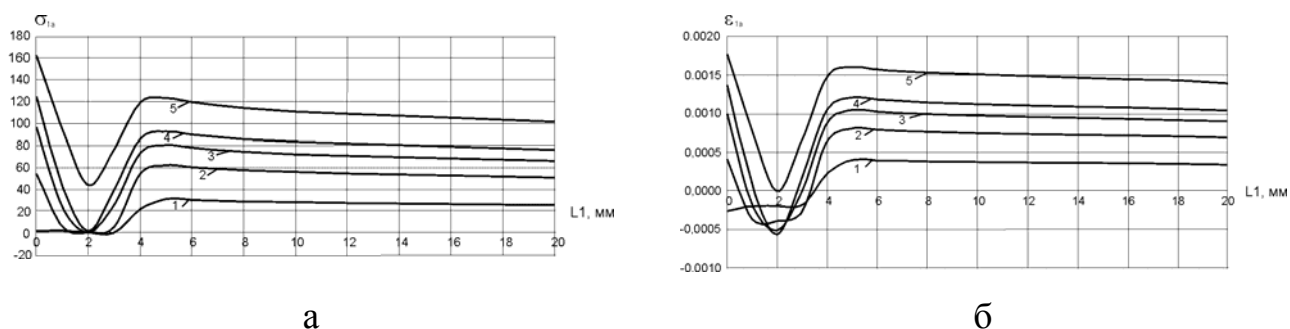


Рисунок 2.38 – Характер распределения амплитуды главных растягивающих напряжений (а) и деформаций (б) по пути L1 в сечении по оси отверстия после дорнования с натягом 3,0% при разных значениях  $\sigma_{бр}$

Результаты исследования влияния величины радиального натяга при дорновании на изменение характеристик локального НДС полосы с отверстием показаны на рисунках 2.39 – 2.47, где приняты следующие обозначения: 1 – натяг 0,0%, 2 – натяг 0,5%, 3 – натяг 1,0%, 4 – натяг 1,5%, 5 – натяг 2,0%, 6 – натяг 2,5%, 7 – натяг 3,0%.

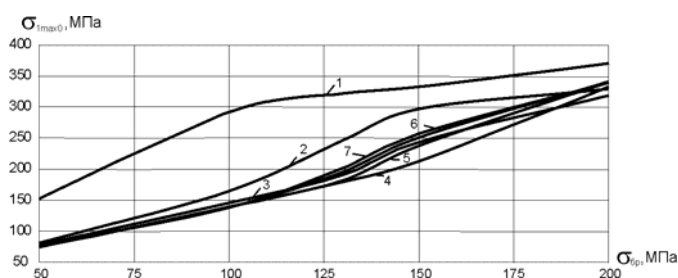


Рисунок 2.39 – Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L1)

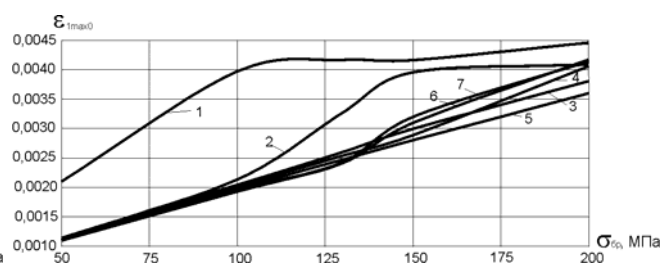


Рисунок 2.40 – Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L1)

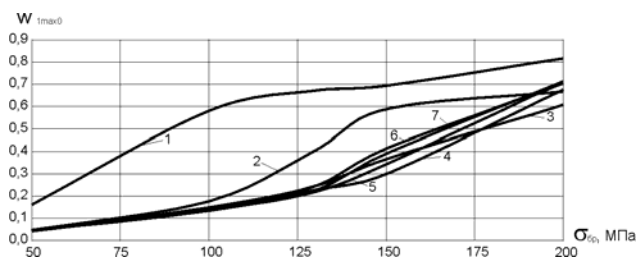


Рисунок 2.41 – Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L1)

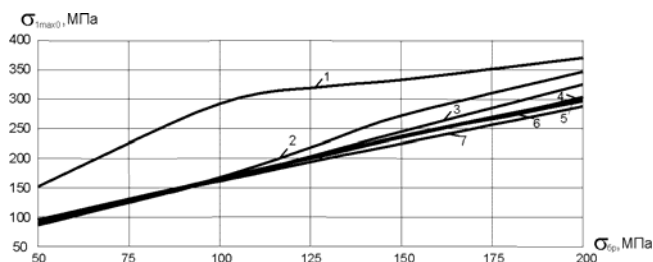


Рисунок 2.42 – Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L2)

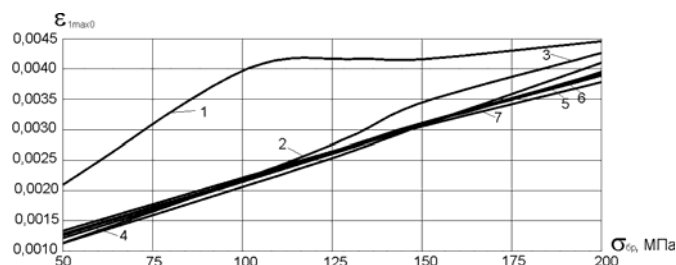


Рисунок 2.43 – Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L2)

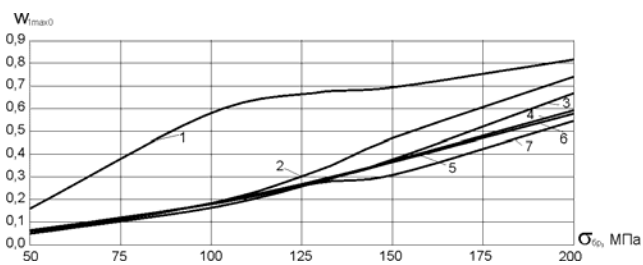


Рисунок 2.44 – Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L2)

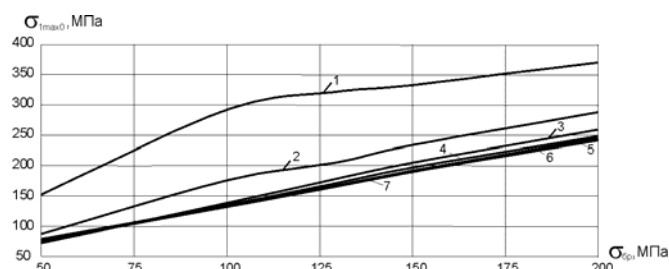


Рисунок 2.45 – Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L3)

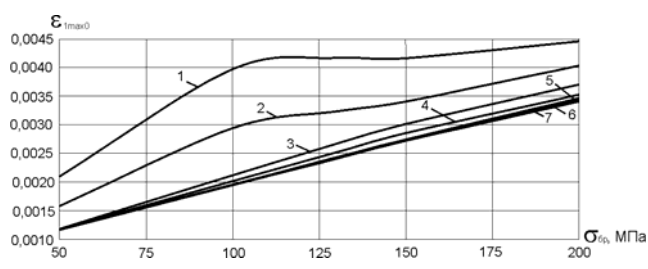


Рисунок 2.46 – Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L3)



На рисунках 2.48 – 2.50 показаны результаты исследования влияния радиального натяга на изменения максимальных характеристик локального НДС в полосе с отверстием в сечении его оси отверстия и их изменении по толщине полосы. При этом приняты следующие обозначения: 1 – путь L1, 2 – путь L2, 3 – путь L3.

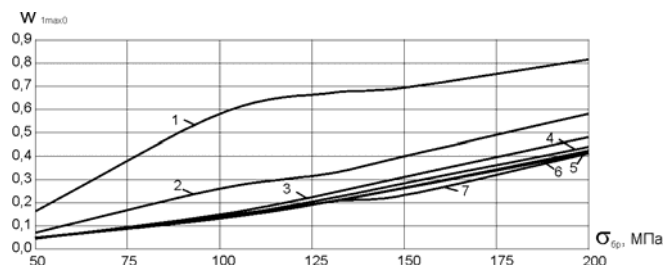


Рисунок 2.47 – Влияние уровня нагружения и величины радиального натяга при дорновании на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием (путь L3)

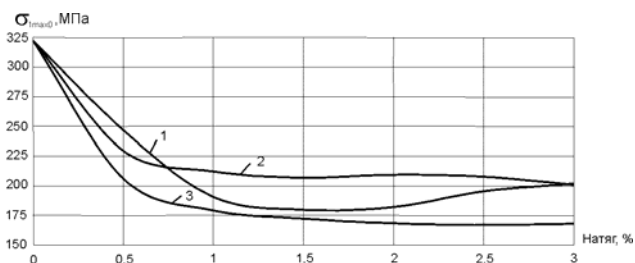


Рисунок 2.48 – Влияние радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

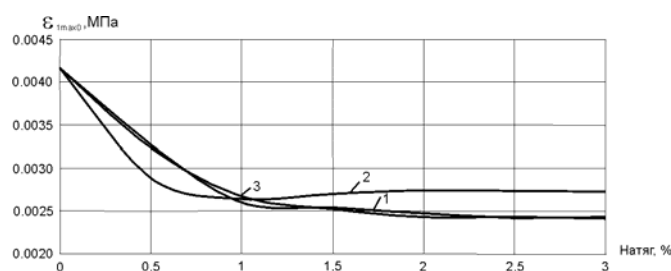


Рисунок 2.49 – Влияние радиального натяга при дорновании на изменение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

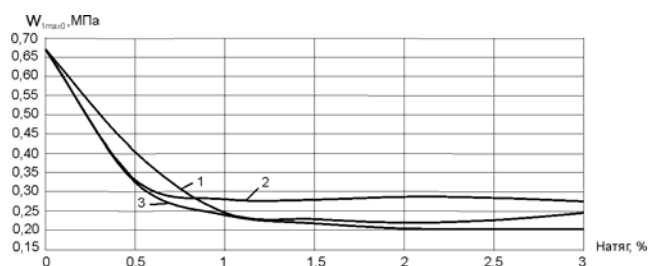


Рисунок 2.50 – Влияние радиального натяга на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием

Анализ полученных результатов показывает, что в диапазоне радиальных натягов от 1 до 2 % технологические отклонения величины радиального натяга не оказывают существенного влияния на изменение максимальных главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла. Применение натягов свыше 2,5% нецелесообразно, так как это связано с существенным увеличением усилия дорнования.

В результате проведенных исследований установлено:

1. При дорновании стенок отверстия в материале пластины в зоне отверстия

возникают остаточные сжимающие напряжения, величина которых превышает предел текучести материала. Наличие остаточных сжимающих напряжений приводит к изменению цикла локальных напряжений в зоне отверстия. В зависимости от величины радиального натяга при дорновании происходит смещение зоны максимальной амплитуды главных растягивающих напряжений и деформаций от стенки отверстия. Величина данного смещения составляет от 2 до 4,5 мм.

2. При дорновании образуются наплывы материала на свободной поверхности пластины. Максимальная величина наплыва составляет 0,15 мм при натяге 3%. Характер распределения радиальных перемещений стенок отверстий по высоте является неравномерным, причем степень неравномерности увеличивается с увеличением радиального натяга. Максимальная величина неровности стенки отверстия составляет 0,04 мм при натяге 3%.

3. Показано, что для пластины с отверстием в диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 100 до 200 МПа применение дорнования стенок отверстия с радиальным натягом от 1 до 3% способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,1 – 2,2 раза по сравнению с напряжением в полосе с отверстием. При этом величины максимальных главных растягивающих деформаций и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла уменьшаются в 1,2 – 2 раза и 1,2 – 4,5 раза соответственно

4. Установлено, что при фиксированном значении напряжений в сечении брутто, применение радиального натяга свыше 1% не приводит к существенному изменению максимальных главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла.

#### 2.4. ВЛИЯНИЕ БАРЬЕРНОГО ОБЖАТИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОКАЛЬНОГО НДС ПОЛОСЫ С ОТВЕРСТИЕМ ПРИ ЕЕ РАСТЯЖЕНИИ

Результаты испытаний, подтверждающие эффективность применения барьерного обжатия как метода повышения усталостной долговечности силовых элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий, приведены в работах Б. И. Олькина [66], В. П. Рычика [28], Е. А. Шахатуни [83] и др.

В данном подразделе работе приведено решение задачи о растяжении полосы

с отверстием. В качестве метода повышения усталостной долговечности рассмотрено барьерное обжатие. Исследовано влияние положения сегментной обжимки на характеристики локального НДС полосы с отверстием.

Целью данного подраздела работы является разработка метода определения характеристик локального НДС полосы с отверстием при барьерном обжатии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ характеристик напряженно-деформированного состояния полосы с отверстием при барьерном обжатии;
- оценить влияние радиуса, на котором расположена обжимка, при обжатии и уровня нагружения на характеристики локального НДС.

Геометрические размеры полосы с отверстием показаны на рисунке 2.26, обжимки – на рисунке 2.51.

Толщина полосы – 5 мм.

Материал полосы – алюминиевый сплав 1163.

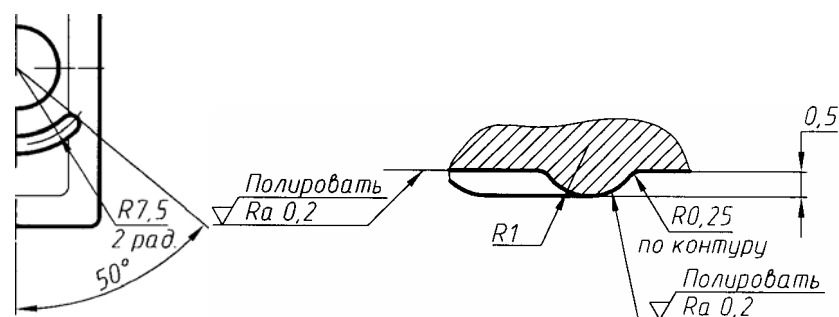


Рисунок 2.51 – Фрагмент чертежа обжимки для выштамповки сегментных лунок

При расчете рассматривали следующие значения радиуса: 6, 7 и 7,5 мм. Величина растягивающих напряжений в сечении брутто составляет 0, 50, 100, 130, 150 и 200 МПа.

С учетом геометрической симметрии модели и характера нагружения при моделировании рассмотрена 1/8 конструкции с заданием соответствующих условий симметрии. Обжимку моделировали как абсолютно жесткое тело.

Расчетная схема полосы с отверстием показана на рисунке 2.52.

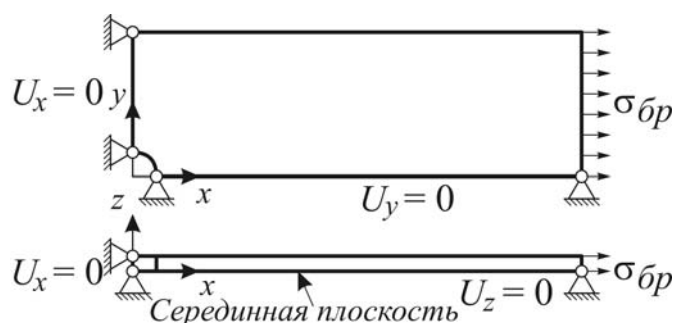


Рисунок 2.52 – Расчетная схема полосы с отверстием

В качестве параметров, характеризующих локальное НДС полосы с отверстием, рассмотрены следующие: максимальные главные растягивающие напряжения эквивалентного отнулевого цикла ( $\sigma_{1max0}$ ), упругая составляющая макси-

мальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла ( $\epsilon_{1max0}$ ) и удельная энергия деформирования ( $w_{1max0}$ ).

Эти параметры определены численным методом с помощью метода конечных элементов, реализованного в системе ANSYS.

Для аппроксимации расчетной модели полосы выбраны 20-узловые элементы твердого деформируемого тела, обладающие тремя степенями свободы в каждом из узлов (линейные перемещения вдоль осей X, Y, Z) [86]. Контактное взаимодействие дорна со стенкой отверстия описано общей моделью контакта типа «поверхность–поверхность» с применением кулоновской модели трения [89]. Значение коэффициента трения скольжения для пары «сталь-алюминий» принято равным 0,6 [85].

Для описания поведения материала полосы применена модель, рассмотренная в подразделе 2.3 [61].

Конечно-элементные модели полосы и обжимки показаны на рисунке 2.53.

Решена задача контактного взаимодействия полосы с отверстием и обжимки, в результате получен характер распределения осевых перемещений (рисунок 2.54) и эквивалентных напряжений по Мизесу (рисунок 2.55) в зоне обжатия.

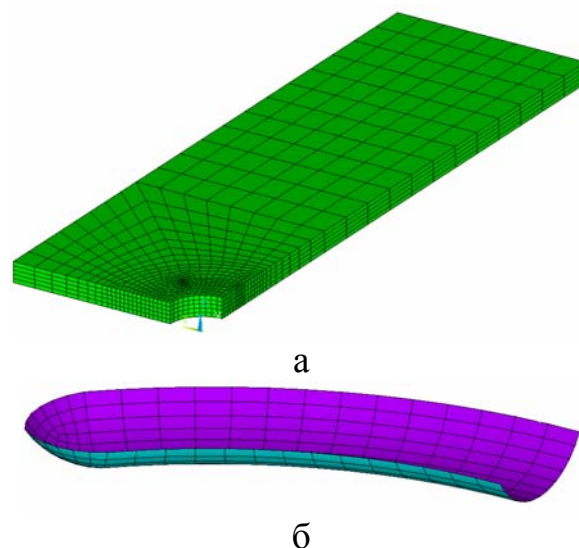


Рисунок 2.53 – Конечно-элементные модели: а – полосы; б – обжимки

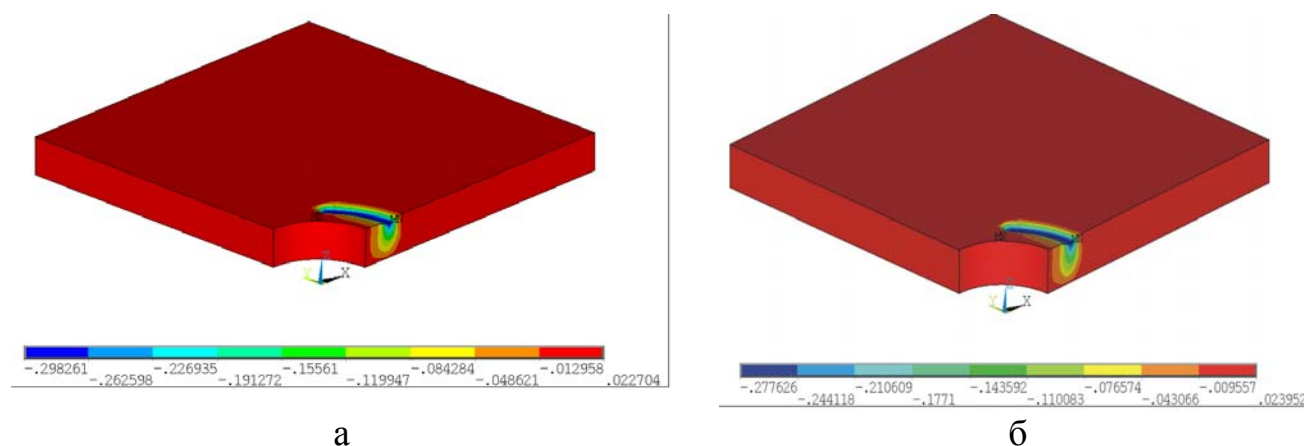


Рисунок 2.54 – Характер распределения осевых перемещений ( $U_z$ , мм) в полосе в зоне отверстия: а – после обжатия на глубину 0,3 мм; б – после отвода обжимки

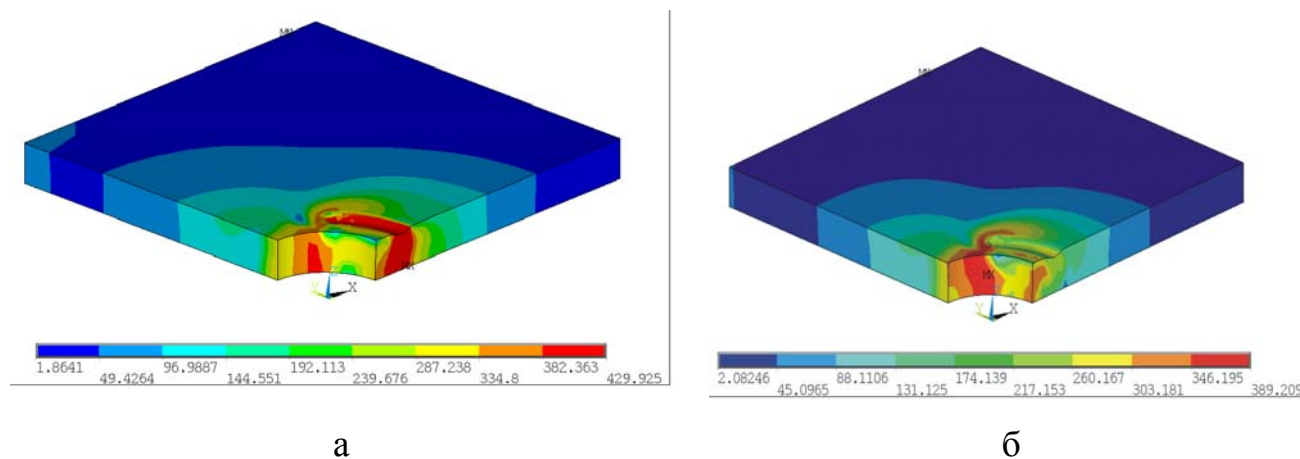


Рисунок 2.55 – Характер распределения эквивалентных напряжений по Мизесу ( $\sigma_{экв}$ , МПа) в полосе в зоне отверстия: а – после обжатия на глубину 0,3 мм; б – после отвода обжимки

Следует отметить, что после отвода обжимок в результате упругой разгрузки материала глубина лунки уменьшилась до 0,277 мм. При этом в материале полосы, расположенном в зоне отверстия, возникает область остаточных напряжений, величина которых превышает предел текучести (см. рисунок 2.56).

Результаты исследования влияния уровня напряжений в сечении брутто на изменение характеристик локального НДС полосы с отверстием показаны на рисунках 2.57 – 2.59, где приняты следующие обозначения: 1 – полоса с отверстием, 2 –  $R = 6$  мм, 3 –  $R = 7$  мм, 4 –  $R = 7,5$  мм.

Анализ полученного результата позволяет сделать вывод о том, что изменения относительного радиуса  $R/d$  в диапазоне от 1,5 ... 1,875 не оказывают существенного влияния на изменение максимальных главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла.

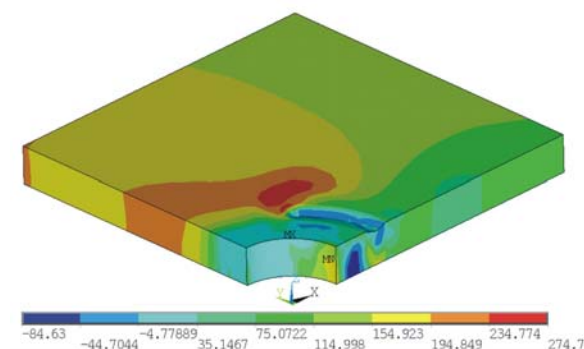
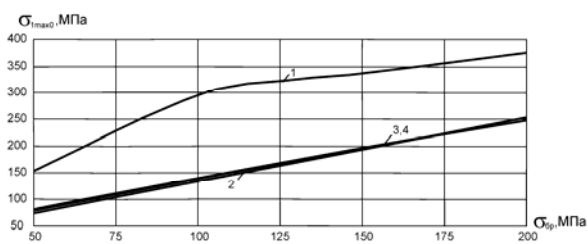
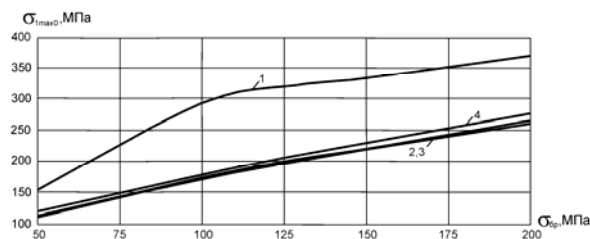


Рисунок 2.56 – Характер распределения главных растягивающих напряжений ( $\sigma_1$ , МПа) в полосе в зоне отверстия после обжатия на глубину 0,3 мм и последующего растяжения  $\sigma_{бр} = 130$  МПа

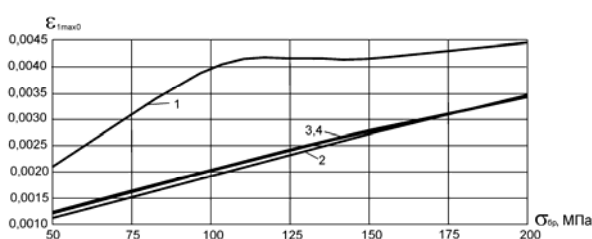


а

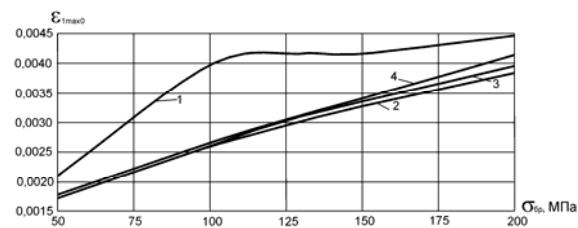


б

Рисунок 2.57 – Влияние уровня нагружения и радиуса на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием: а – в сечении по оси отверстия; б – в зоне обжатия

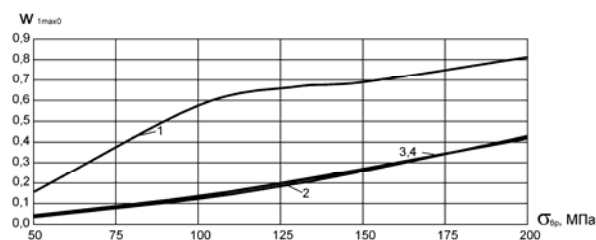


а

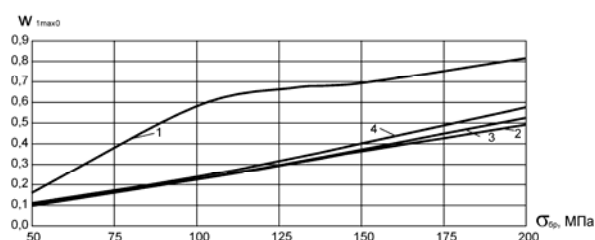


б

Рисунок 2.58 – Влияние уровня нагружения и радиуса на изменение максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием: а – в сечении по оси отверстия; б – в зоне обжатия



а



б

Рисунок 2.59 – Влияние уровня нагружения и радиуса на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе с отверстием: а – в сечении по оси отверстия; б – в зоне обжатия

В результате проведенных исследований установлено:

1. При барьерном обжатии в материале полосы в зоне отверстия возникают остаточные сжимающие напряжения, величина которых превышает предел текучести материала. Наличие остаточных сжимающих напряжений приводит к изменению цикла локальных напряжений в зоне отверстия и разгрузке данной зоны. Зона максимальной амплитуды главных растягивающих напряжений и деформаций смещается от стенки отверстия на величину 4...5 мм.

2. Лунки, образующиеся на поверхности полосы в результате обжатия, являются концентраторами напряжений. В диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 100 до 200 МПа значение коэффициента концентрации напряжений изменяется в диапазоне от 1,45...2,57.

3. В диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 100 до 200 МПа применение сегментного обжатия на глубину 0,3 мм способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,5 – 2,2 раза в сечении по оси отверстия и в 1,4 – 1,7 раза в зоне обжатия по отношению к напряжениям для полосы с отверстием. При этом величины максимальных главных растягивающих деформаций и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла уменьшаются в 1,3 – 2 раза и 1,95 – 4,1 раза в сечении по оси отверстия и в 1,2 – 1,54 раза и в 1,67 – 2,6 раза в зоне обжатия соответственно.

#### 2.5. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОКАЛЬНОГО НДС ПЛАСТИНЫ С ОТВЕРСТИЕМ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ЕЕ СДВИГОМ

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 (рисунок 2.60). Для прогнозирования усталостной долговечности в зоне отверстий необходимо определить характеристики локального НДС в этих конструктивных элементах.

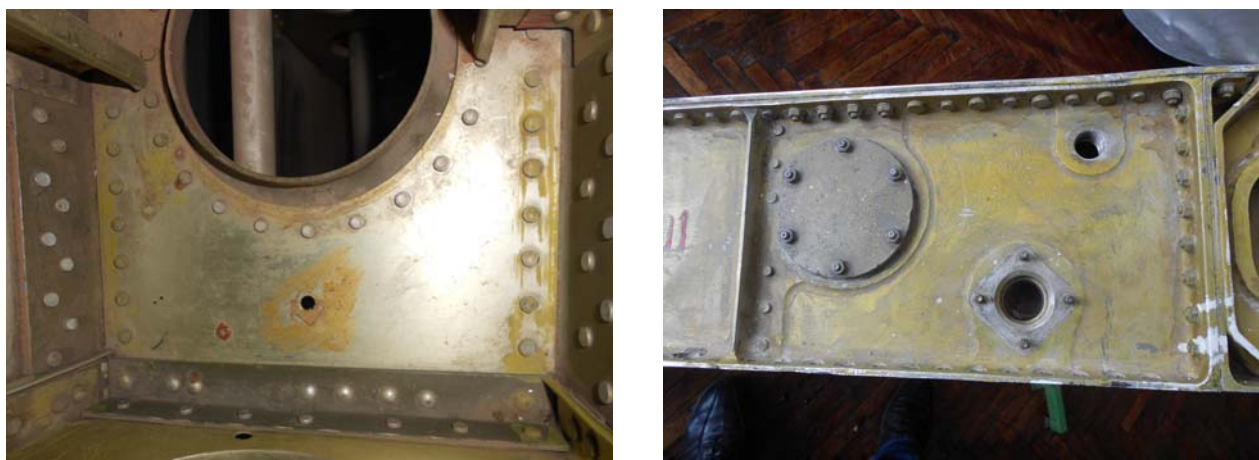


Рисунок 2.60 – Функциональные отверстия в конструктивных элементах планера самолета

Целью данного подраздела 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 (рисунок 2.61).

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 рисунке 2.62. При нагружении пластины с отверстием сдвигающими усилиями в ней реализуется двухосное напряженное состояние с величиной касательных напряжений  $\tau_{бр} = 50, 100, 130, 150$  и  $200$  МПа.

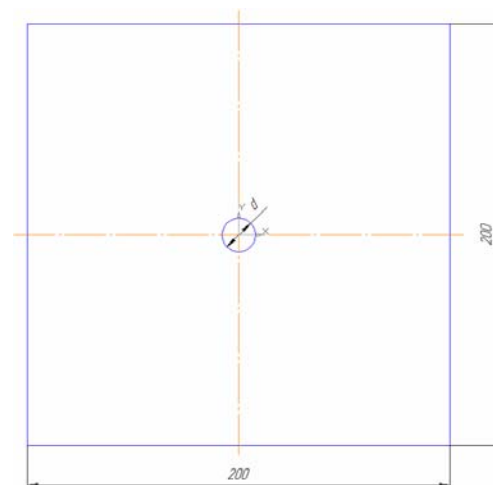


Рисунок 2.61 – Геометрические параметры пластины с отверстием

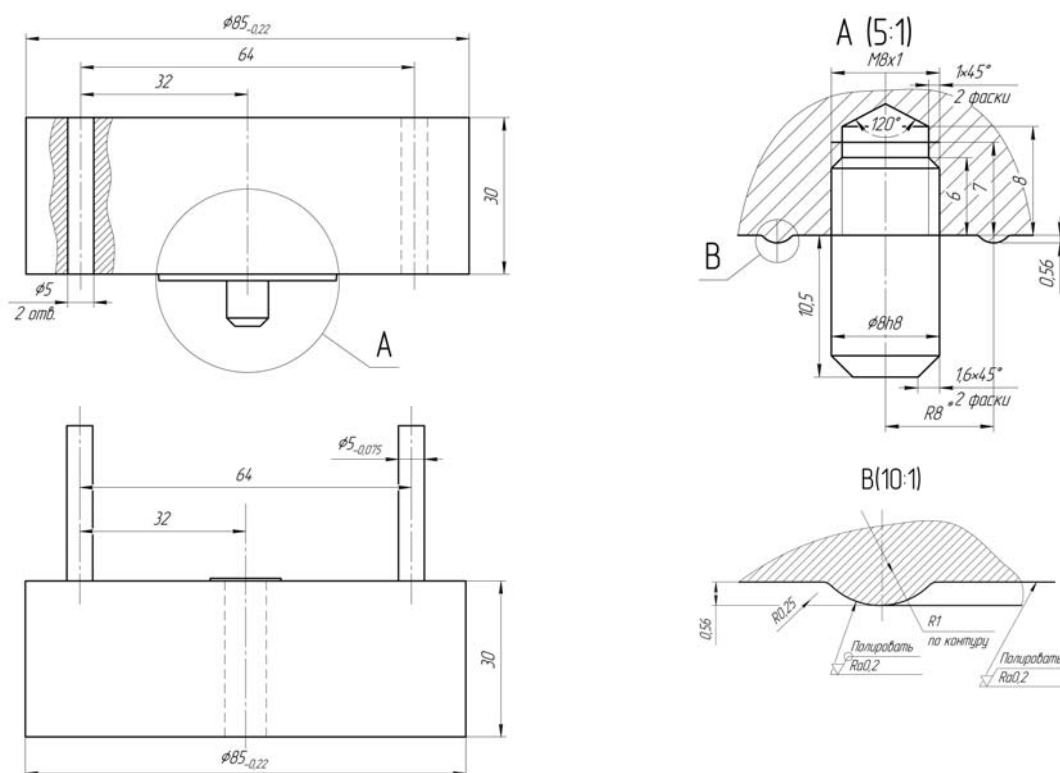


Рисунок 2.62 – Геометрические параметры кольцевой обжимки



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 [8]. Модель поведения материала – полилинейная упругопластическая с кинематическим упрочнением [87]. 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.

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 требуемого 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  $\pm 45^\circ$  (рисунок 2.63). В качестве параметров, характеризующих локальное НДС полосы с отверстием, рассмотрены следующие: максимальные главные растягивающие напряжения эквивалентного отнулевого цикла ( $\sigma_{1max0}$ ), упругая составляющая максимальных главных растягивающих деформаций эквивалентного отнулевого цикла ( $\epsilon_{1max0}$ ) 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 рисунке 2.64.

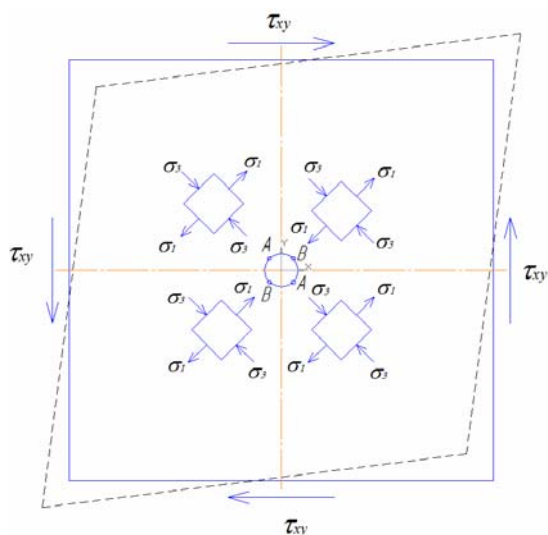


Рисунок 2.63 – Пластина с отверстием в условиях чистого сдвига

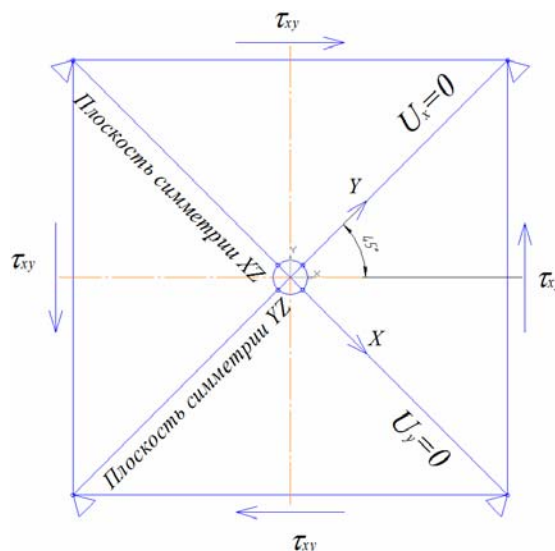
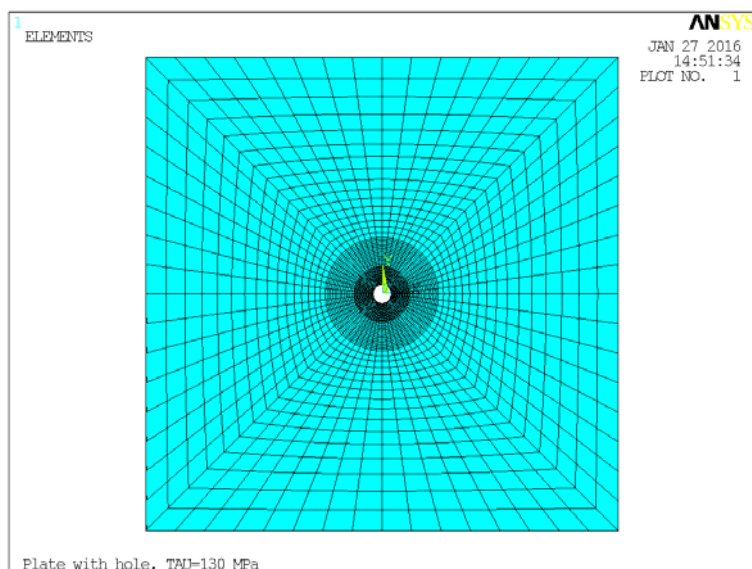


Рисунок 2.64 – Расчетная схема пластины с отверстием в условиях чистого сдвига

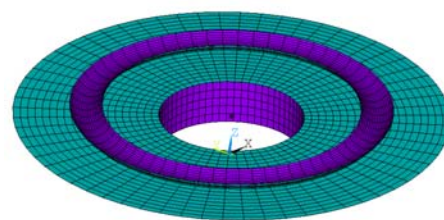
Исследование распределения напряжений и деформаций в зоне отверстия выполнено с помощью метода конечных элементов, реализованного в системе ANSYS. Для аппроксимации расчетной модели пластины выбраны восьмиузловые элементы твердого деформируемого тела, обладающие тремя степенями сво-

боды 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 [86].

Контактное взаимодействие обжимки с пластиной описано общей моделью контакта типа «поверхность–поверхность» с применением кулоновской модели трения. Конечно-элементные модели пластины с отверстием и кольцевой обжимки показаны на рисунке 2.65. Конечно-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.



а



б

Рисунок 2.65 – Конечно-элементная модель пластины с отверстием (а) и кольцевой обжимки (б)

В процессе моделирования реализовано нагружение пластины с отверстием сдвигающими напряжениями. На рисунке 2.66 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  $\sigma_1$  и сжимающее напряжение  $\sigma_3$ . На рисунке 2.67 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 оваллизация отверстия.

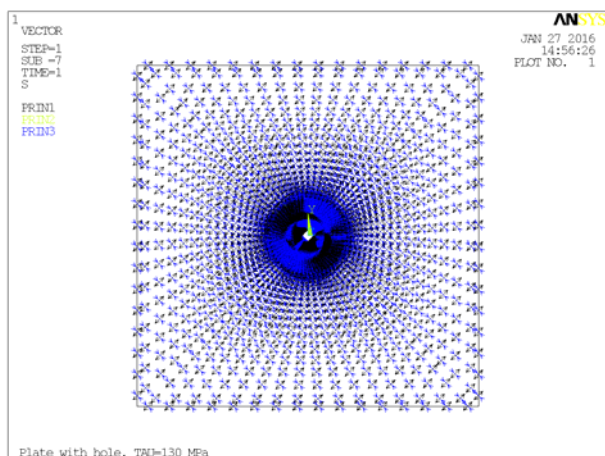


Рисунок 2.66 – Ориентация векторов главных напряжений в пластине с отверстием при чистом сдвиге

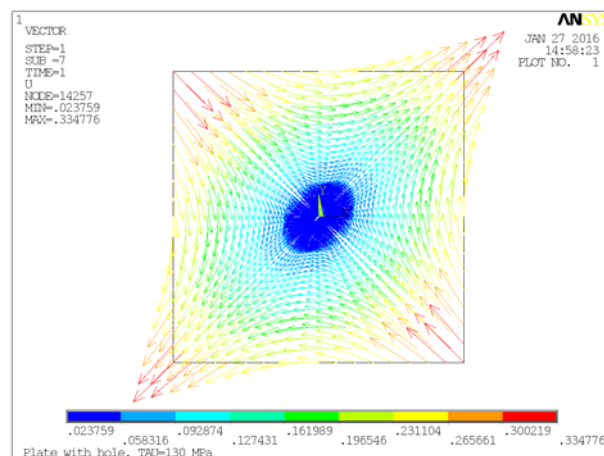


Рисунок 2.67 – Поле распределения векторов суммарных перемещений в пластине с отверстием при чистом сдвиге ( $\tau_{\text{ср}}=130$  МПа)

Проанализировано распределение главных растягивающих  $\sigma_1$  и сжимающих  $\sigma_3$  напряжений в зоне отверстия. Из рисунков 2.68 и 2.69 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).

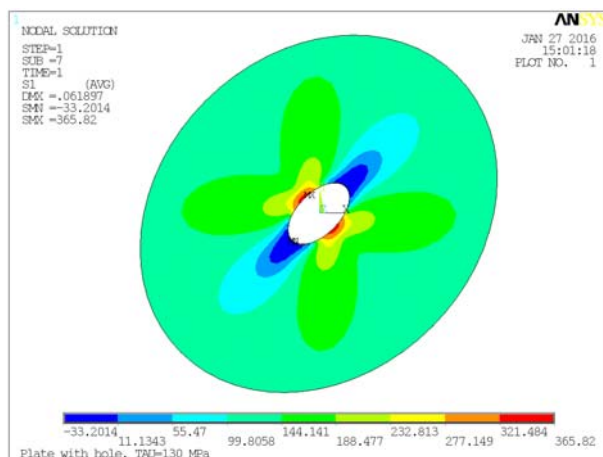


Рисунок 2.68 – Поле распределения главных растягивающих напряжений  $\sigma_1$  в зоне отверстия при чистом сдвиге ( $\tau_{\text{ср}} = 130$  МПа)

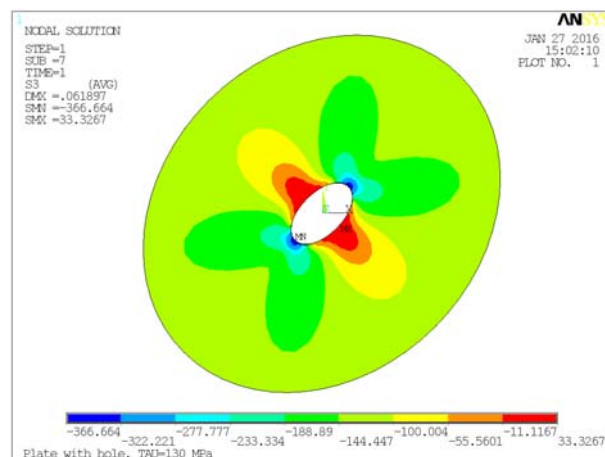


Рисунок 2.69 – Поле распределения главных сжимающих напряжений  $\sigma_3$  в зоне отверстия при чистом сдвиге ( $\tau_{\text{ср}} = 130$  МПа)

Исследовано влияние относительного параметра ( $B/d$ ) на изменение теоретического коэффициента концентрации (рисунок 2.70) напряжений  $K_t$ :  $K_t = \sigma_{max} / \sigma_{ном}$ , где  $\sigma_{max}$  – максимальные локальные напряжения в сечении (А-А) по оси концентратора;  $\sigma_{ном}$  – номинальные напряжения.

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

Исследовано распределение главных растягивающих напряжений по толщине пластины

в сечении по оси отверстия, проходящем через точку А (рисунок 2.71). Наблюдается неравномерность распределения главных растягивающих напряжений по толщине с максимумом, расположенным в сечении  $z = 0$  мм (середина пластины). На рисунке 2.72 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.

На рисунках 2.73 – 2.75 показаны результаты исследования влияния уровня нагружения и диаметра отверстия (на рисунках приняты следующие обозначения: 1 –  $d_{отв} = 5$  мм; 2 –  $d_{отв} = 8$  мм; 3 –  $d_{отв} = 16$  мм) на изменение максимальных главных растягивающих напряжений, упругих деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием.

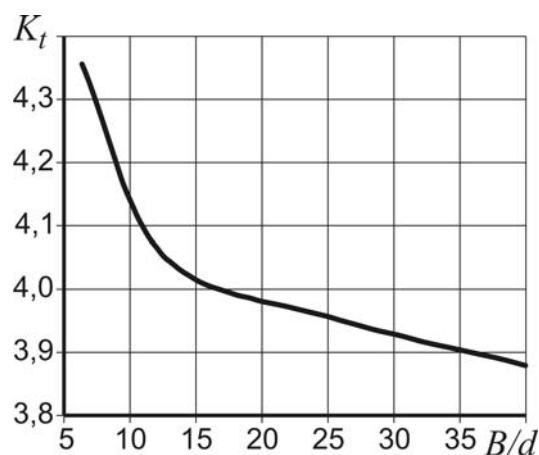


Рисунок 2.70 – Влияние относительного параметра  $B/d$  на теоретический коэффициент концентрации напряжений в пластине с отверстием при чистом сдвиге ( $\tau_{\bar{\sigma}_{pr}} = 50$  МПа)

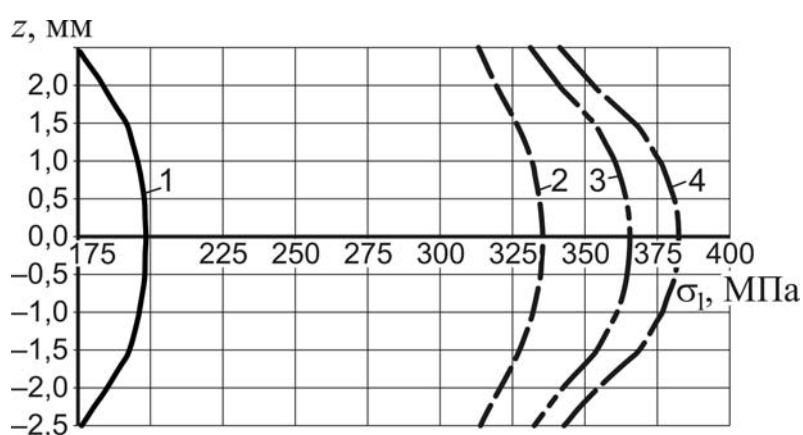


Рисунок 2.71 – Характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине пластины: 1 –  $\sigma_{\bar{\sigma}_{pr}} = 50$  МПа; 2 –  $\sigma_{\bar{\sigma}_{pr}} = 100$  МПа; 3 –  $\sigma_{\bar{\sigma}_{pr}} = 130$  МПа; 4 –  $\sigma_{\bar{\sigma}_{pr}} = 150$  МПа

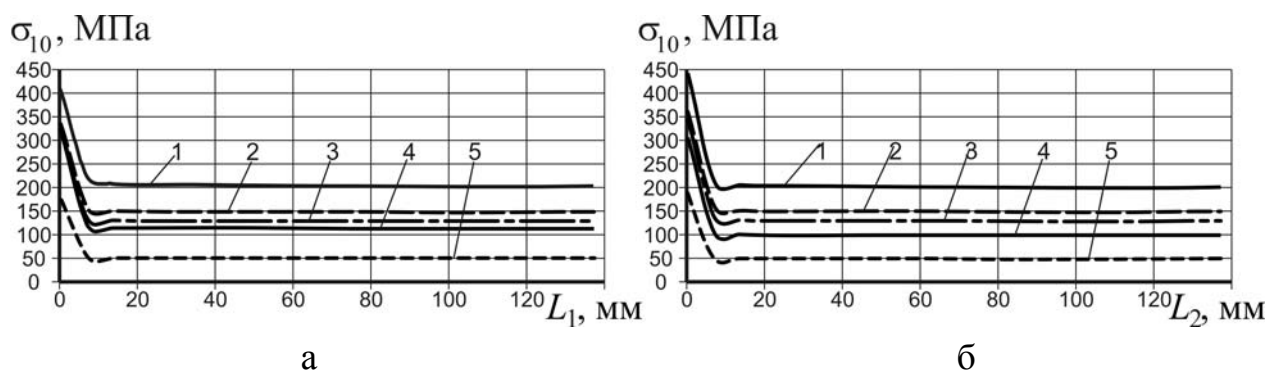


Рисунок 2.72 – Характер распределения главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины  $z = 2,5$  мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины  $z = 0$  мм; 1 –  $\sigma_{\bar{\sigma}p} = 50$  МПа; 2 –  $\sigma_{\bar{\sigma}p} = 100$  МПа; 3 –  $\sigma_{\bar{\sigma}p} = 130$  МПа; 4 –  $\sigma_{\bar{\sigma}p} = 150$  МПа; 5 –  $\sigma_{\bar{\sigma}p} = 200$  МПа

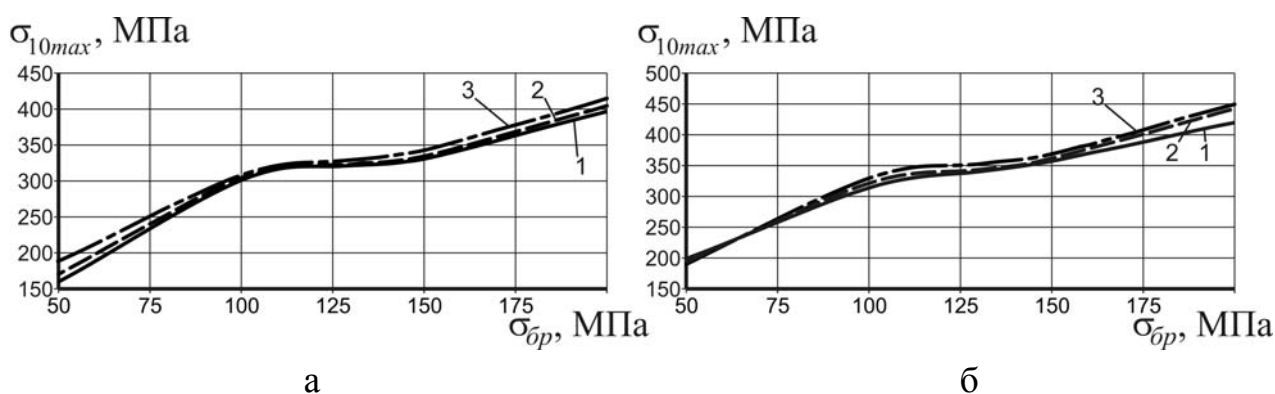


Рисунок 2.73 – Влияние уровня нагружения и диаметра отверстия на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины  $z = 2,5$  мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины  $z = 0$  мм

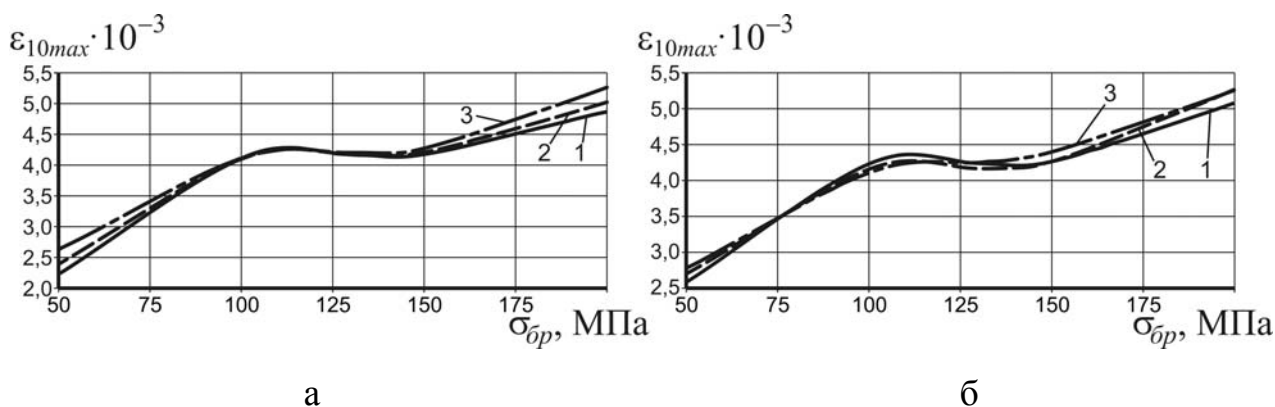


Рисунок 2.74 – Влияние уровня нагружения и диаметра отверстия на изменение максимальных главных растягивающих упругих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины  $z = 2,5$  мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины  $z = 0$  мм

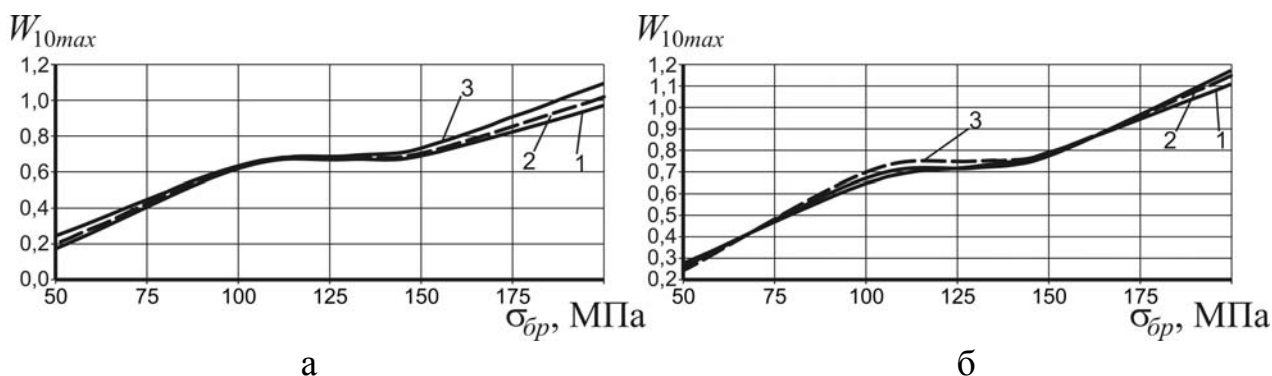


Рисунок 2.75 – Влияние уровня нагружения и диаметра отверстия на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины  $z = 2,5$  мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной 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 (рисунок 2.76).

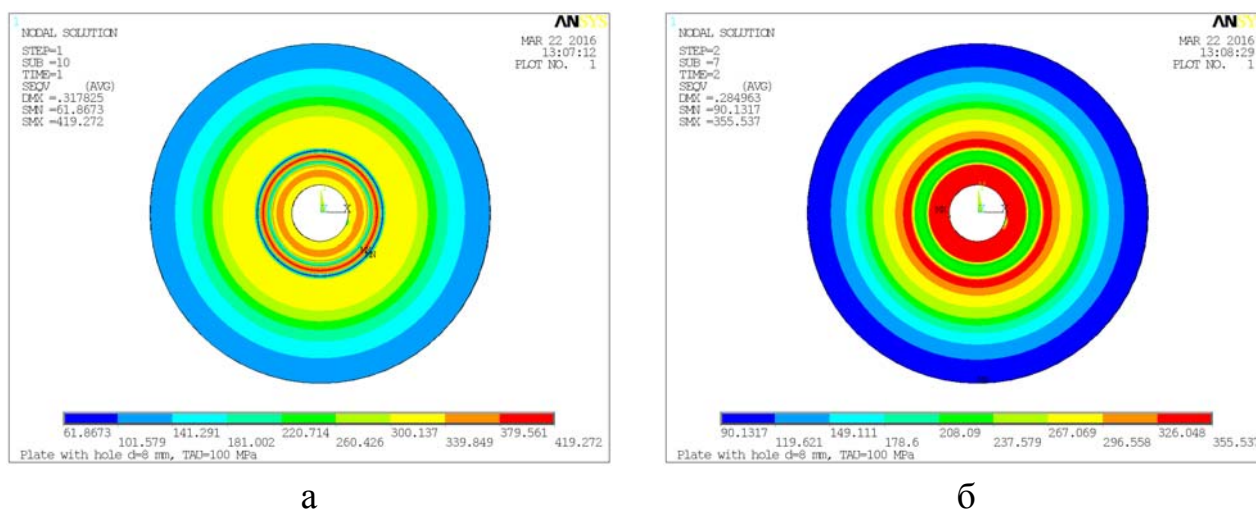


Рисунок 2.76 – Поле распределения эквивалентных напряжений по Мизесу  $\sigma_{экв}$  в зоне отверстия: а – при обжатии на глубину 0,3 мм; б – после отвода обжимок

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  $1,38 d_{отв}$  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 рисунках 2.77 – 2.79 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.

Следует отметить, что максимальное значение параметров, характеризующих локальное НДС (напряжения, упругая деформация и удельная энергия деформирования) в пластине с отверстием, реализуется в различных точках.

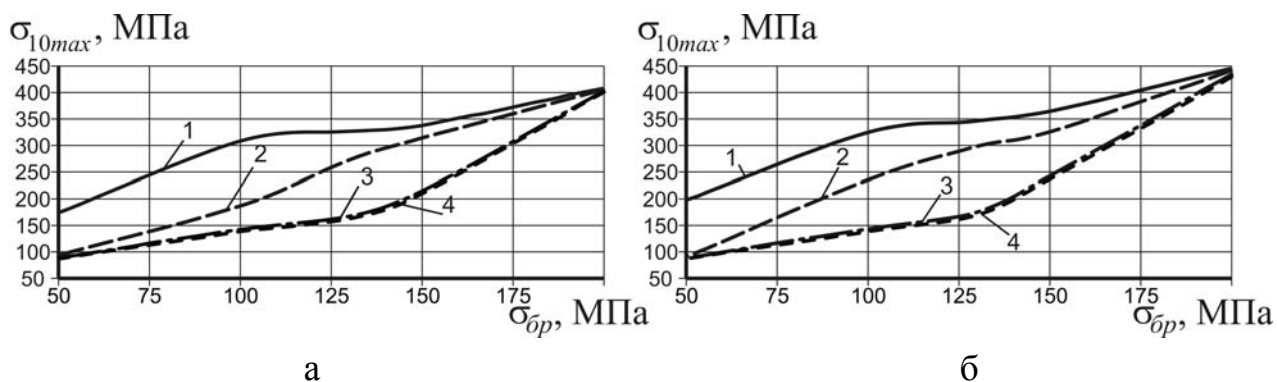


Рисунок 2.77 – Влияние уровня нагружения и глубины обжатия на изменение максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины  $z = 2,5$  мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины  $z = 0$  мм

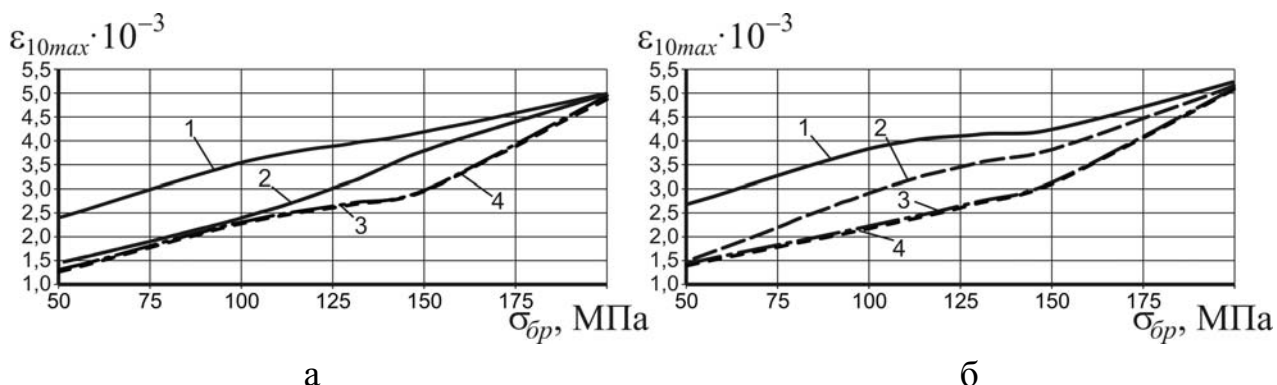


Рисунок 2.78 – Влияние уровня нагружения и глубины обжатия на изменение максимальных главных растягивающих упругих деформаций эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины  $z = 2,5$  мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины  $z = 0$  мм



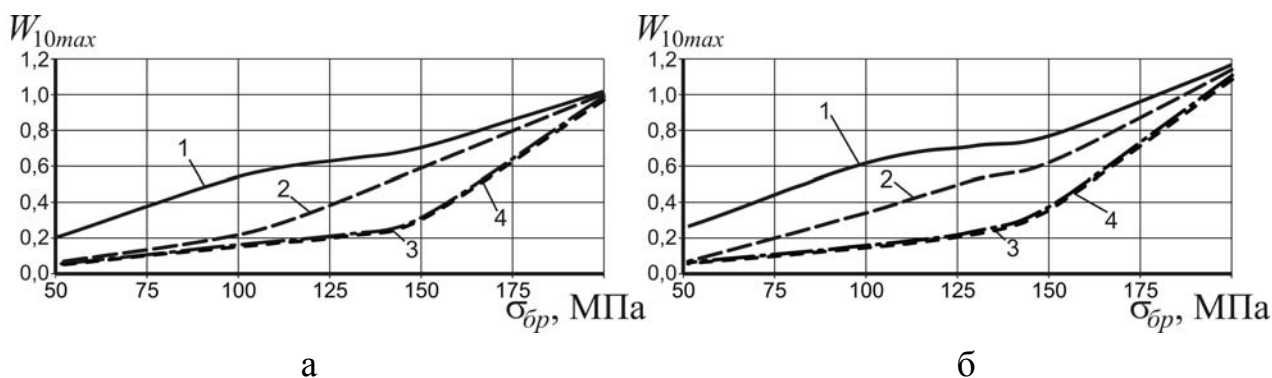


Рисунок 2.79 – Влияние уровня нагружения и глубины обжатия на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине с отверстием: а – в сечении А-А по оси отверстия на верхней поверхности пластины  $z = 2,5$  мм; б – в сечении А-А по оси отверстия на срединной поверхности пластины  $z = 0$  мм

Так, для необжатой пластины с отверстием максимум расположен в точке А на кромке отверстия (см. рисунок 2.63). 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:

$$\sigma_{10\max} = 0,0002\sigma_{0p}^3 - 0,079\sigma_{0p}^2 + 11,112\sigma_{0p} - 207,07$$

$$\sigma_{10\max} = 220,52 \ln(\sigma_{0p}) - 790,03$$

$$\sigma_{10\max} = 52,6e^{0,0097\sigma_{0p}}$$

$$\sigma_{10\max} = 50,762e^{0,0099\sigma_{0p}}$$

$$\sigma_{10\max} = 0,0002\sigma_{0p}^3 - 0,0693\sigma_{0p}^2 + 9,8743\sigma_{0p} - 143,89$$

$$\sigma_{10\max} = 0,0001\sigma_{0p}^3 - 0,0419\sigma_{0p}^2 + 7,4147\sigma_{0p} - 187,48$$

$$\sigma_{10\max} = 50,884e^{0,0104\sigma_{0p}}$$

Кривая 1 рисунок 2.77, а

Кривая 2 рисунок 2.77, а

Кривая 3 рисунок 2.77, а

Кривая 4 рисунок 2.77, а

Кривая 1 рисунок 2.77, б

Кривая 2 рисунок 2.77, б

Кривая 3 рисунок 2.77, б

$$\begin{aligned}
\sigma_{10\max} &= 48,906e^{0,0105\sigma_{\text{оп}}} \\
\varepsilon_{10\max} &= 9 \cdot 10^{-10} \sigma_{\text{оп}}^3 - 4 \cdot 10^{-7} \sigma_{\text{оп}}^2 + 6 \cdot 10^{-5} \sigma_{\text{оп}} + 8 \cdot 10^{-5} \\
\varepsilon_{10\max} &= 3 \cdot 10^{-8} \sigma_{\text{оп}}^2 + 2 \cdot 10^{-5} \sigma_{\text{оп}} + 0,0005 \\
\varepsilon_{10\max} &= 0,0009e^{0,0085\sigma_{\text{оп}}} \\
\varepsilon_{10\max} &= 0,0009e^{0,0085\sigma_{\text{оп}}} \\
\varepsilon_{10\max} &= 2 \cdot 10^{-9} \sigma_{\text{оп}}^3 - 7 \cdot 10^{-7} \sigma_{\text{оп}}^2 + 1 \cdot 10^{-4} \sigma_{\text{оп}} + 0,0006 \\
\varepsilon_{10\max} &= 1 \cdot 10^{-9} \sigma_{\text{оп}}^3 - 5 \cdot 10^{-7} \sigma_{\text{оп}}^2 + 8 \cdot 10^{-5} \sigma_{\text{оп}} - 0,0015 \\
\varepsilon_{10\max} &= 0,001e^{0,0082\sigma_{\text{оп}}} \\
\varepsilon_{10\max} &= 0,0009e^{0,0083\sigma_{\text{оп}}} \\
w_{10\max} &= 4 \cdot 10^{-7} \sigma_{\text{оп}}^3 - 0,0002 \sigma_{\text{оп}}^2 + 0,0244 \sigma_{\text{оп}} - 0,641 \\
w_{10\max} &= 3 \cdot 10^{-5} \sigma_{\text{оп}}^2 + 9 \cdot 10^{-5} \sigma_{\text{оп}} - 0,0079 \\
w_{10\max} &= 0,024e^{0,0182\sigma_{\text{оп}}} \\
w_{10\max} &= 0,0226e^{0,0184\sigma_{\text{оп}}} \\
w_{10\max} &= 6 \cdot 10^{-7} \sigma_{\text{оп}}^3 - 0,0002 \sigma_{\text{оп}}^2 + 0,0306 \sigma_{\text{оп}} - 0,771 \\
w_{10\max} &= 3 \cdot 10^{-7} \sigma_{\text{оп}}^3 - 9 \cdot 10^{-5} \sigma_{\text{оп}}^2 + 0,0143 \sigma_{\text{оп}} - 0,455 \\
w_{10\max} &= 0,0251e^{0,0186\sigma_{\text{оп}}} \\
w_{10\max} &= 0,0231e^{0,0189\sigma_{\text{оп}}}
\end{aligned}$$

Исследовано влияние глубины обжатия на величину потребного усилия обжатия (рисунок 2.80).

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.

В результате проведенных исследований:

1. Установлено, что при изменении относительного параметра  $V/d$  в диапазоне от 12,5 до 40 коэффициент концентрации напряжений в упругой области меня-

Кривая 4 рисунок 2.77, б  
Кривая 1 рисунок 2.78, а  
Кривая 2 рисунок 2.78, а  
Кривая 3 рисунок 2.78, а  
Кривая 4 рисунок 2.78, а  
Кривая 1 рисунок 2.78, б  
Кривая 2 рисунок 2.78, б  
Кривая 3 рисунок 2.78, б  
Кривая 4 рисунок 2.78, б  
Кривая 1 рисунок 2.79, а  
Кривая 2 рисунок 2.79, а  
Кривая 3 рисунок 2.79, а  
Кривая 4 рисунок 2.79, а  
Кривая 1 рисунок 2.79, б  
Кривая 2 рисунок 2.79, б  
Кривая 3 рисунок 2.79, б  
Кривая 4 рисунок 2.79, б

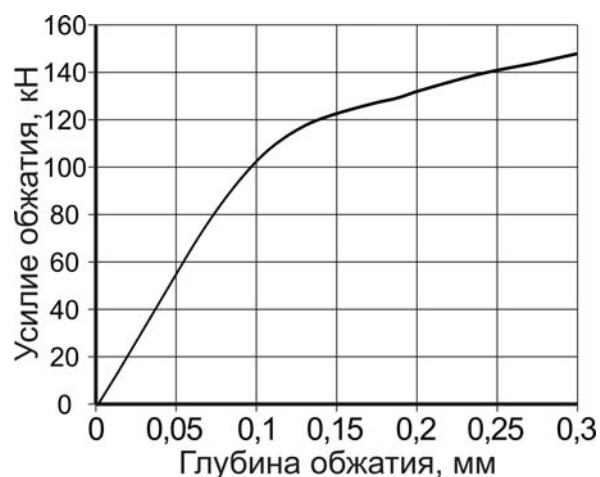


Рисунок 2.80 – Влияние глубины обжатия на величину потребного усилия обжатия пластины с отверстием

ется 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

## 2.6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОЛОСЫ С ОТВЕРСТИЕМ И СИСТЕМОЙ ОТВЕРСТИЙ

На начальном этапе проектирования можно принять, что усталостная долговечность конструктивных элементов планера самолета в растянутой зоне конструкции соизмерима с усталостной долговечностью полосы с отверстием из соответствующего материала.

Для разработки аналитических зависимостей по прогнозированию усталостной

долговечности были проведены экспериментальные исследования по определению характеристик усталостной долговечности базовых образцов из материала Д16Т: полос с отверстием ( $B/d = 6$ ) и полос с тремя отверстиями (рисунок 2.81).

Образцы для исследования характеристик усталостной долговечности полос с одним отверстием и полос с тремя отверстиями были изготовлены из пресованного профиля из материала Д16Т путем механического фрезерования по контуру. Отверстия в полосах выполняли сверлением с последующим развертыванием до  $\varnothing 8H9$ . На всех отверстиях снята фаска  $0,5 \times 45^\circ$ .

Испытания проводились на электромеханической установке УММ-02 (рисунок 2.82). В испытательной установке образцы полос нагружали одноосными переменными циклическими нагрузками. Частота нагружения составляла 12 Гц.

Образцы полос испытывали на трех уровнях нагружения:

- 1)  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 100$  МПа;
- 2)  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа;
- 3)  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа.

Усталостное разрушение полос с отверстием происходило в сечении по оси отверстия, и оно возникало в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую

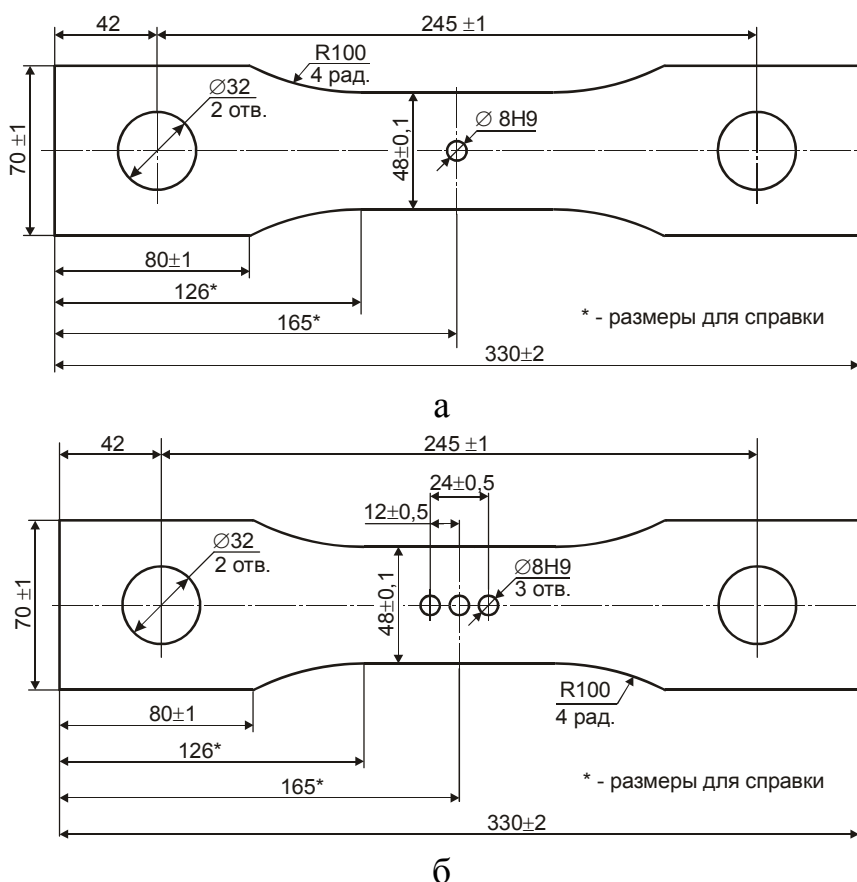


Рисунок 2.81 – Полоса: а – с одним отверстием; б – тремя отверстиями



Рисунок 2.82 – Установка для проведения усталостных испытаний УММ-02

часть отверстия. При этом среднее значение усталостной долговечности полосы с отверстием составило:

- $\sigma_{\delta p \min} = -30$  МПа,  $\sigma_{\delta p \max} = 100$  МПа –  $N_{cp} = 195\ 000$  циклов нагружения;
- $\sigma_{\delta p \min} = 0$  МПа,  $\sigma_{\delta p \max} = 130$  МПа –  $N_{cp} = 117\ 000$  циклов нагружения;
- $\sigma_{\delta p \min} = 0$  МПа,  $\sigma_{\delta p \max} = 150$  МПа –  $N_{cp} = 52\ 000$  циклов нагружения.

Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рисунке 2.83.

Усталостное разрушение полос с тремя отверстиями происходило в сечении по оси крайнего отверстия, и оно возникало в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия. При этом среднее значение усталостной долговечности полосы с отверстием составило:

- $\sigma_{\delta p \min} = -30$  МПа,  $\sigma_{\delta p \max} = 100$  МПа –  $N_{cp} = 387\ 000$  циклов нагружения;
- $\sigma_{\delta p \min} = 0$  МПа,  $\sigma_{\delta p \max} = 130$  МПа –  $N_{cp} = 140\ 500$  циклов нагружения;
- $\sigma_{\delta p \min} = 0$  МПа,  $\sigma_{\delta p \max} = 150$  МПа –  $N_{cp} = 101\ 000$  циклов нагружения.

Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рисунке 2.84.

Сводные результаты усталостных испытаний полос с отверстием и полос с тремя отверстиями сведены в таблицу 2.1.

По результатам усталостных испытаний полос ( $B/d = 6$ ) из материала Д16Т (рисунок 2.85) разработаны аналитические зависимости вида  $\sigma_0^m \cdot N = C$  для прогнозирования усталостной долговечности:

- полосы с одним отверстием:

$$\sigma^{4,88317} N = 2,26879 \cdot 10^{15} \text{ или } \sigma = 1,39521 \cdot 10^3 N^{-0,204785}; \quad (2.1)$$

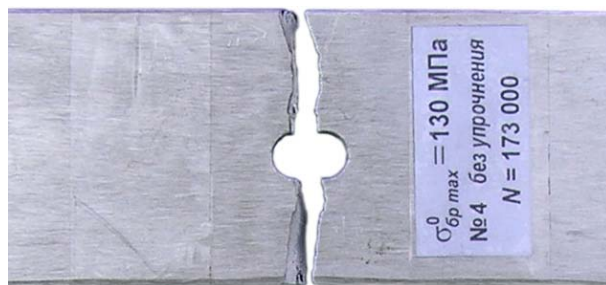


Рисунок 2.83 – Характер усталостного разрушения образцов полос с одним отверстием ( $B/d = 6$ ) из прессованного профиля (Д16Т)

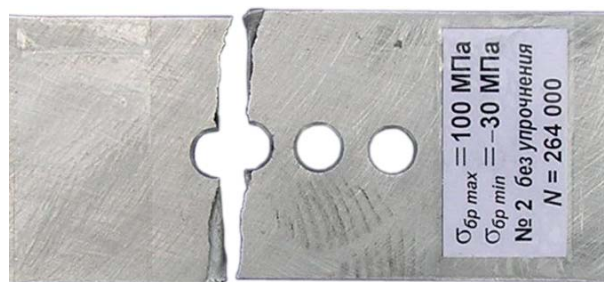


Рисунок 2.84 – Характер усталостного разрушения образцов полос с тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) из прессованного профиля (Д16Т)

Таблица 2.1 – Результаты экспериментальных исследований характеристик усталостной долговечности полос с отверстиями ( $B/d = 6$ ) из прессованного швеллера из материала Д16Т

| Уровни нагружения         | $\sigma_{бр\ min} = -30$ МПа,<br>$\sigma_{бр\ max} = 100$ МПа |                |           | $\sigma_{бр\ min} = 0$ МПа,<br>$\sigma_{бр\ max} = 130$ МПа |                |           | $\sigma_{бр\ min} = 0$ МПа,<br>$\sigma_{бр\ max} = 150$ МПа |                |           |
|---------------------------|---|----------------|-----------|---|----------------|-----------|---|----------------|-----------|
|                           | $N_{min}$   | $N_{cp}$       | $N_{max}$ | $N_{min}$   | $N_{cp}$       | $N_{max}$ | $N_{min}$   | $N_{cp}$       | $N_{max}$ |
| Усталостная долговечность | Полоса с одним отверстием                                     |                |           |   |                |           |   |                |           |
|                           | 173 000   | <b>195 000</b> | 234 000   | 91 000  | <b>117 000</b> | 173 000   | 40 000  | <b>52 000</b>  | 69 000    |
|                           | Полоса с тремя отверстиями                                    |                |           |   |                |           |   |                |           |
|                           | 264 000   | <b>387 000</b> | 529 000   | 140 000   | <b>140 500</b> | 141 000   | 80 000  | <b>101 000</b> | 118 700   |

– полосы с тремя отверстиями:

$$\sigma^{5,35564} N = 3,77761 \cdot 10^{16} \quad \text{или} \quad (2.2)$$

$$\sigma = 1,24532 \cdot 10^3 N^{-0,186719}$$

В результате испытаний установлено, что усталостная долговечность полосы с тремя отверстиями выше усталостной долговечности полосы с одним отверстием:

- на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 100$  МПа – в 2 раза;
- на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа – в 1,6 раза;
- на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа – в 1,9 раза.

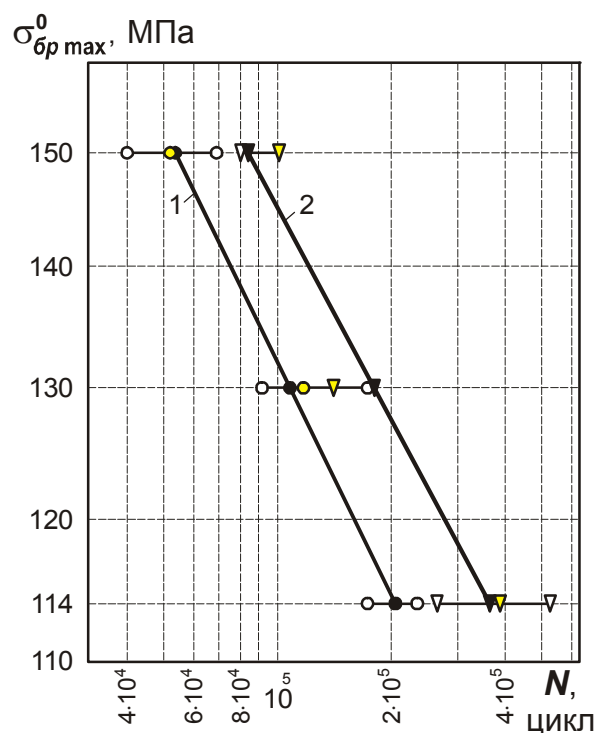


Рисунок 2.85 – Кривые усталости полос: 1 – с одним отверстием; 2 – тремя отверстиями

## 2.7. ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ

1. Разработан метод анализа влияния утолщения, раскатки, дорнования, обжатия на характеристики локального НДС конструктивных элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий с учетом истории нагружения.

2. Исследовано влияние величины одностороннего утолщения в зоне отверстия на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее растяжении. Установлено, что для полосы с отверстием в диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 100 до 200 МПа применение одностороннего утолщения в зоне отверстия способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,03 – 1,1 раза по сравнению с напряжением в полосе с отверстием без усиления. При этом величины максимальных главных растягивающих деформаций и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла уменьшаются в 1,04 раза и 1,03 – 1,14 раза соответственно.

3. Исследовано влияние величины двустороннего утолщения в зоне отверстия на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее растяжении. Установлено, что для полосы ( $\delta = 5$  мм) с отверстием  $\varnothing 8$  мм в диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 100 до 200 МПа применение двустороннего утолщения в зоне отверстия в 1,2 – 1,7 раза способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,1 – 1,7 раза по сравнению с напряжением в полосе с отверстием без усиления. При этом величины максимальных главных растягивающих деформаций и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла уменьшаются в 1,02 – 1,67 раза и 1,2 – 2,8 раза соответственно.

4. Исследовано влияние величины радиального натяга при дорновании и уровня нагружения при растяжении на характеристики локального НДС растянутой полосы с отверстием. Установлено, что для полосы с отверстием в диапазоне значений напряжений в сечении брутто от 100 до 200 МПа применение дорнования стенок отверстия с радиальным натягом от 1 до 3% способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,1 – 2,2 раза по сравнению с напряжением в полосе с отверстием.

При этом величины максимальных главных растягивающих деформаций и максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла уменьшаются в 1,2 – 2 раза и 1,2 – 4,5 раза соответственно.

5. Исследовано влияние барьерного обжатия полосы в зоне отверстия на характеристики локального НДС. Проанализировано влияние радиуса, на котором расположена обжимка, и уровня нагружения на характеристики локального НДС полосы с отверстием. Применение сегментного обжатия на глубину 0,3 мм способствует уменьшению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,5 – 2,2 раза в сечении по оси отверстия и в 1,4 – 1,7 раза в зоне обжатия по отношению к напряжениям для полосы с отверстием.

6. Исследовано влияние конструктивно-технологических параметров на характеристики локального НДС пластины с отверстием при нагружении ее сдвигом. Установлено, 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.

7. Проведенные экспериментальные исследования усталостной долговечности полосы с отверстием и системой отверстий показали, что усталостная долговечность полосы с тремя отверстиями выше усталостной долговечности полосы с одним отверстием от 1,6 до 2 раз на эксплуатационных уровнях нагружения.

8. Разработанные методы анализа влияния локального пластического деформирования в зоне функциональных отверстий конструктивных элементов планера самолета на характеристик локального НДС, проведенные экспериментальные исследования по определению характеристик усталостной долговечности полосы с отверстием и системой отверстий являются научным обоснованием конструктивно-технологических методов обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий.



*Раздел 3*

**ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА  
САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ**

---

Для выбора параметров конструктивно-технологических методов обработки элементов конструкции планера самолета в зоне функциональных отверстий выполнены численные исследования характеристик локального НДС конструктивных элементов в зоне отверстий с помощью системы инженерного анализа ANSYS.

В качестве элементов, моделирующих конструктивно-силовые элементы планера с функциональными отверстиями, приняты полоса и z-образный профиль с отверстиями, подверженные действию переменных нагрузок.

**3.1. Влияние раскатки, дорнования и барьерного обжатия полосы в зоне функциональных отверстий на характеристики ее локального напряженно-деформированного состояния**

Проведенный анализ показал, что большинство представленных в литературе конструктивно-технологических методов повышения усталостной долговечности конструктивных элементов в зоне отверстий относятся к одиночным отверстиям.

При проведении численных экспериментов исследовано влияние основных технологических методов обработки на характеристики локального НДС полосы в зоне отверстий, таких, как: дорнование стенок отверстий; раскатка стенок отверстий; барьерное обжатие в виде лунок сегментной конфигурации.

Были проанализированы следующие методы обработки полос в зоне отверстий:

- 1) полоса с отверстием  $\varnothing 8$  мм ( $B/d = 6$ ), фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ;
- 2) полоса с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $B/d = 6$ ), расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ;
- 3) полоса с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $B/d = 6$ ), расстояние между центрами отверстий – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , обрабатываемая в зоне отверстий методом раскатки стенок отверстий с относительным натягом 0,2 и 0,6%;
- 4) полоса с тремя отверстиями  $\varnothing 7,9$  мм ( $B/d = 6$ ), расстояние между центрами отверстий – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , обрабатываемая в зоне отверстий методом дорнования стенок отверстий с относительным натягом 2%;

5) полоса с тремя отверстиями  $\varnothing 7,9$  мм ( $B/d = 6$ ), расстояние между центрами отверстий – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , обрабатываемая в зоне отверстий методом выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм, угол раствора –  $50$  и  $60^\circ$ .

Для проведения численных исследований характеристик локального НДС полосы с отверстиями в системе Siemens NX были созданы трехмерные геометрические модели образцов полос и технологического инструмента, предназначенного для обработки полосы в зоне отверстий (см. рисунки 3.1 – 3.4).

Материал полосы – сплав Д16чТ [8], истинная диаграмма деформирования показана на рисунке 3.5.

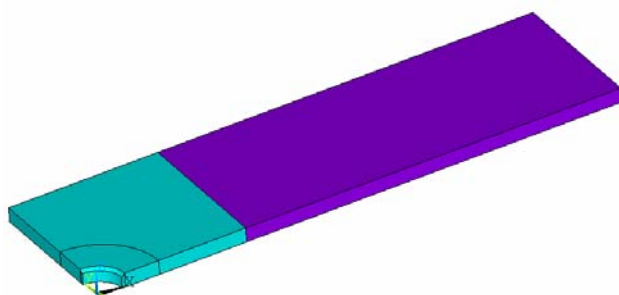


Рисунок 3.1 – Трехмерная модель 1/8 полосы с одиночным отверстием

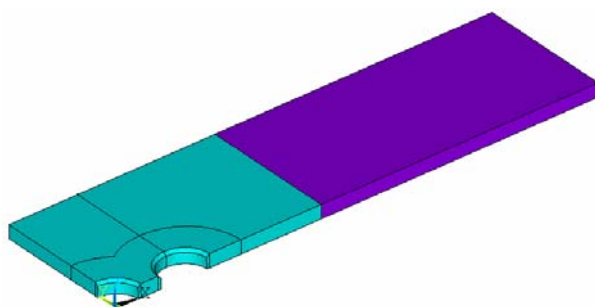


Рисунок 3.2 – Трехмерная модель 1/8 полосы с тремя отверстиями

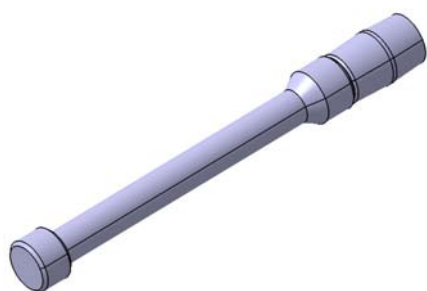


Рисунок 3.3 – Трехмерная модель дорна

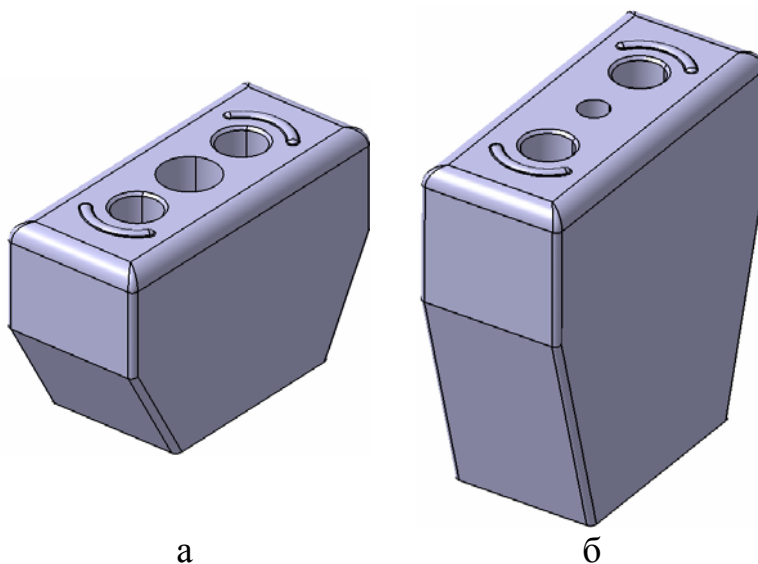


Рисунок 3.4 – Трехмерные модели: а – верхней обжимки; б – нижней обжимки

Материал дорна – сталь ХВГ ГОСТ 5950-73, обладающий следующими характеристиками: модуль упругости  $E = 2000$  МПа, предел текучести  $\sigma_m = 1400$  МПа, предел прочности при растяжении  $\sigma_\sigma = 1600$  МПа, относительное удлинение при разрыве  $\delta = 9\%$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$  [7].

Материал обжимок – сталь У8А ГОСТ 1345-90, обладающий следующими характеристиками: модуль упругости  $E = 2000$  МПа, предел текучести  $\sigma_m = 750$  МПа, предел прочности при растяжении  $\sigma_e = 1200$  МПа, относительное удлинение при разрыве  $\delta = 9\%$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$  [7].

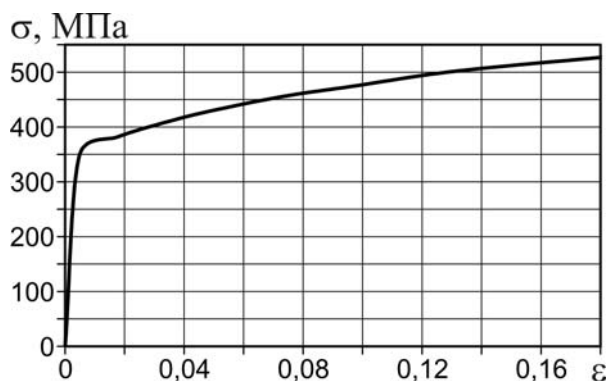


Рисунок 3.5 – Диаграмма деформирования сплава Д16чТ

Величина эксплуатационных напряжений при численных исследованиях  $\sigma_{\bar{b}p} = 0; 100; 130; 150$  МПа.

Также для методов 1 – 3 был рассмотрен случай несимметричного нагружения:  $\sigma_{\bar{b}p \max} = 100$  МПа,  $\sigma_{\bar{b}p \min} = -30$  МПа, что соответствует  $\sigma_0 \bar{b}p = 114$  МПа.

Созданные геометрические модели полос и технологического инструмента переданы в систему инженерного анализа ANSYS с помощью формата импорта САТІА и послужили основой для построения конечно-элементных моделей.

При разработке расчетной схемы необходимо учитывать специфику решаемой задачи – определение характеристик локального НДС.

Поскольку в зоне концентрации напряжений имеет место сложное (объемное) НДС, то при разработке расчетной схемы необходимо правильно выбрать схему идеализации расчетной конструкции.

Расчетные модели полос с отверстиями (рисунок 3.6, 3.7) представляют собой трехмерный объект, находящийся в условиях одноосного растяжения. При создании расчетной схемы полосы с отверстиями учтена геометрическая и силовая симметрия объекта. Это позволяет рассматривать 1/8 часть полосы с заданием соответствующих условий симметрии.

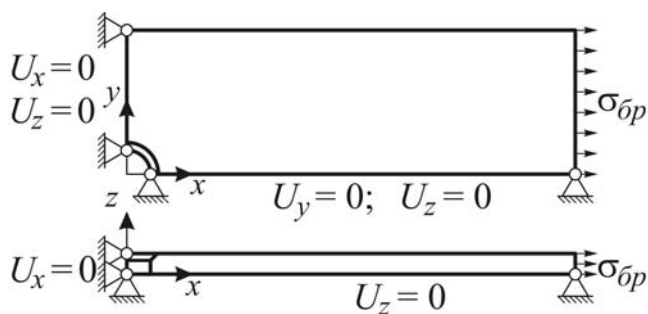


Рисунок 3.6 – Расчетная схема полосы с отверстием

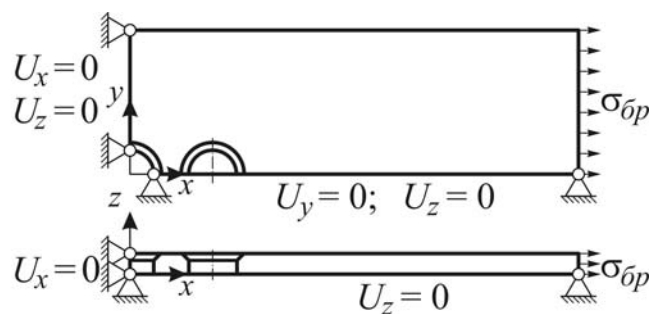


Рисунок 3.7 – Расчетная схема полосы с тремя отверстиями

По свободному торцу полосы прикладываются расчетные распределенные

нагрузки, моделирующие нагружение образца в ходе численного эксперимента.

Для варианта полосы с тремя отверстиями, обрабатываемой в зоне отверстий методом дорнования стенок отверстий с относительным натягом 2%, рассмотрена 1/4 часть полосы с заданием соответствующих условий симметрии (см. рисунок 3.8). На начальном этапе дорнования, когда рассматривается процесс внедрения дорнов в стенки отверстий, и на окончательном этапе (извлечение дорнов) задается закрепление по оси  $Z$  для всех узлов, расположенных на нижней поверхности полосы. При рассмотрении этапов нагружения и разгрузки происходит перезакрепление модели во всех узлах, расположенных на срединной поверхности полосы.



Рисунок 3.8 – Расчетная схема полосы с тремя отверстиями, обрабатываемой методом дорнования: а – этап дорнования и извлечения дорнов; б – этап приложения растягивающих нагрузок, соответствующих заданным номинальным напряжениям

При рассмотрении обработки методом раскатки, дорнования и выштамповки сегментных лунок моделируется контактное взаимодействие инструмента с соответствующими участками полосы. Модель контактного взаимодействия типа «поверхность-поверхность» учитывает трение между соприкасающимися частями конструкции [88]. Процесс раскатки моделировали путем постановки в отверстие втулки с радиальным натягом, что в некотором смысле является принятым допущением в ходе расчета. Коэффициент трения принят равным 0,12.

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

Для каждого из рассматриваемых методов обработки построены конечно-элементные модели полос и соответствующего технологического инструмента (см. рисунки 3.9 – 3.14). Основой для построения конечно-элементных моделей

явились трехмерные модели полос с отверстиями и модели деформирующихся элементов, созданные в системе Siemens NX и переданные в систему ANSYS.

Был применен метод зонирования, позволяющий получить зоны с различной степенью разбиения на конечные элементы.

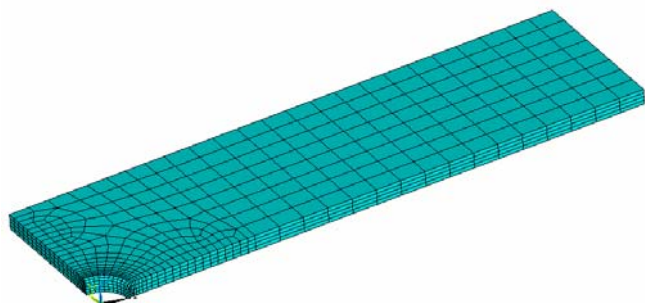


Рисунок 3.9 – Конечно-элементная модель полосы с отверстием

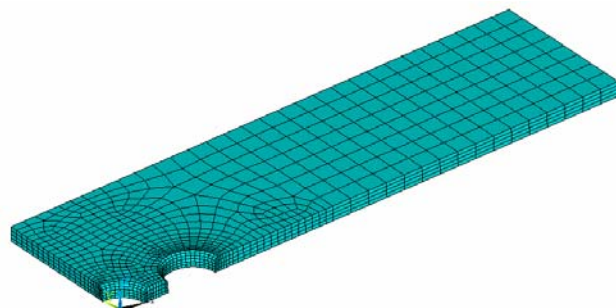


Рисунок 3.10 – Конечно-элементная модель полосы с тремя отверстиями

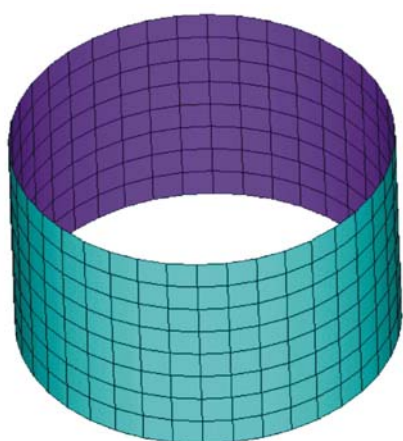


Рисунок 3.11 – Конечно-элементная модель раскатника

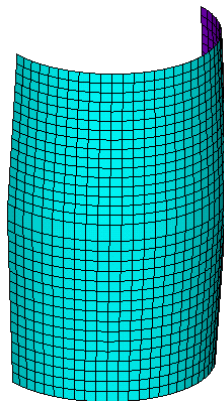


Рисунок 3.12 – Конечно-элементная модель дорна

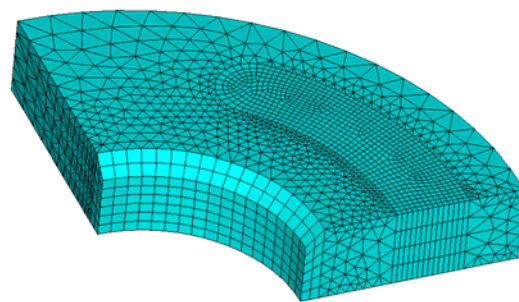


Рисунок 3.13 – Фрагмент конечно-элементной модели полосы с тремя отверстиями в зоне выштамповки сегментных лунок

Конечно-элементная модель полосы состоит из элементов твердого деформируемого тела SOLID95 и SOLID45 [88]. Области вблизи отверстия, где имеет место концентрация напряжений, были разбиты с помощью элемента SOLID95.

Области, удаленные от отверстий (регулярная зона полосы), разбивались с помощью элемента SOLID45.

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

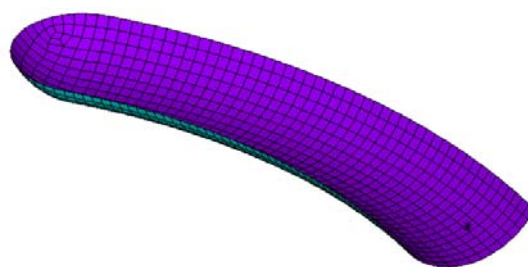


Рисунок 3.14 – Конечно-элементная модель обжимки для выштамповки сегментных лунок

В качестве параметров, характеризующих НДС, рассмотрены: главные растягивающие напряжения ( $\sigma_1$ ) и деформации ( $\varepsilon_1$ ), а также удельная энергия деформирования ( $W = \sigma_1 \cdot \varepsilon_1$ ) и эквивалентные напряжения Мизеса ( $\sigma_e$ ).

Для анализа эффективности методов обработки и выбора в пользу конкретного метода, позволяющего повысить усталостную долговечность конструктивного элемента в зоне отверстий, в качестве критериев рассмотрены следующие:

- 1) коэффициент концентрации напряжений ( $K_{\sigma_x} = \sigma_{x \max} / \sigma_{\bar{\sigma}p}$ );
- 2) коэффициент концентрации деформаций ( $K_{\varepsilon_x} = \varepsilon_{x \max} / \varepsilon_{\bar{\sigma}p}$ );
- 3) коэффициент концентрации удельной энергии деформирования ( $K_{W_x}$ );
- 4) максимальные главные напряжения ( $\sigma_{1 \max}$ );
- 5) максимальные главные деформации ( $\varepsilon_{1 \max}$ );
- 6) максимальная удельная энергии деформирования ( $W_{1 \max}$ ).

Для учета сжимающих напряжений при рассмотрении случая нагружения ( $\sigma_{\bar{\sigma}p \max} = 100$  МПа,  $\sigma_{\bar{\sigma}p \min} = -30$  МПа), соответствующего условиям нагружения, реализуемым при усталостных испытаниях в качестве критериев для оценки эффективности методов упрочнения, будем рассматривать:

- 1) максимальные нормальные напряжения ( $\sigma_{x \max}$ );
- 2) максимальную нормальную упругую составляющую деформации ( $\varepsilon_{x \max}$ );
- 3) максимальную нормальную удельную энергию деформирования ( $W_{x \max}$ ).

Для оценки параметров повреждающего цикла применяют величины максимальных главных напряжений, деформаций и энергии деформирования [22]. В нашем случае – это главные растягивающие напряжения  $\sigma_1$  и деформации  $\varepsilon_1$ , а также их произведение. При этом за минимальное значение напряжений и деформаций повреждающего цикла принимают соответствующие значения напряжений и деформаций после разгрузки. Оценку повреждающего действия циклического изменения внешних нагрузок в конструкции проводят путем пересчета циклического изменения локальных главных растягивающих напряжений и деформаций в напряжения и деформации эквивалентного отнулевого цикла и их последующего сравнения между собой. Пересчет в эквивалентный отнулевой цикл проводят по

формуле Одингга, которая находит широкое применение при пересчетах циклов и хорошо согласуется с экспериментальными данными [66].

Анализ эффективности применения рассматриваемых методов обработки конструктивных элементов в зоне отверстий проводят путем сравнения соответствующих значений коэффициентов концентрации напряжений, деформаций, удельной энергии деформирования, а также величин максимальных главных напряжений, деформаций и энергии деформирования. При расчете амплитуды деформаций рассматривают упругую составляющую деформаций, поскольку именно она сильно изменяется в процессе циклического нагружения.

Расчет указанных параметров проводят в зонах вероятного усталостного разрушения. Для определения точек, в которых указанные параметры достигают своего максимального значения, необходимо проанализировать характер изменения максимальных главных напряжений и деформаций эквивалентного отнулевого цикла вдоль пути, расположенного в сечении по оси отверстия (см. рисунки 3.15, 3.16).

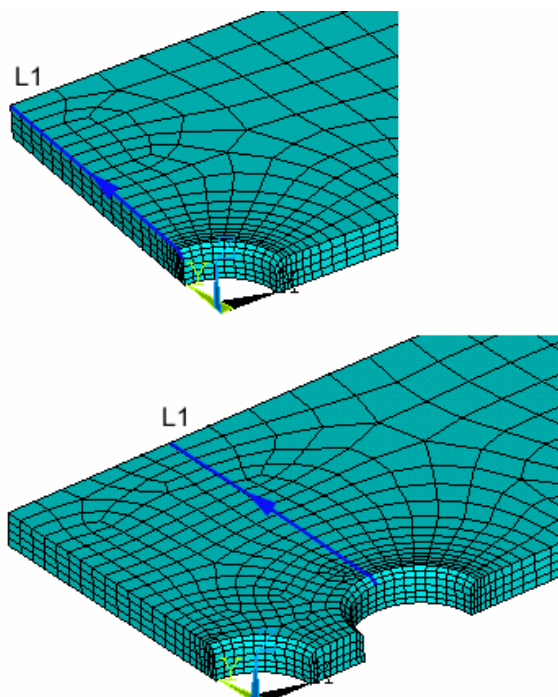


Рисунок 3.15 – Схема индикации пути L1

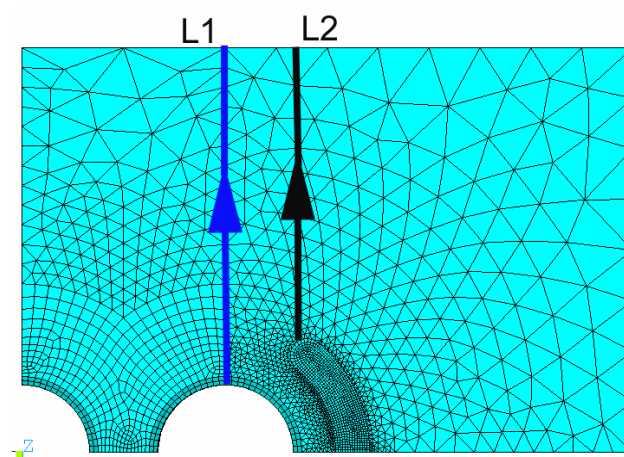


Рисунок 3.16 – Схема индикации путей L1 и L2

На рисунках 3.17 – 3.23 показаны результаты численных исследований влияния уровня нагружения и методов обработки полосы в зоне отверстий на характеристики локального НДС.

На рисунках цифрами обозначены следующие варианты полосы: 1 – с отверстием  $\varnothing 8$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ; 2 – тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм, расстояние между отверстиями  $l = 12$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ; 3 – тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм,  $l = 12$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , обработанная методом раскатки с натягом  $0,2\%$ ; 4 – тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм,  $l = 12$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , обработанная методом раскатки с натягом  $0,6\%$ ; 5 – тремя отверстиями  $\varnothing 7,9$  мм,  $l = 12$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , обработанная методом дорнования с натягом  $2\%$ ; 6 – тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм,  $l = 12$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , обработанная методом выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия –  $0,3$  мм, угол раствора –  $60^\circ$ , в зоне обжатия; 7 – тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм,  $l = 12$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , обработанная методом выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия –  $0,3$  мм, угол раствора –  $50^\circ$ , в зоне обжатия; 8 – тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм,  $l = 12$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , обработанная методом выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия –  $0,3$  мм, угол раствора –  $60^\circ$ , в зоне по оси крайнего отверстия; 9 – тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм,  $l = 12$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , обработанная методом выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия –  $0,3$  мм, угол раствора –  $50^\circ$ , в зоне по оси крайнего отверстия.

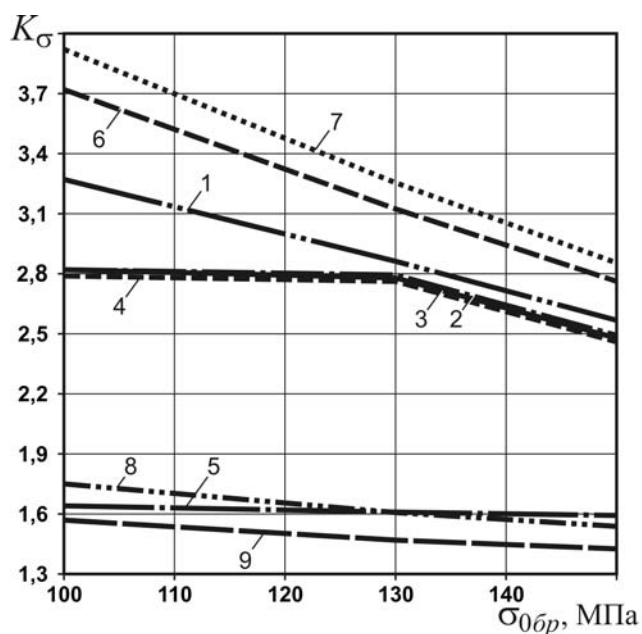


Рисунок 3.17 – Влияние уровня нагружения и метода обработки в зоне отверстий на изменение коэффициента концентрации напряжений в полосе

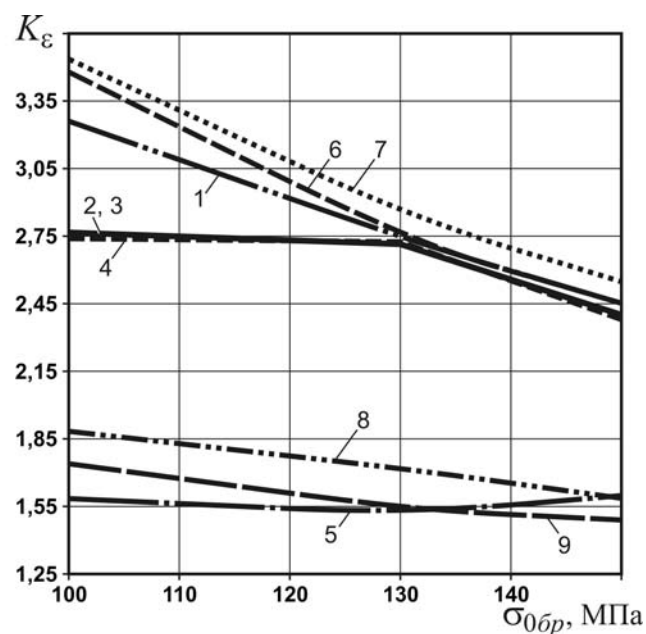


Рисунок 3.18 – Влияние уровня нагружения и метода обработки в зоне отверстий на изменение коэффициента концентрации деформаций в полосе



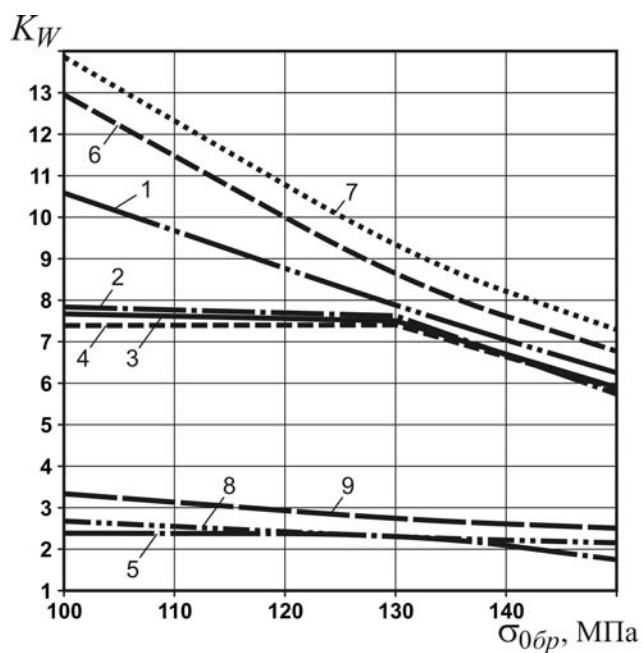


Рисунок 3.19 – Влияние уровня нагружения и метода обработки в зоне отверстий на изменение коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в полосе

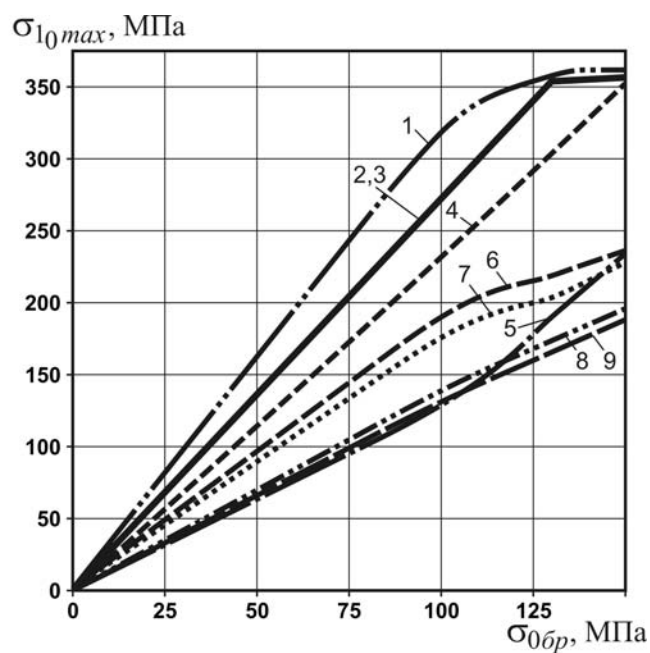


Рисунок 3.20 – Влияние уровня нагружения и метода обработки в зоне отверстий на изменение максимальных главных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе

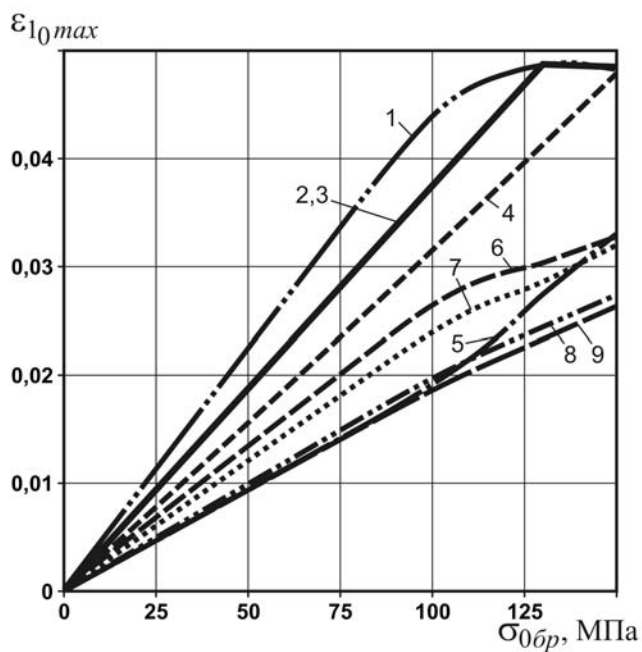


Рисунок 3.21 – Влияние уровня нагружения и метода обработки в зоне отверстий на изменение максимальных главных деформаций эквивалентного отнулевого цикла в полосе

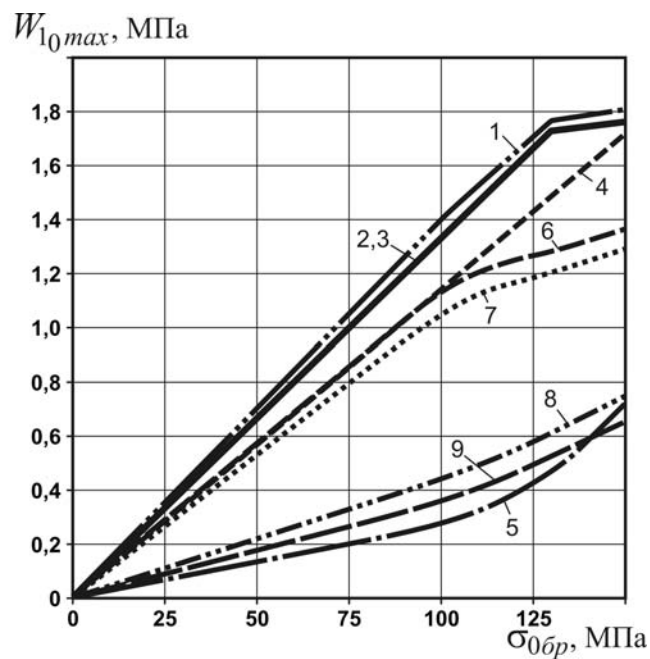


Рисунок 3.22 – Влияние уровня нагружения и метода обработки в зоне отверстий на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в полосе

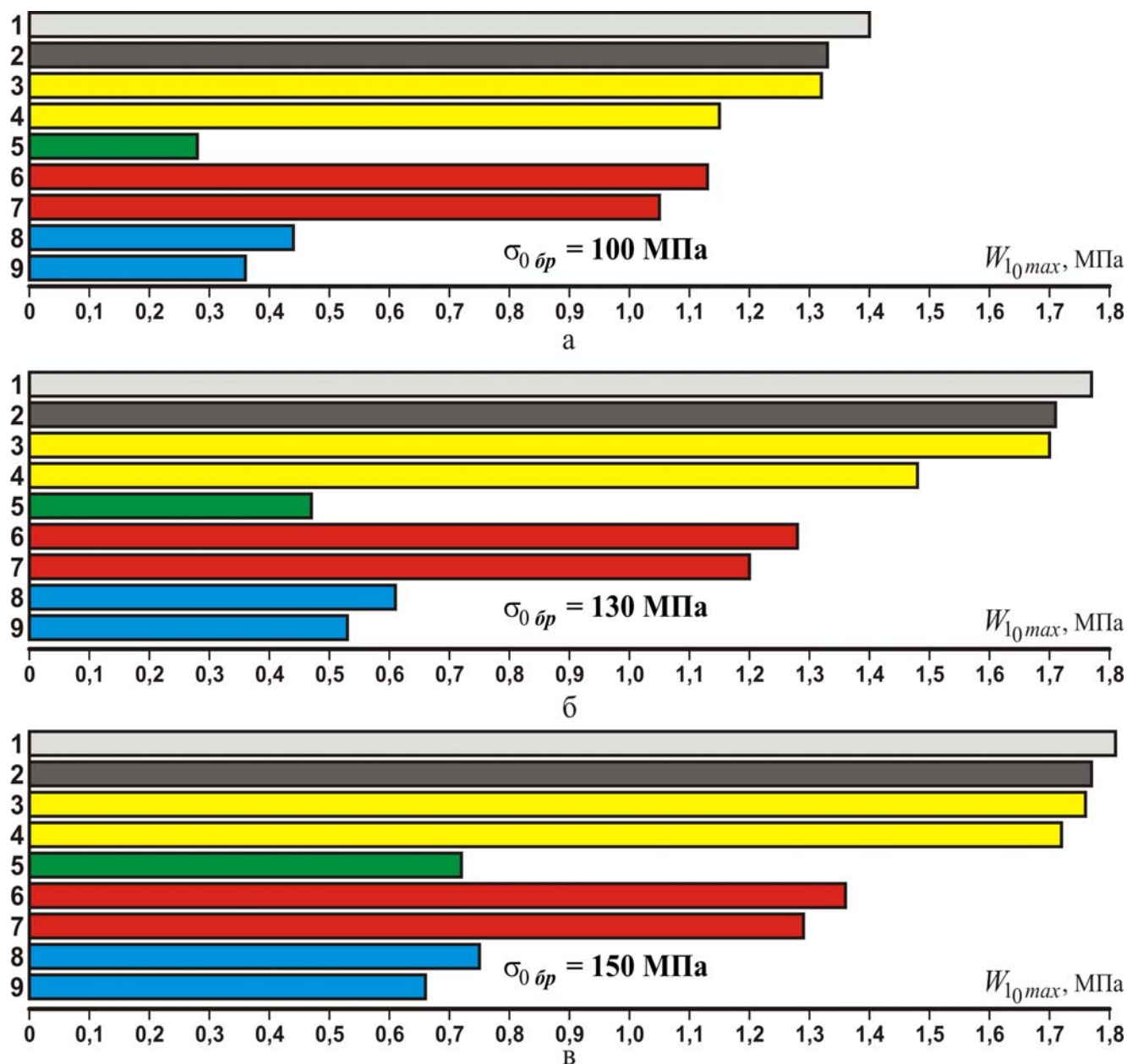


Рисунок 3.23 – Влияние методов обработки полос в зоне отверстий на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла при уровне нагружения: а –  $\sigma_{0 \delta p} = 100$  МПа; б – 130 МПа; в – 150 МПа

В результате численного исследования НДС полосы с отверстиями установлено, что:

1) применение трех отверстий, расположенных на расстоянии 12 мм, вместо одного приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси крайнего отверстия в 1,03 – 1,16 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,02 – 1,19 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,03 – 1,35 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,01 – 1,16 раза, максимальных деформаций в

1,16 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 1,02 – 1,05 раза по сравнению с этими характеристиками для полосы с одним отверстием;

2) обработка полосы с тремя отверстиями, расположенными на расстоянии 12 мм, методом раскатки с натягом 0,2% приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси крайнего отверстия в 1,03 – 1,16 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,02 – 1,18 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,05 – 1,38 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,01 – 1,17 раза, максимальных деформаций в 1,16 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 1,03 – 1,06 раза по сравнению с этими характеристиками для полосы с одним отверстием;

3) обработка полосы с тремя отверстиями, расположенными на расстоянии 12 мм, методом раскатки с натягом 0,2% приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси крайнего отверстия в 1,01 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,01 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,02 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,01 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 1,01 раза по сравнению с этими характеристиками для полосы с тремя отверстиями;

4) обработка полосы с тремя отверстиями, расположенными на расстоянии 12 мм, методом раскатки с натягом 0,6% приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси крайнего отверстия в 1,04 – 1,17 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,03 – 1,19 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,06 – 1,43 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,03 – 1,38 раза, максимальных деформаций в 1,2 – 1,42 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 1,05 – 1,22 раза по сравнению с этими характеристиками для полосы с одним отверстием;

5) обработка полосы с тремя отверстиями, расположенными на расстоянии 12 мм, методом раскатки с натягом 0,6% приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси крайнего отверстия в 1,01 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,01 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,03 – 1,06 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,01–1,19 раза, макси-

мальных деформаций в 1,02 – 1,23 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 1,03 – 1,16 раза по сравнению с этими характеристиками для полосы с тремя отверстиями;

б) обработка полосы с тремя отверстиями, расположенными на расстоянии 12 мм, методом дорнования с натягом 2% приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси крайнего отверстия в 1,62 – 2 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,53 – 2,06 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,06 – 4,27 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,55 – 2,5 раза, максимальных деформаций в 1,45 – 2,32 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 2,5 – 5 раз по сравнению с этими характеристиками для полосы с одним отверстием;

7) обработка полосы с тремя отверстиями, расположенными на расстоянии 12 мм, методом дорнования с натягом 2% приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси крайнего отверстия в 1,56 – 1,72 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,5 – 1,74 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 3,3 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,53 – 2,13 раза, максимальных деформаций в 1,48 – 2 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 2,46 – 4,75 раза по сравнению с этими характеристиками для полосы с тремя отверстиями;

8) обработка полосы с тремя отверстиями, расположенными на расстоянии 12 мм, методом выштамповки сегментных лунок при глубине обжатия 0,3 мм (угол раствора 60°) приводит к появлению концентрации напряжений в зоне обжатия;

9) обработка полосы с тремя отверстиями, расположенными на расстоянии 12 мм, методом выштамповки сегментных лунок при глубине обжатия 0,3 мм (угол раствора 60°) приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси крайнего отверстия в 1,67 – 1,87 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,54 – 1,73 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 2,5 – 3,18 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,85 – 2,29 раза, максимальных деформаций в 1,78 – 2,2 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 2,4 – 3,18 раза по сравнению с этими характеристиками для полосы с одним отверстием;

10) обработка полосы с тремя отверстиями, расположенными на расстоянии

12 мм, методом выштамповки сегментных лунок при глубине обжатия 0,3 мм (угол раствора 60°) приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси крайнего отверстия в 1,61 – 1,73 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,46 – 1,58 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 2,35 – 3 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,83 – 1,98 раза, максимальных деформаций в 1,88 – 2,13 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 2,36 – 3,02 раза по сравнению с этими характеристиками для полосы с тремя отверстиями;

11) обработка полосы с тремя отверстиями, расположенными на расстоянии 12 мм, методом выштамповки сегментных лунок при глубине обжатия 0,3 мм (угол раствора 50°) приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси крайнего отверстия в 1,8 – 2,08 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,64 – 1,87 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 2,9 – 3,95 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,93 – 2,44 раза, максимальных деформаций в 1,88 – 2,32 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 2,74 – 3,9 раза по сравнению с этими характеристиками для полосы с одним отверстием;

12) обработка полосы с тремя отверстиями, расположенными на расстоянии 12 мм, методом выштамповки сегментных лунок при глубине обжатия 0,3 мм (угол раствора 50°) приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси крайнего отверстия в 1,74 – 1,9 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,58 – 1,75 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 2,67 – 3,31 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,9 – 2,13 раза, максимальных деформаций в 1,88 – 2,13 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 2,68 – 3,23 раза по сравнению с этими характеристиками для полосы с тремя отверстиями.

### 3.2. ВЛИЯНИЕ РАСКАТКИ, ДОРНОВАНИЯ И БАРЬЕРНОГО ОБЖАТИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОКАЛЬНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

При численном анализе влияния методов и параметров обработки зоны отверстий для перетекания топлива на НДС стрингеров рассмотрены следующие варианты:

1) стрингер с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм (расстояние между центрами отверстий – 40 мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ) для перетекания топлива, выполненными на вертикальной полке (рисунок 3.24);

2) стрингер с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм (расстояние между центрами отверстий – 40 мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ) для перетекания топлива, выполненными на вертикальной полке, обрабатываемый в зоне отверстий:

- дорнованием стенок отверстий с относительным натягом  $\delta = 1; 2; 3\%$ ;
- дорнованием через технологическую втулку. Относительный натяг при дорновании (дорн-вулка)  $\delta = 2; 3\%$ ;
- раскатка стенок отверстий с относительным натягом  $\delta = 0,4; 0,6\%$ ;
- выштамповка концентрической площадки вокруг кромки отверстия (диаметр выштамповки 12 мм, глубина выштамповки  $h = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$  мм);

3) стрингер с тремя отверстиями  $\varnothing 7,5-9-7,5$  мм (фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ), обрабатываемый в зоне отверстий методом выштамповки лунок сегментной конфигурации (глубина выштамповки  $h = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$  мм) (рисунок 3.25);

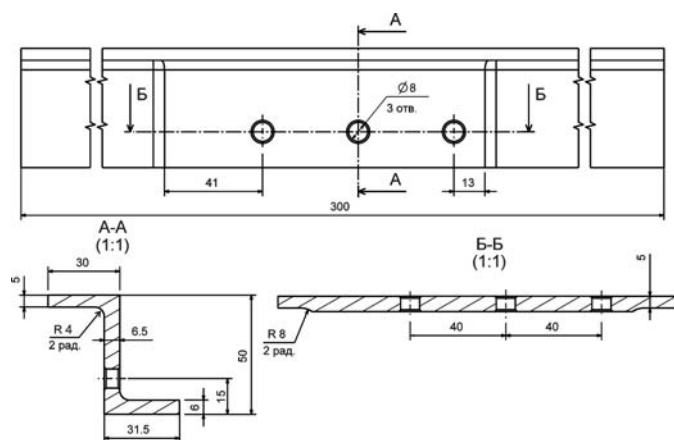


Рисунок 3.24 – Образец стрингера с системой отверстий

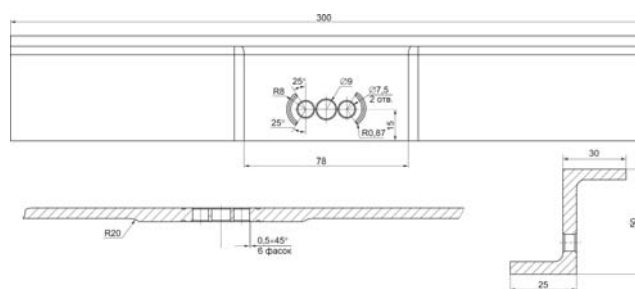


Рисунок 3.25 – Образец стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 7,5-9-7,5$  мм, обрабатываемого методом выштамповки лунок сегментной конфигурации

4) стрингер с отверстием в виде овального окна (фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ), обрабатываемый в зоне отверстия методом выштамповки лунок сегментной конфигурации (глубина выштамповки  $h = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$  мм) (рисунок 3.26);

5) стрингер с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ) (рисунок 3.27);

6) стрингер с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ), обрабатываемый в зоне отверстий (рисунок 3.27):

- методом дорнования стенок отверстий с относительным натягом 3%;
- методом раскатки стенок отверстий с относительным натягом 0,6%;

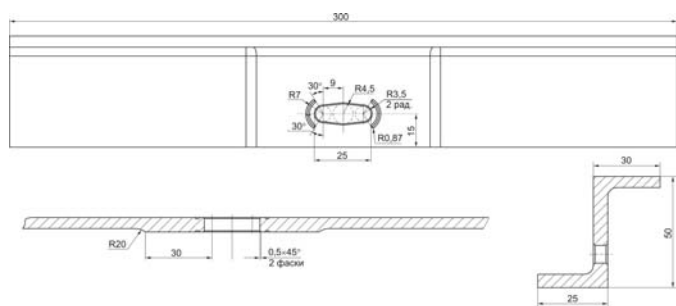


Рисунок 3.26 – Образец стрингера с отверстием в виде овального окна, обрабатываемого методом выштамповки лунок сегментной конфигурации

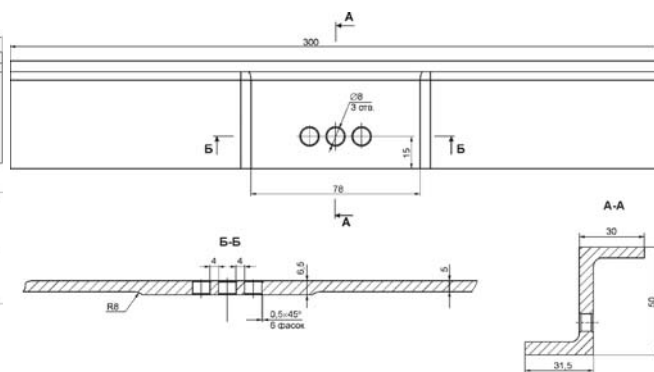


Рисунок 3.27 – Образец стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм)

7) стрингер с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ), обрабатываемый методом выштамповки лунок сегментной конфигурации (глубина выштамповки  $h = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$  мм) (рисунок 3.28);

8) стрингер с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм (фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ) и перемычкой между отверстиями 4 мм, обрабатываемый методом цилиндрического обжатия на глубину 0,2 мм (рисунок 3.27).

Материал стрингера – алюминиевый сплав 1163Т.

Материал дорна – сталь ХВГ ГОСТ 5950-73. Материал обжимок – сталь У8А ГОСТ 1345-90. Характеристики этих материалов приведены в разделе 2.

Материал втулки, применяемой при дорновании через технологическую втулку, – сталь ВНС 5, обладающая следующими характеристиками: модуль упругости  $E = 2000$  МПа, предел текучести  $\sigma_m = 1400$  МПа, предел прочности при растяжении  $\sigma_g = 1600$  МПа, относительное удлинение при разрыве  $\delta = 9\%$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ .

Величина эксплуатационных напряжений при численных исследованиях

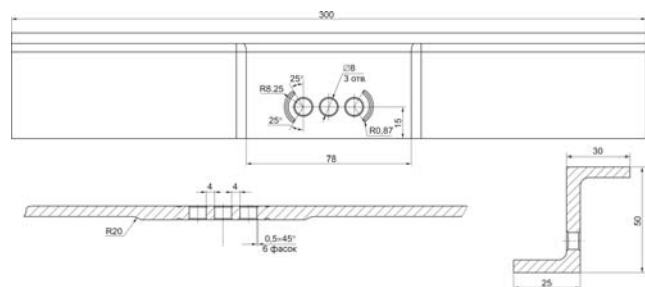


Рисунок 3.28 – Образец стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), обрабатываемого в зоне отверстий методом выштамповки лунок сегментной конфигурации

$\sigma_{\bar{\sigma}p} = 0; 100; 130; 150$  МПа.

Расчетная модель стрингера с отверстиями представляет собой пространственную балку, закрепленную по торцам, расчетной схемой которой является массив – элемент твердого деформируемого тела. Выбор данной расчетной схемы обусловлен особенностью решаемой задачи – определением локального НДС стрингера в зоне отверстий, в которой имеет место объемное НДС, описываемое девятью компонентами вектора напряжений. Причем изменение компонентов вектора напряжения по всем трем направлениям весьма существенно при выполнении расчета.

По одному из торцов стрингера моделируется жесткое закрепление (отсутствуют перемещения по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ), а по другому – закрепление предусматривает возможность перемещения вдоль оси  $X$ , тем самым моделируется приложение растягивающих нагрузок.

При рассмотрении каждого из методов упрочнения моделируется контактное взаимодействие инструмента с соответствующими участками стрингера. Модель контактного взаимодействия типа «поверхность-поверхность» учитывает трение между соприкасающимися частями конструкции [88].

Коэффициент трения принят равным 0,12.

На рисунке 3.29 в качестве примера представлена расчетная схема стрингера (рисунок 3.27) с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм, расстояние между центрами отверстий – 12 мм (перемычка между отверстиями – 4 мм).



Рисунок 3.29 – Расчетные схема стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм

Для проведения численных исследований характеристик локального НДС стрингера с отверстиями в системе Siemens NX созданы трехмерные геометрические модели образцов стрингеров и технологического инструмента, предназначенного для обработки стрингеров в зоне отверстий.



При создании модели учтена специфика решаемой задачи – определение локального НДС в зоне отверстий, а именно эти зоны являются зонами концентрации напряжений и вероятного усталостного разрушения. В данных зонах предполагается резкое изменение напряжений. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость построения мелкой упорядоченной сетки в зоне отверстий, позволяющей уловить градиенты напряжений.

Учитывая указанные выше особенности, трехмерные модели стрингеров с отверстиями созданы с локальными геометрическими зонами. Метод зонирования расчетной конструкции позволяет получить различную плотность разбивки в отдельных зонах, тем самым оптимизировать общее количество элементов в модели при соблюдении заданной степени дискретизации областей вокруг отверстий. Созданные геометрические модели стрингеров послужили основой для построения конечно-элементных моделей.

Конечно-элементная модель стрингера состоит из таких же элементов, которые были применены при расчете НДС полос с отверстиями – SOLID95 и SOLID45.

SOLID95 представляет собой трехмерный 20-узловой изопараметрический элемент твердого деформируемого тела, обладающий тремя степенями свободы в каждом узле [86]. Выбор данного типа элемента для данной зоны обусловлен необходимостью дискретизации области больших градиентов напряжений. Данный элемент имеет серединные узлы, следовательно, его функция перемещений описывается квадратичным полиномом, а функция напряжений и деформаций линейна. Это позволяет более точно аппроксимировать криволинейные границы отверстий с помощью данного элемента при большем размере ребер элемента, чем в случае применения элемента без серединных узлов SOLID45, у которого функция перемещения линейна, а следовательно, напряжения и деформации в пределах одного элемента постоянны.

Важную роль при построении конечно-элементной сетки следует уделить выбору формы и размеров элементов в зонах вероятной концентрации напряжений.

Отработку выбора размера конечного элемента (количества разбиений на соответствующих линиях) выполнили при расчете НДС полос с отверстиями.

Для каждого из рассматриваемых методов обработки стрингеров в зоне отвер-

ствий были построены конечно-элементные модели стрингеров и соответствующего технологического инструмента (см. рисунки 3.11 – 3.14, 3.30 – 3.39).

Основой для построения конечно-элементных моделей послужили трехмерные модели стрингеров и деформирующих элементов, созданные в системе Siemens NX и переданные в систему ANSYS.

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

При анализе НДС стрингеров параметры, характеризующие НДС, критерии, характеризующие усталостную долговечность конструктивных элементов, приняты такие же, как и при расчете полос с отверстиями.

Для оценки параметров повреждающего цикла используются, как и в случае полос с отверстиями, величины максимальных главных напряжений, деформаций и энергии деформирования. В нашем случае – это главные растягивающие напряжения  $\sigma_1$  и деформации  $\varepsilon_1$ , а также их произведение. При этом за минимальное значение напряжений и деформаций повреждающего цикла принимали соответствующие значения напряжений и деформаций после разгрузки. Оценку повреждающего действия циклического изменения внешних нагрузок в конструкции проводят путем пересчета циклического изменения локальных главных растягивающих напряжений и деформаций в напряжения и деформации эквивалентного отнулевого цикла и их последующего сравнения между собой.

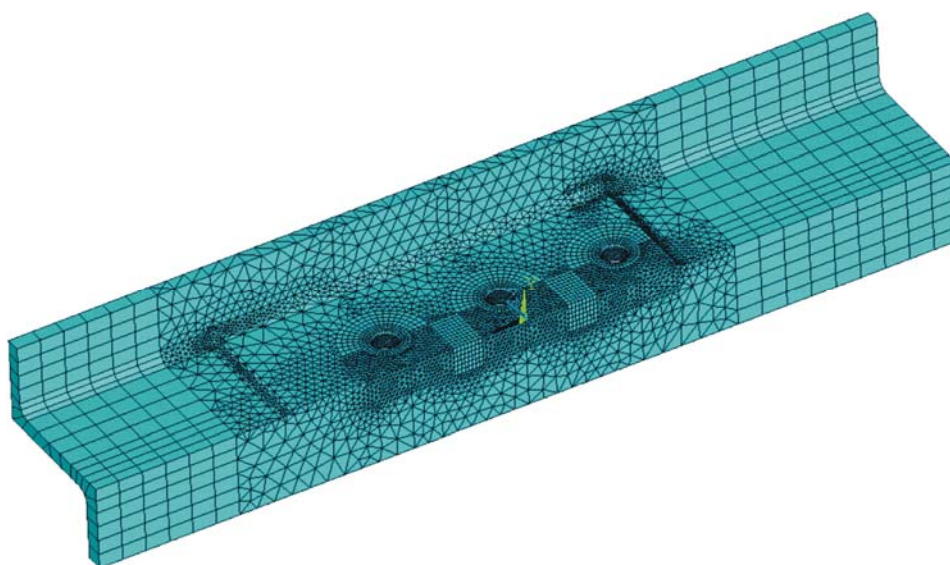


Рисунок 3.30 – Конечно-элементная модель стрингера с тремя отверстиями (расстояние между центрами отверстий – 40 мм)

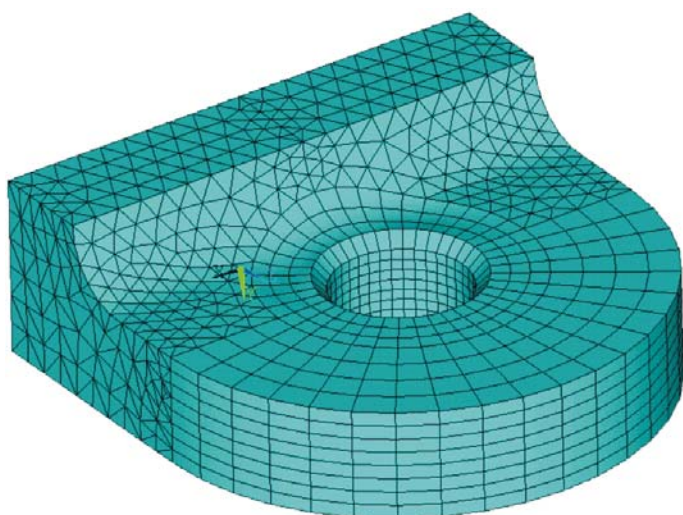


Рисунок 3.31 – Фрагмент конечно-элементной модели стрингера в зоне отверстий

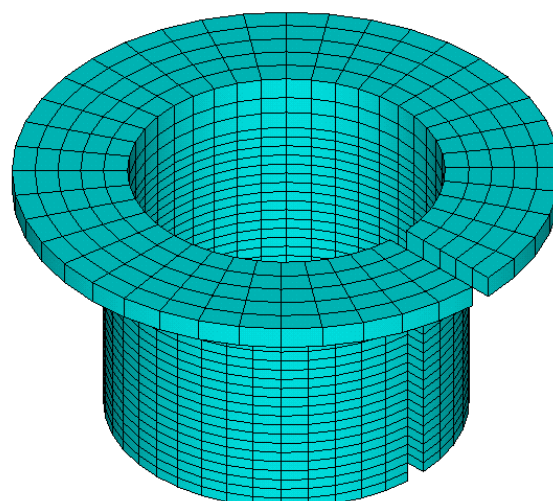


Рисунок 3.32 – Конечно-элементная модель технологической втулки

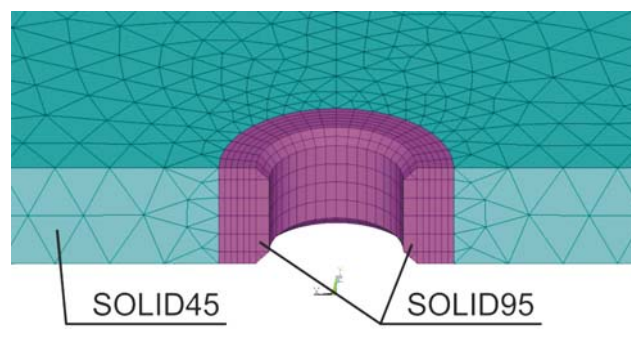
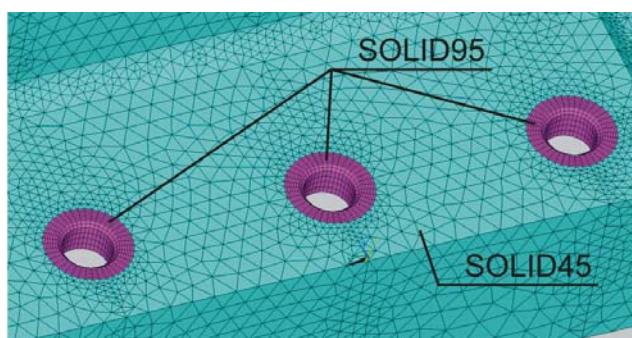


Рисунок 3.33 – Фрагмент конечно-элементной модели стрингера в зоне отверстий с указанием зон, разбиваемых элементами SOLID45 и SOLID95

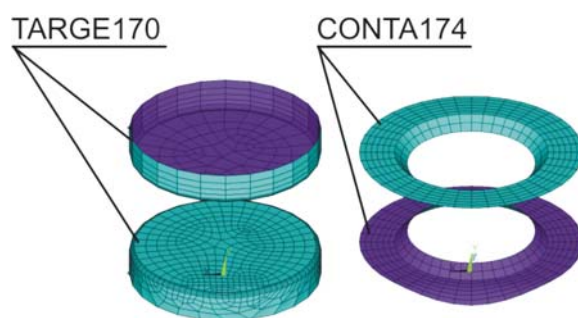
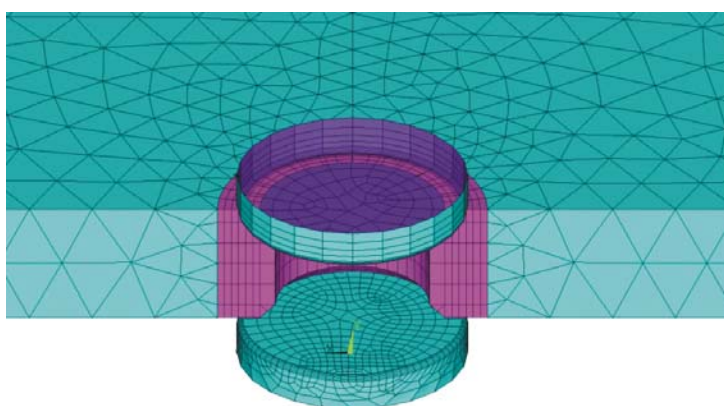


Рисунок 3.34 – Фрагмент конечно-элементной модели стрингера в зоне функциональных отверстий и обжимки для цилиндрического обжатия

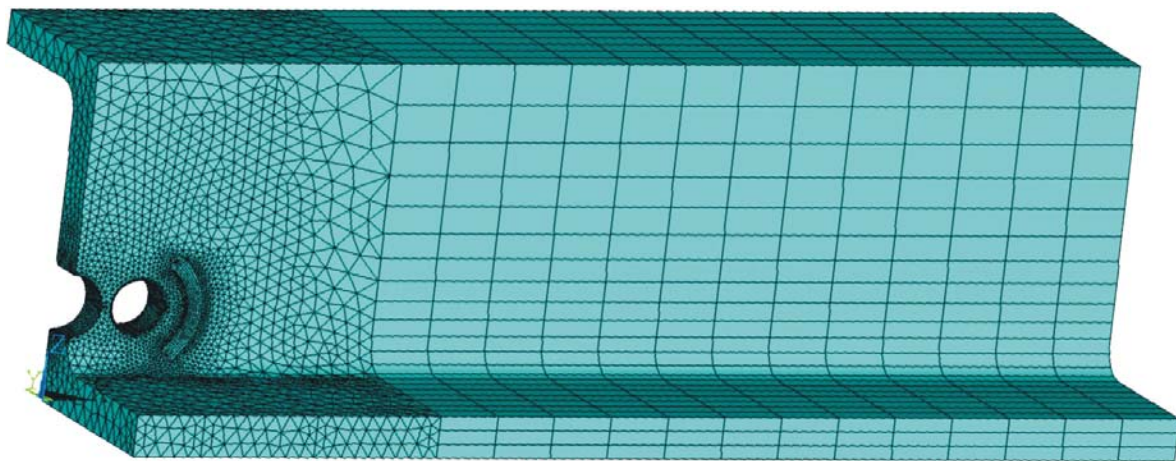


Рисунок 3.35 – Конечно-элементная модель стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 7,5 - 9 - 7,5$  мм для перетекания топлива, обработанного в зоне отверстий методом выштамповки лунок сегментной конфигурации

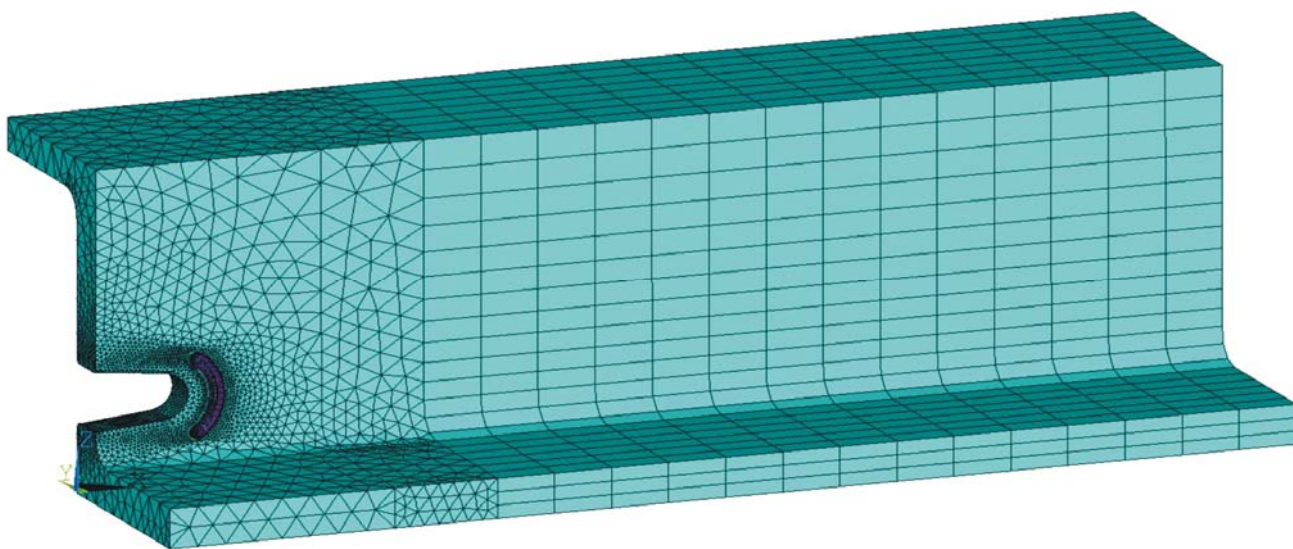


Рисунок 3.36 – Конечно-элементная модель стрингера с отверстием в виде овального окна, обрабатываемого методом выштамповки лунок сегментной конфигурации

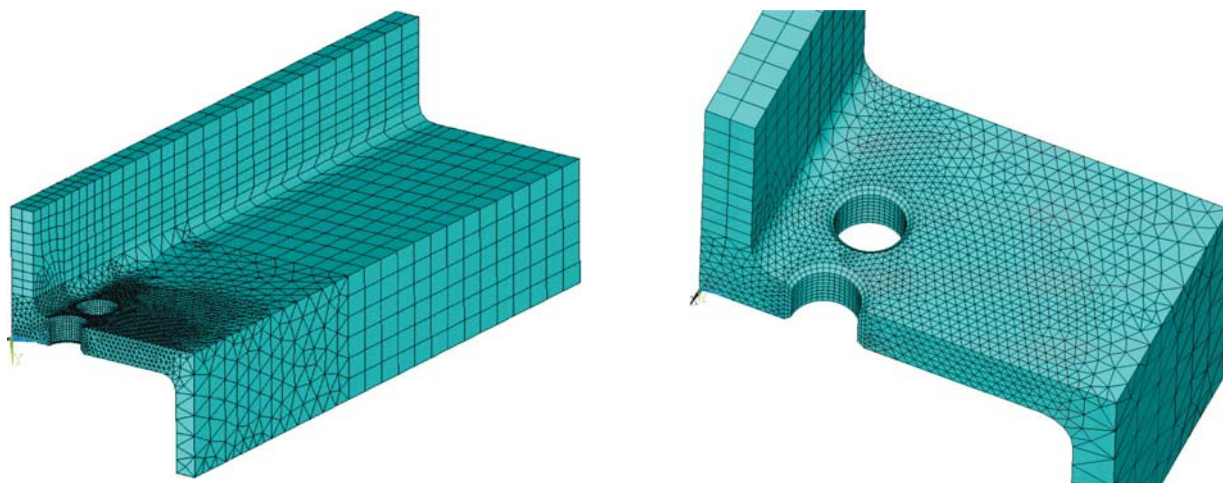


Рисунок 3.37 – Конечно-элементная модель стрингера с тремя отверстиями диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм)

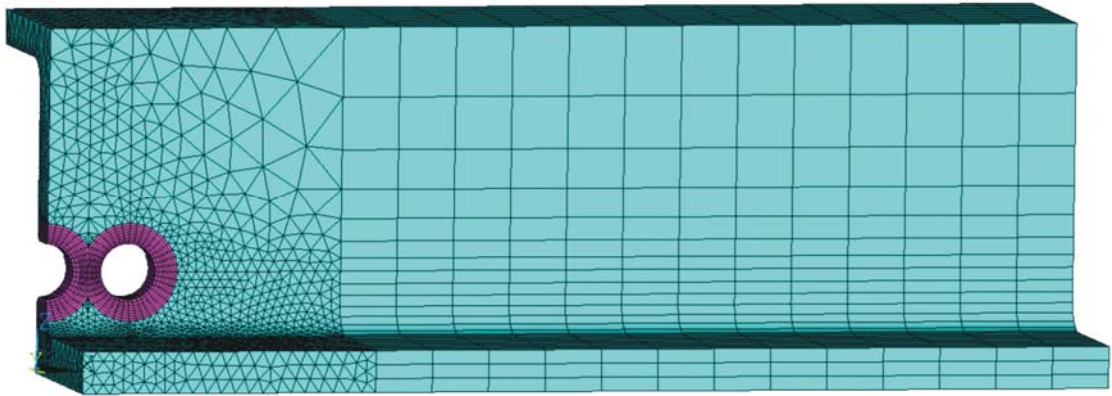


Рисунок 3.38 – Конечно-элементная модель стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), обрабатываемого методом цилиндрического обжатия на глубину 0,2 мм

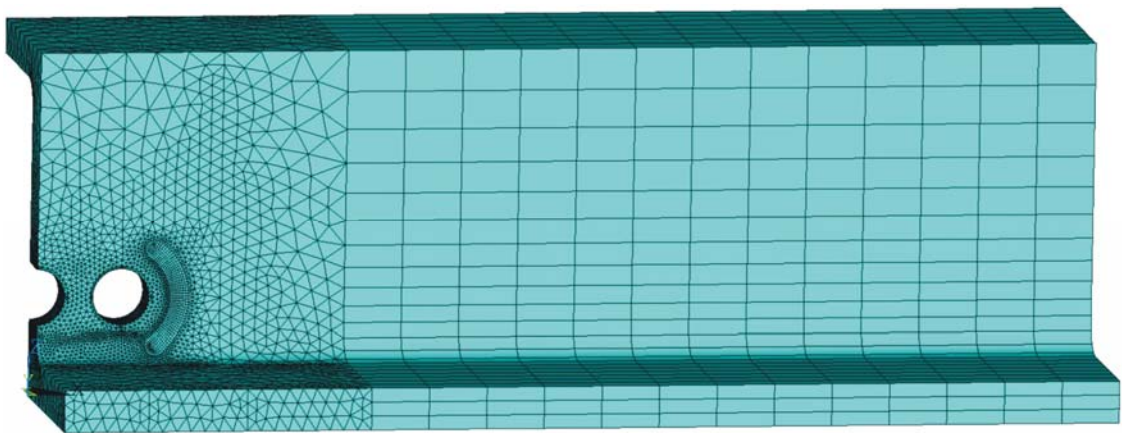


Рисунок 3.39 – Конечно-элементная модель стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), обрабатываемого методом выштамповки лунок сегментной конфигурации

Анализ эффективности применения рассматриваемых методов обработки проводили путем сравнения соответствующих значений коэффициентов концентрации напряжений, деформаций, удельной энергии деформирования, а также и величин максимальных главных напряжений, деформаций и энергии деформирования. При расчете амплитуды деформаций рассматривают упругую составляющую деформаций, поскольку именно она сильно изменяется в процессе циклического нагружения. Расчет указанных параметров проводят в точках максимального изменения амплитуды напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования. Для определения точек максимального изменения амплитуды напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования необходимо проанализировать характер изменения амплитуды напряжений и деформаций эквивалентного отнулевого цикла вдоль путей, расположенных в опасных сечениях конструктивных элементов.

Для стрингеров с тремя отверстиями при обработке стрингеров в зоне отверстий дорнованием, раскаткой стенок отверстий, дорнованием через технологическую втулку – это пути в сечении по оси крайнего отверстия (рисунок 3.40). При обработке стрингера в зоне отверстий методом барьерного обжатия дополнительно необходимо рассмотреть пути в сечении по оси центрального отверстия и в сечении в вершине сегментной лунки (рисунок 3.41).

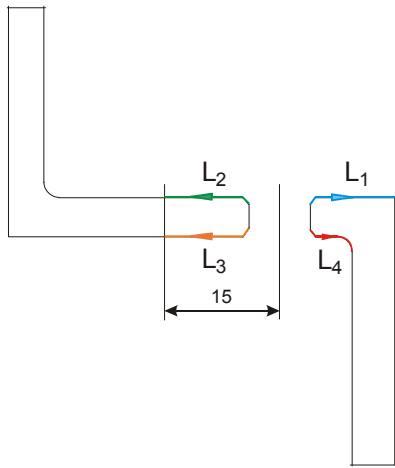


Рисунок 3.40 – Схема индикации путей L

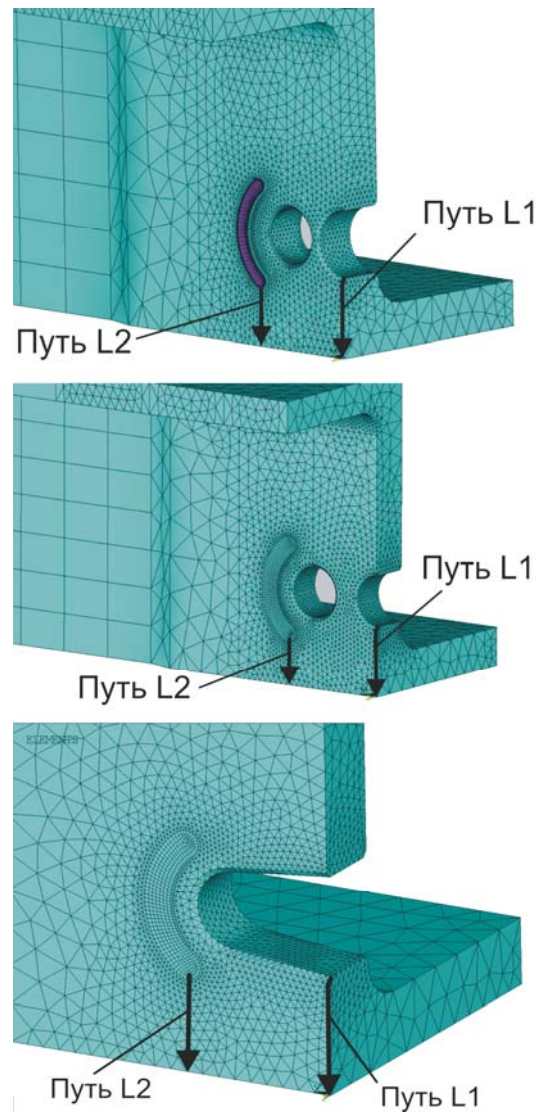


Рисунок 3.41 – Схема индикации дополнительных путей L1 и L2

В результате численных исследований установлено, следующее:

1) обработка стрингера с тремя отверстиями (расстояние между центрами отверстий  $l = 40$  мм), методом раскатки стенок отверстий (относительный натяг при раскатке – 0,4; 0,6%) приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси отверстия в 1,05 – 1,1 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,01 – 1,05 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,02 – 1,2 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,01 – 1,05 раза, максимальных деформаций в 1 – 1,05 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 1 – 1,1 раза по сравнению со стрингером с тремя отверстиями ( $l = 40$  мм);

2) обработка стрингера с тремя отверстиями ( $l = 40$  мм) методом дорнования стенок отверстий (относительный натяг при дорновании 1, 2 и 3%) приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси отверстия в

1,17 – 1,42 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,3 – 1,7 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,65 – 2,45 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,3 – 2,2 раза, максимальных деформаций в 1,2 – 2,6 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 1,3 – 4 раза по сравнению со стрингером с тремя отверстиями ( $l = 40$  мм);

3) обработка стрингера с тремя отверстиями ( $l = 40$  мм) методом дорнования через технологическую втулку (относительный натяг при дорновании 2 и 3%) приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси отверстия в 1,05 – 1,3 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,01 – 1,05 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,65 – 2,45 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,01 – 1,6 раза, максимальных деформаций в 1,2 – 1,5 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 1,01 – 1,8 раза по сравнению со стрингером с тремя отверстиями ( $l = 40$  мм);

4) обработка стрингера с тремя отверстиями ( $l = 40$  мм) методом цилиндрического обжатия (глубина обжатия 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 мм) приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси отверстия в 1,5 – 1,7 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,18 – 1,29 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,7 – 2,14 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,78 – 2,1 раза, максимальных деформаций в 1,55 – 2 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 3,1 – 3,9 раза по сравнению со стрингером с тремя отверстиями ( $l = 40$  мм);

5) обработка стрингера в зоне отверстий методом выштамповки лунок сегментной конфигурации (глубина обжатия 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 мм) приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений (для вариантов стрингеров: с тремя отверстиями  $\varnothing 7,5-9-7,5$  мм, перемычкой 1,5 мм; с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм, перемычкой 4 мм; овального окна) в сечении по оси отверстия в 1,4 – 2,2 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,7 – 1,93 раза и коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,16 – 3,03 раза, а также к снижению максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,05 – 1,9 раза, максимальных деформаций в 1,55 – 2 раза и максимальной удельной энергии деформирования в 3,1 – 3,9 раза по сравнению со стрингером без обжатия в зоне отверстий;

6) обработка стрингера с тремя отверстиями ( $l = 12$  мм) методом дорнования стенок отверстий с относительным натягом 3% приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси отверстия в 1,03 – 1,22 раза, коэффициента концентрации деформаций в 1,07 – 1,09 раза, коэффициента концентрации удельной энергии деформирования в 1,2 – 1,24 раза; максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,59 – 1,8 раза, максимальных деформаций в 1,5 – 1,68 раза, максимальной удельной энергии деформирования в 3,53 – 4,03 раза по сравнению со стрингером с тремя отверстиями ( $l = 12$  мм);

7) обработка стрингера с тремя отверстиями ( $l = 12$  мм) методом цилиндрического обжатия на глубину 0,2 мм приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений в сечении по оси отверстия в 1,1 – 1,2 раза при  $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 130$  и 150 МПа (при  $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 100$  МПа наблюдается увеличение коэффициента концентрации напряжений в 1,1 раза), коэффициента концентрации деформаций в 1,03 раза при  $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 150$  МПа (при  $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 100$  МПа коэффициент увеличивается в 1,17 раза), коэффициент концентрации удельной энергии деформирования в 1 – 1,1 раза при  $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 130, 150$  МПа (при  $\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 100$  МПа коэффициент увеличивается в 1,36 раза), максимальных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,55 – 1,57 раза, максимальных деформаций в 1,46 – 1,55 раза, максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в 2,38 – 2,47 раза по сравнению со стрингером с тремя отверстиями ( $l = 12$  мм).

Для определения эффективности рассматриваемых методов обработки в качестве критериев применяем величины максимальных главных напряжений и деформаций эквивалентного отнулевого цикла и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла, которые являются критериями оценки характеристик сопротивления усталости конструктивных элементов, подверженных предварительной обработке в зоне отверстий.

На рисунках 3.42 – 3.44 представлены диаграммы, показывающие влияние конструктивных параметров стрингеров и методов обработки стрингеров в зоне отверстий, на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла. На рисунках цифрами обозначены значения удельной энергии деформирования:

1 – в полосе с отверстием,  $B/d = 6$ ;

2 – стрингере с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм:

2.1 – расстояние между центрами отверстий  $l = 40$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ;

2.2 – расстояние между центрами отверстий  $l = 40$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ;



- 3 – стрингере с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 40$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ), обработанном в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом: 3.1 –  $\delta = 1\%$ ; 3.2 –  $\delta = 2\%$ ; 3.3 –  $\delta = 3\%$ ;
- 4 – стрингере с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 40$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ), обработанном в зоне отверстий дорнованием через технологическую втулку с относительным натягом: 4.1 –  $\delta = 2\%$ ; 4.2 –  $\delta = 3\%$ ,
- 5 – стрингере с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 40$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ), обработанном в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий с относительным натягом: 5.1 –  $\delta = 0,4\%$ ; 5.2 –  $\delta = 0,6\%$ ;
- 6 – стрингере с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 40$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ), обработанном в зоне отверстий выштамповкой концентрических площадок вокруг кромки отверстия (диаметр выштамповки – 12 мм), глубина выштамповки: 6.1 –  $h = 0,2$  мм; 6.2 –  $h = 0,3$  мм; 6.3 –  $h = 0,4$  мм; 6.4 –  $h = 0,5$  мм;
- 7 – стрингере с тремя отверстиями  $\varnothing 7,5-9-7,5$  мм (фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ), обработанном в зоне отверстий методом выштамповки лунок сегментной конфигурации, глубина выштамповки: 7.1 –  $h = 0,2$  мм; 7.2 –  $h = 0,3$  мм; 7.3 –  $h = 0,4$  мм; 7.4 –  $h = 0,5$  мм;
- 8 – стрингере с отверстием в виде овального окна (фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ), обработанном в зоне отверстия методом выштамповки лунок сегментной конфигурации, глубина выштамповки: 8.1 –  $h = 0,2$  мм; 8.2 –  $h = 0,3$  мм; 8.3 –  $h = 0,4$  мм; 8.4 –  $h = 0,5$  мм;
- 9 – стрингере с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 12$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ ), обработанном методом выштамповки лунок сегментной конфигурации, глубина выштамповки: 9.1 –  $h = 0,2$  мм; 9.2 –  $h = 0,3$  мм; 9.3 –  $h = 0,4$  мм; 9.4 –  $h = 0,5$  мм;
- 10 – стрингере с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 12$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ), обработанном в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом  $\delta = 3\%$ ;
- 11 – стрингере с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 12$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ), обработанном методом цилиндрического обжатия на глубину 0,2 мм;
- 12 – стрингере с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 12$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ ), обработанном в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий с относительным натягом  $\delta = 0,6\%$ .

Для выбора значений технологических параметров обработки стрингеров (глубина обжатия, относительный натяг при дорновании) в зоне отверстий проведено исследование их влияния на изменение удельной энергии деформирования.

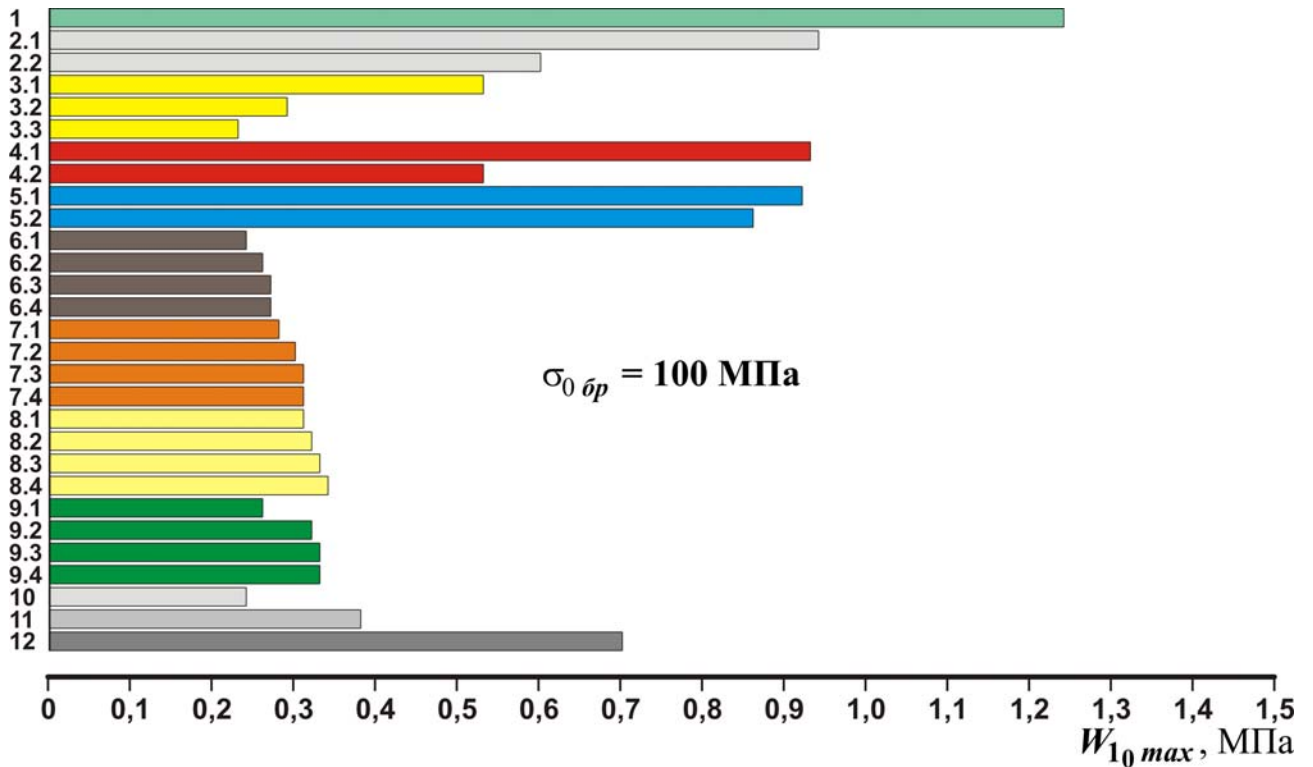


Рисунок 3.42 – Влияние конструктивных параметров стрингера и методов обработки стрингеров в зоне отверстий на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла при уровне нагружения  $\sigma_{0 \text{ } \delta p} = 100 \text{ МПа}$

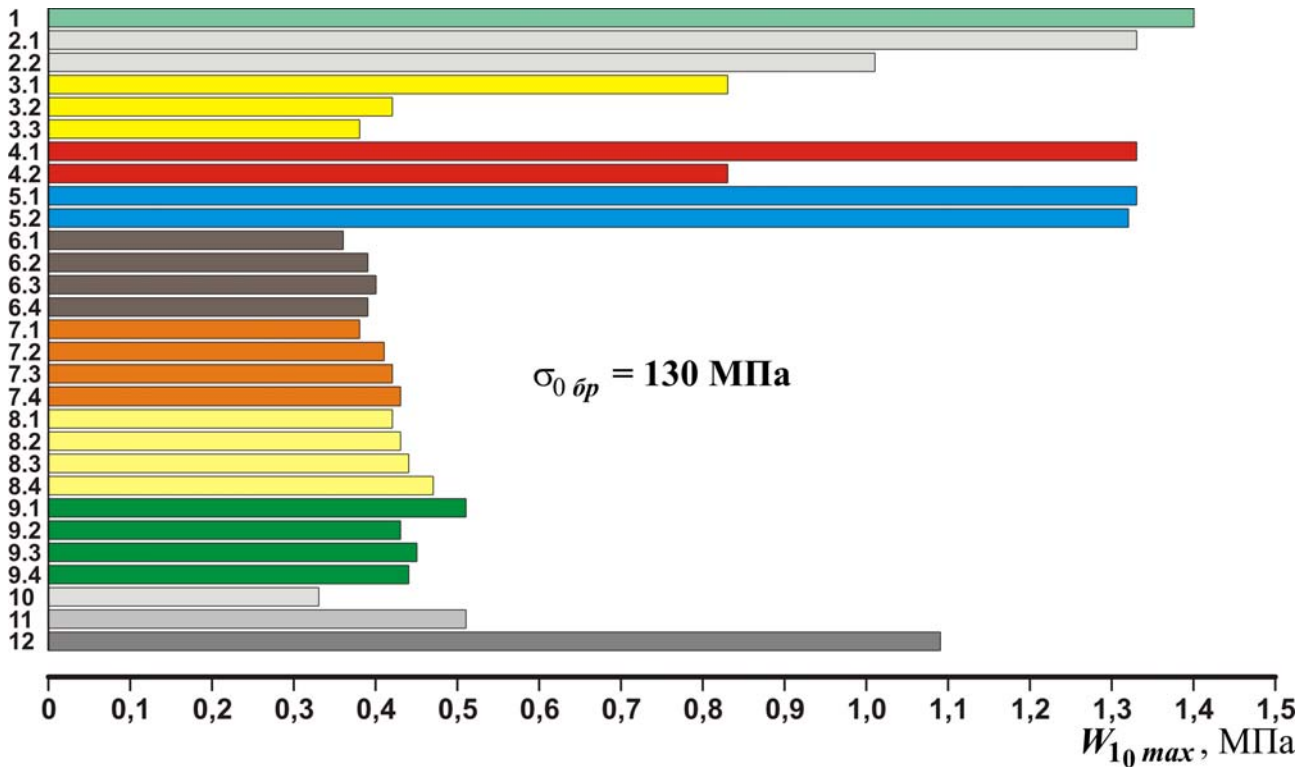


Рисунок 3.43 – Влияние конструктивных параметров стрингера и методов обработки стрингеров в зоне отверстий на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла при уровне нагружения  $\sigma_{0 \text{ } \delta p} = 130 \text{ МПа}$

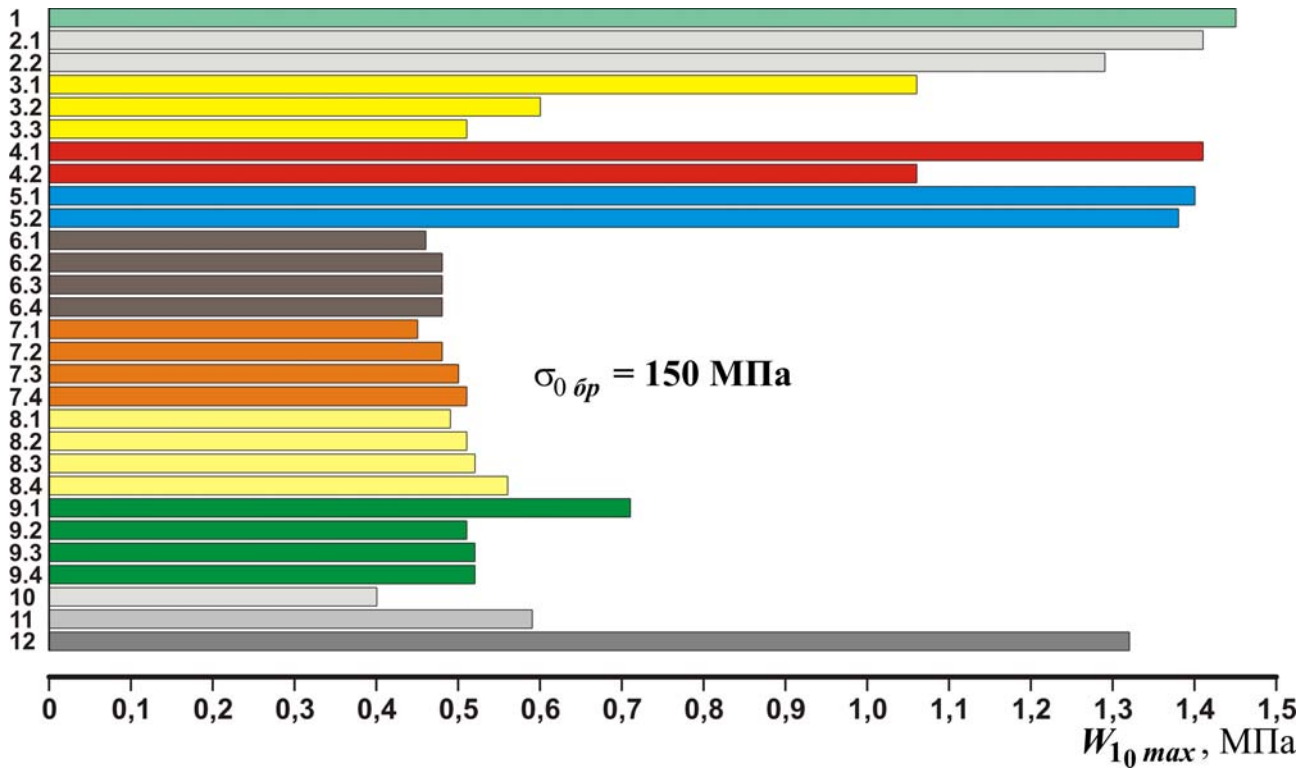


Рисунок 3.44 – Влияние конструктивных параметров стрингера и методов обработки стрингеров в зоне отверстий на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла при уровне нагружения  $\sigma_{0 dp} = 150$  МПа

На рисунках 3.45 – 3.51 показано влияние технологических параметров на изменение удельной энергии деформирования для различных вариантов стрингеров.

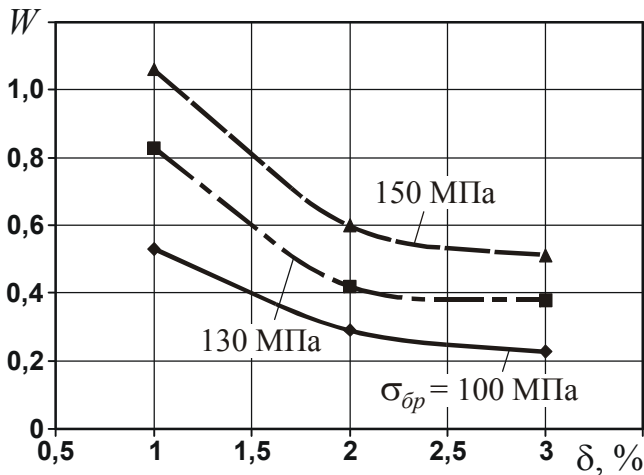


Рисунок 3.45 – Влияние относительного натяга при дорновании на изменение удельной энергии деформирования стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 40$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ )

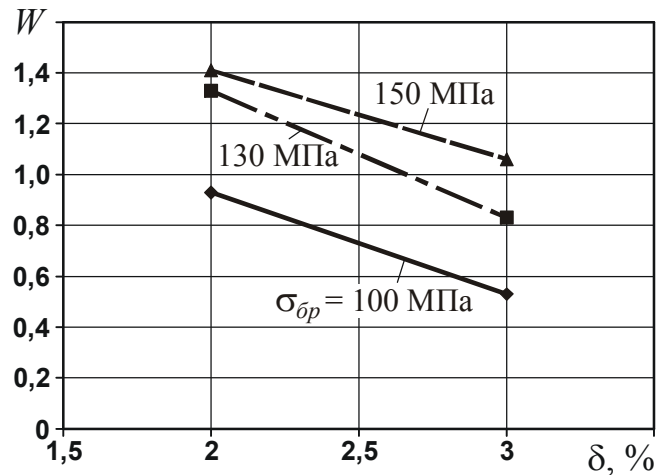


Рисунок 3.46 – Влияние относительного натяга при дорновании через технологическую втулку на изменение удельной энергии деформирования стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 40$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ )

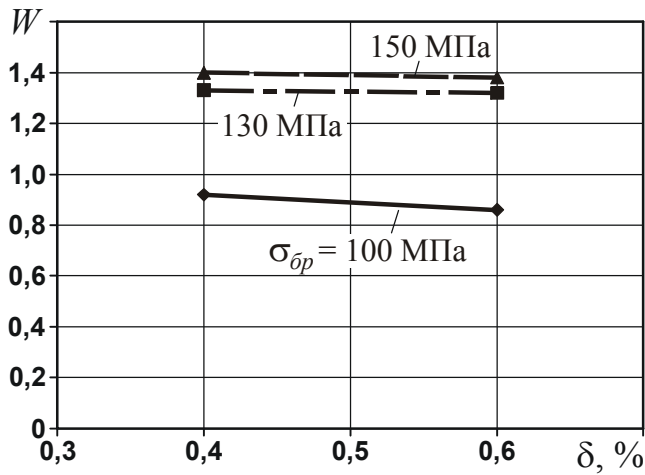


Рисунок 3.47 – Влияние относительного натяга при раскатке на изменение удельной энергии деформирования стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 40$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ )

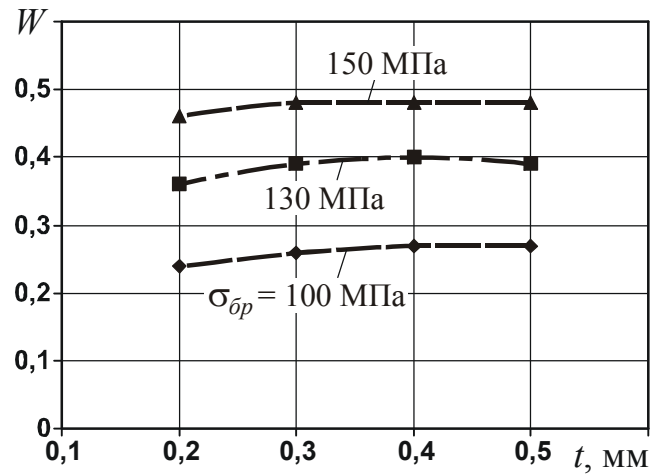


Рисунок 3.48 – Влияние глубины цилиндрического обжата на изменение удельной энергии деформирования стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 40$  мм, фаска  $0,8 \times 45^\circ$ )

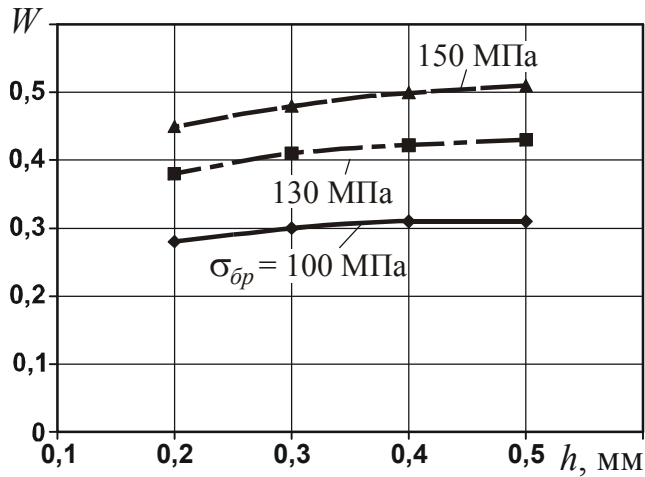


Рисунок 3.49 – Влияние глубины барьерного обжата на изменение удельной энергии деформирования стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 7,5-9-7,5$  мм (фаска  $0,5 \times 45^\circ$ )

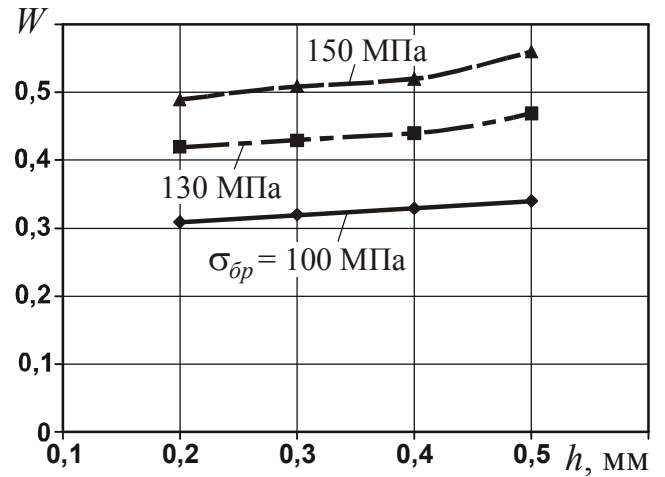


Рисунок 3.50 – Влияние глубины барьерного обжата на изменение удельной энергии деформирования стрингера с отверстием в виде овального окна (фаска  $0,5 \times 45^\circ$ )

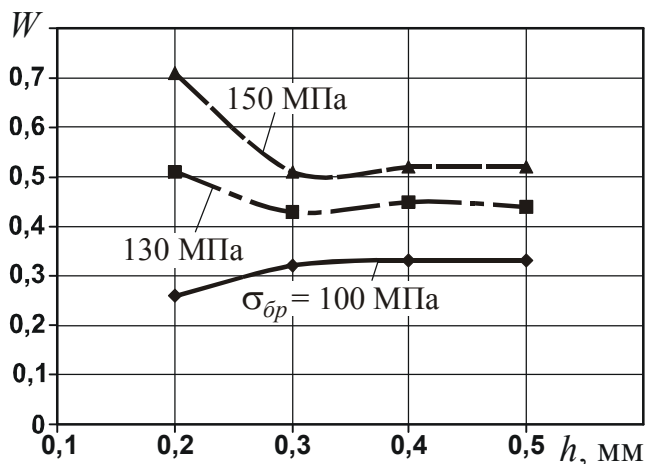


Рисунок 3.51 – Влияние глубины барьерного обжата на изменение удельной энергии деформирования стрингера с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм ( $l = 12$  мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ )

### 3.3. ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ

1. Исследовано влияние раскатки, дорнования и барьерного обжатия полосы в зоне системы функциональных отверстий на характеристики ее локального напряженно-деформированного состояния с помощью системы CAD\CAE ANSYS. Установлено что применение указанных методов обработки приводит к снижению максимальной удельной энергии деформирования в 1,03 – 3,9 раза по сравнению с полосой с одним отверстием и в 1,03 – 4,75 раза по сравнению с полосой с системой отверстий.

2. Исследовано влияние величины утолщения, формы отверстий, расположения отверстий относительно друг друга, раскатки, дорнования и барьерного обжатия конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий на характеристики локального напряженно-деформированного состояния. Установлено что применение указанных конструктивных и технологических методов приводит к снижению максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в 1,1 – 3,9 раза по сравнению с базовыми вариантами.

3. В результате численных исследований конструктивно-технологических параметров полос и стрингеров с системой функциональных отверстий установлено:

- относительный натяг при дорновании стенок отверстий должен реализовываться с величиной 2...3%;
- относительный натяг при раскатке стенок отверстий незначительно влияет на изменение удельной энергии деформирования и может реализовываться с величиной 0,2...0,6%;
- глубина барьерного обжатия в исследованном диапазоне значений незначительно влияет на изменение удельной энергии деформирования и при обработке может составлять 0,2...0,6 мм.

4. По результатам численных исследований приняты в качестве базового конструктивного варианта выполнения отверстий вариант с тремя отверстиями диаметром 8 мм при шаге отверстий 12 мм и технологические методы обработки конструктивных элементов в зоне отверстий:

- раскатка стенок отверстий с относительным натягом 0,2 и 0,6%;
- дорнование стенок отверстий с относительным натягом 2 и 3%;
- барьерное обжатие в виде лунок сегментной конфигурации с глубиной обжатия 0,3 мм.

*Раздел 4***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ  
НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ**

---

**4.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСКАТКИ И ДОРНОВАНИЯ  
НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ПОЛОСЫ С ОТВЕРСТИЯМИ**

Статические испытания образцов полос с отверстиями проводились на гидравлической установке для усталостных и статических испытаний МУП-50 (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Установка для проведения усталостных и статических испытаний МУП-50

На статическое растяжение были испытаны полосы ( $B/d = 6$ ):

- с одним отверстием диаметром 8 мм;
- тремя отверстиями диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм);
- тремя отверстиями диаметром 8 мм, обработанные в зоне отверстий рас-

- каткой стенок отверстий с относительным натягом 0,2 и 0,6%;
- тремя отверстиями диаметром 8 мм, обработанные в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом 3,2%.

Разрушение образцов полос с одним отверстием диаметром 8 мм происходило в сечении по оси отверстия. Зоны и характер разрушений образцов показаны на рисунке 4.2. Среднее значение разрушающих напряжений  $\sigma_{бр\ ср} = 347$  МПа.

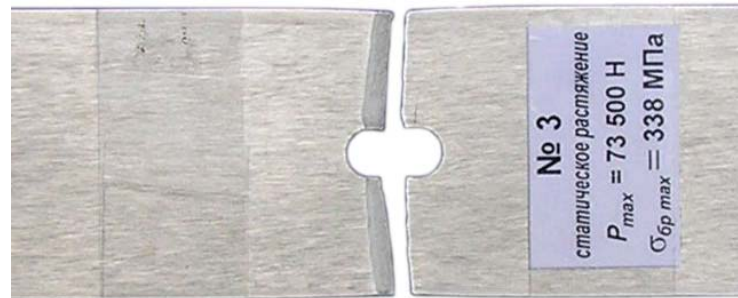


Рисунок 4.2 – Характер разрушения при статическом растяжении образцов полос с одним отверстием из прессованного профиля (материал Д16Т)

Разрушение образцов полос с тремя отверстиями диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), полос с тремя отверстиями обработанных в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,2 и 0,6%, дорнованием с относительным натягом 3,2% происходило по крайнему отверстию. Зоны и характер разрушений образцов показаны на рисунке 4.3.

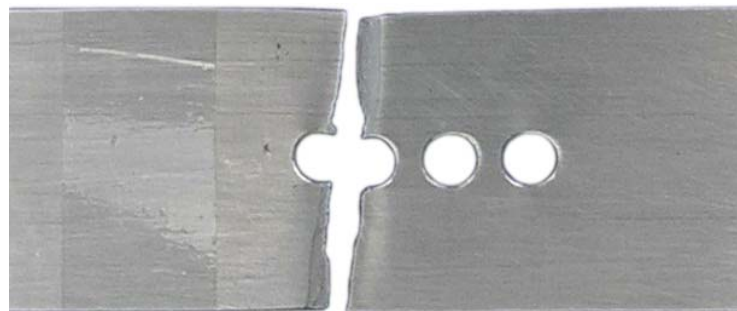


Рисунок 4.3 – Характер разрушения при статическом растяжении образцов полос с отверстиями

Среднее значение разрушающих напряжений составило:

- полоса с тремя отверстиями  $\sigma_{бр\ ср} = 358$  МПа;
- раскатка с относительным натягом 0,2%  $\sigma_{бр\ ср} = 393$  МПа;
- раскатка с относительным натягом 0,6%  $\sigma_{бр\ ср} = 357$  МПа;

– дорнование с относительным натягом 3,2% –  $\sigma_{\bar{b}p\ cр} = 397$  МПа.

В результате статических испытаний установлено:

- статическая прочность полосы с тремя отверстиями диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм,  $B/d = 6$ ) в 1,03 раза выше прочности полосы с одним отверстием;
- статическая прочность полосы с тремя отверстиями диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм,  $B/d = 6$ ), обработанной в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,2%, в 1,1 раза выше прочности полосы с тремя отверстиями;
- статическая прочность полосы с тремя отверстиями диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм,  $B/d = 6$ ), обработанной в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,6%, равна статической прочности полосы с тремя отверстиями;
- статическая прочность полосы с тремя отверстиями диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм,  $B/d = 6$ ), обработанной в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 3,2%, в 1,11 раза выше прочности полосы с тремя отверстиями.

Таким образом, статическая прочность полос при применении исследуемых конструктивно-технологических методов обработки не снижается по сравнению с прочностью полосы с отверстием.

#### 4.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСКАТКИ, ДОРНОВАНИЯ И БАРЬЕРНОГО ОБЖАТИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОЛОС С ТРЕМЯ ОТВЕРСТИЯМИ

Для экспериментальных исследований по определению характеристик усталости был разработан образец полосы ( $B/d = 6$ ) с тремя отверстиями диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм). Для устранения заусенцев, полученных после сверления отверстий, на всех отверстиях снята фаска  $0,5 \times 45^\circ$ . Толщина образца полосы – 4,6 мм.

Геометрические размеры заготовки для изготовления образцов для проведения усталостных испытаний показаны на рисунке 4.4. Форма и размеры образца



для проведения испытаний разработаны в соответствии с ГОСТ 25.502-79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов: методы испытания на усталость».

Заготовки образцов для проведения усталостных испытаний полос с отверстиями были изготовлены из прессованного швеллера (материал Д16Т) путем механического фрезерования по контуру.

Заготовка полосы для изготовления образцов полос с отверстиями для проведения усталостных испытаний показаны на рисунке 4.5.

Отверстия, обработка стенок отверстий раскаткой, дорнованием, барьерное обжатие полос в зоне отверстий в виде лунок сегментной конфигурации выполнялись по технологии, разработанной специалистами ГП «АНТОНОВ» и ОАО УкрНИИАТ.

Геометрические размеры полос, предназначенных для проведения усталостных испытаний, показаны на рисунке 2.81, б.

Испытания образцов полос проводились на электромеханической машине УММ-02 (см. рисунок 2.82). В испытательной установке образцы полос нагружали одноосными переменными циклическими нагрузками. Частота нагружения составляла 12 Гц.

Образцы полос испытывали на трех уровнях нагружения:

- 1)  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 100$  МПа;
- 2)  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа;
- 3)  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа.

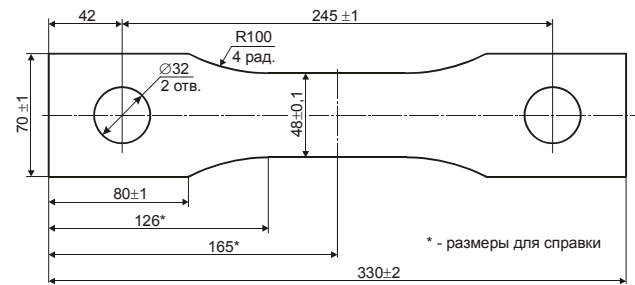


Рисунок 4.4 – Геометрические размеры заготовки для изготовления образцов полос



Рисунок 4.5 – Заготовка для изготовления образцов полос с отверстиями

***Влияние обработки стенок отверстий раскаткой на долговечность полос***

На уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 100$  МПа при обработке полосы в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,2% усталостное разрушение образца возникло по захватам от фреттинг-коррозии.

При обработке полосы в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,6% усталостное разрушение образцов происходило в сечении по оси крайнего отверстия, и оно возникало в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия или по захватам в зоне развития фреттинг-коррозии. Часть образцов не разрушилась, их испытания продолжились на более высоких уровнях нагружения для определения зон усталостного разрушения. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рисунке 4.6.

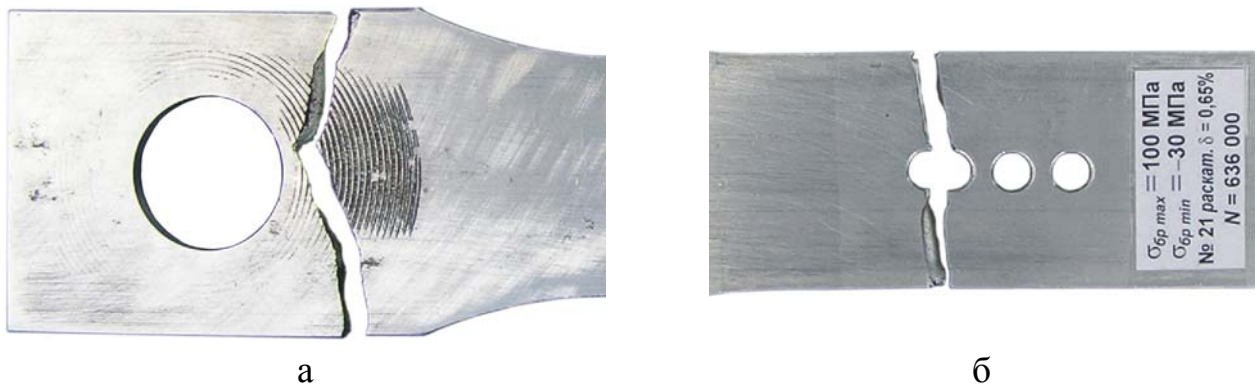


Рисунок 4.6 – Зоны и характер усталостного разрушения образцов полос с тремя отверстиями, обработанных в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,2 и 0,6% из прессованного профиля (материал Д16Т):

- а – разрушение в захватах от фреттинг-коррозии;
- б – разрушение в сечении по оси крайнего отверстия

На остальных уровнях нагружения усталостное разрушение полос с тремя отверстиями, обработанных в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий с относительным натягом 0,2 и 0,6%, происходило в сечении по оси крайнего отверстия, и возникало в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия. При этом среднее значение усталостной долговечности полосы с тремя отверстиями, обработанной в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий, составило:

при раскатке стенок отверстий с относительным натягом 0,2%:

- $\sigma_{\text{бр min}} = -30$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 100$  МПа –  $N = 2\,596\,000$  циклов нагружения;
- $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 130$  МПа –  $N_{\text{cp}} = 324\,500$  циклов нагружения;
- $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа –  $N_{\text{cp}} = 191\,000$  циклов нагружения;

при раскатке стенок отверстий с относительным натягом 0,6%:

- $\sigma_{\text{бр min}} = -30$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 100$  МПа –  $N_{\text{cp}} = 1\,963\,000$  цик. нагружения;
- $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 130$  МПа –  $N_{\text{cp}} = 328\,000$  циклов нагружения;
- $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа –  $N_{\text{cp}} = 173\,000$  циклов нагружения.

В результате испытаний установлено, что усталостная долговечность полосы с тремя отверстиями, обработанной раскаткой стенок отверстий, выше усталостной долговечности полосы с тремя отверстиями:

- на уровне нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 130$  МПа при относительном натяге 0,2 и 0,6% – в 2,3 раза;
- на уровне нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа при относительном натяге 0,2% – в 1,9 раза, при относительном натяге 0,6% – в 1,7 раза;
- на уровне нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = -30$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 100$  МПа при относительном натяге 0,2% – не менее чем в 6,7 раза; при относительном натяге 0,6% – не менее чем в 6,8 раза.

#### ***Влияние обработки стенок отверстий дорнованием на долговечность полос***

При обработке полос в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 3% на уровне нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = -30$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 100$  МПа усталостное разрушение образцов происходило как в сечении по оси крайнего отверстия в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия, так и по захватам от фреттинг-коррозии. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рисунке 4.7. Среднее значение усталостной долговечности составило  $N_{\text{cp}} = 850\,000$  циклов нагружения.

При испытаниях образцов полос, обработанных в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом 2 и 3%, на уровнях нагружения

$\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 130$  МПа и  $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа, усталостное разрушение образцов происходило в сечении по оси крайнего отверстия, и оно возникало в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия.

Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рисунке 4.7.

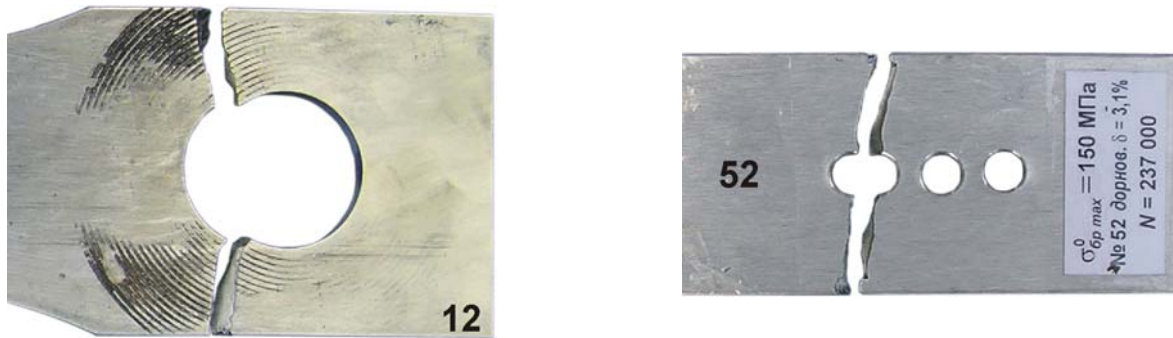


Рисунок 4.7 – Характер усталостного разрушения образцов полос с тремя отверстиями, обработанных в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом 2 и 3%, из прессованного профиля (материал Д16Т):

- а – разрушение в захватах от фреттинг-коррозии;
- б – разрушение в сечении по оси крайнего отверстия

Среднее значение усталостной долговечности полосы с тремя отверстиями, обработанной в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий, составило:

◆ при дорнование стенок отверстий с относительным натягом 2%:

- $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 130$  МПа –  $N_{\text{ср}} = 379\,500$  циклов нагружения;
- $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа –  $N_{\text{ср}} = 158\,000$  циклов нагружения.

◆ пр дорнование стенок отверстий с относительным натягом 3%:

- $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 130$  МПа –  $N_{\text{ср}} = 716\,000$  циклов нагружения;
- $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа –  $N_{\text{ср}} = 237\,000$  циклов нагружения.

В результате испытаний установлено, что усталостная долговечность полосы с тремя отверстиями, обработанной в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий, выше усталостной долговечности полосы с тремя неупрочненными отверстиями:

- на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 100$  МПа при относительном натяге 3% – в 2,2 раза;
- на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа при относительном натяге 2% – в 2,7 раза, при относительном натяге 3% – в 5,1 раза;
- на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа при относительном натяге 2% – в 1,6 раза, при относительном натяге 3% – в 2,4 раза.

***Влияние обработки стенок отверстий дорнованием и обжатием фасок затяжкой потайного болта на долговечность полос***

Дорнование стенок отверстий проводили с относительным натягом 2%. После этого было проведено обжатие фасок отверстий стальным болтом с потайной головкой  $\angle 90^\circ$  и прямым шлицем.

Обработка технологии обжатия фасок была выполнена на технологических образцах. Проводились установка болта в обработанное дорнованием отверстие, затяжка болтов с различными значениями крутящего момента гайки и измерялась глубина осадки головки болта. В результате этого было принято решение проводить обжатие фасок с  $M_{кр} = 1,5$  кг·м, при таком моменте осадка головки болта составляет 0,16...0,18 мм.

Обжатие фасок выполнялось следующим образом:

1. В центральное отверстие полосы вставлялся болт (рисунок 4.8).
  2. С обратной стороны на болт надевались стальная шайба, стальная втулка, еще одна стальная шайба и навинчивалась гайка.
  3. Затяжку гайки выполняли тарированным ключом. Момент затяжки болта составлял  $M_{кр} = 1,5$  кг·м. При этом глубина осадки головки болта составляла 0,16...0,18 мм. Во избежание проворачивания болта в отверстиях в шлиц болта вставляли отвертку и удерживали болт от вращения.
  4. После этого откручивали гайку и вынимали болт.
  5. По такой же схеме выполняли обжатие фасок крайних отверстий.
  6. Фаски обрабатывались с двух сторон полосы.
- Усталостные испытания дорнованных образцов с обжатыми фасками прово-

дились на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа.

Усталостное разрушение образцов происходило как в сечении по оси крайнего отверстия, так и по захватам от фреттинг-коррозии. Среднее значение усталостной долговечности составило  $N_{cp} = 873\ 000$  циклов нагружения.

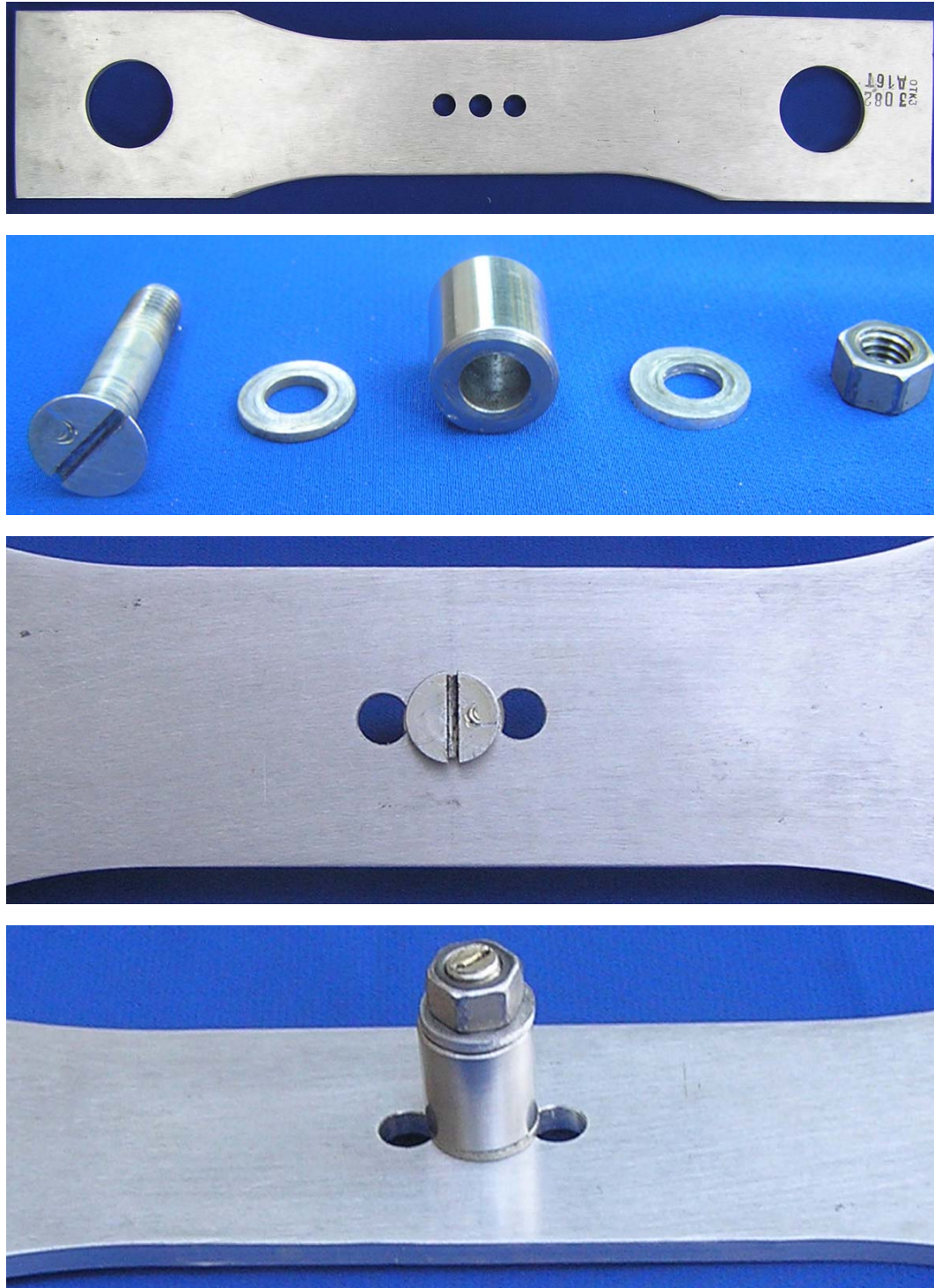


Рисунок 4.8 – Образец полосы с отверстием и элементы для обжатия фасок

В результате испытаний установлено, что усталостная долговечность полосы с

тремя отверстиями, обработанной в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 2% и обжатием фасок, выше усталостной долговечности полосы с тремя отверстиями на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа в 8,6 раза.

***Влияние обработки полосы в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации на долговечность полос***

При обработке полос в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации усталостное разрушение образцов возникло на поверхности образца в зоне крайнего отверстия и лунки, также образцы разрушались по захватам от фреттинг-коррозии.

Среднее значение усталостной долговечности полосы с тремя отверстиями, обработанной в зоне отверстий методом барьерного обжатия, составило:

- $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа      –  $N_{ср} = 716\ 000$  циклов нагружения;
- $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа      –  $N_{ср} = 335\ 000$  циклов нагружения.

Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Характер усталостного разрушения образцов полос с тремя отверстиями, обработанных в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, из прессованного профиля (материал Д16Т) на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа (а),

$$\sigma_{бр\ min} = 0 \text{ МПа, } \sigma_{бр\ max} = 150 \text{ МПа (б)}$$

В результате испытаний установлено, что усталостная долговечность полосы с тремя отверстиями, обработанной в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, выше усталостной долговечности полосы с тремя отверстиями на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,

$\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа – в 5 раз, на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа – в 3,3 раза.

***Влияние обработки полосы в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации и обжатия фасок отверстий на долговечность полос***

При обработке полос в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации и обжатия фасок отверстий усталостное разрушение образцов возникало на поверхности образца в зоне крайнего отверстия и лунки, в одном образце усталостное разрушение возникло от цилиндрической части крайнего отверстия.

При этом среднее значение усталостной долговечности полосы составило:

- $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа –  $N_{ср} = 433\ 000$  циклов нагружения;
- $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа –  $N_{ср} = 299\ 000$  циклов нагружения.

Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Характер усталостного разрушения образцов полос с тремя отверстиями, обработанных в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации и обжатием фасок, из пресованного профиля (материал Д16Т)

В результате испытаний установлено, что усталостная долговечность полосы с тремя отверстиями, обработанной в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации и обжатием фасок, выше усталостной долговечности полосы с тремя отверстиями на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа – в 3,1 раза, на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа – в 3 раза.

***Влияние обработки фасок отверстий на долговечность полос***

Испытания образцов полос проводили на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,



$\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа. Усталостное разрушение образцов происходило в сечении крайнего отверстия от цилиндрической части отверстия. В результате испытаний установлено, что на данном уровне нагружения усталостная долговечность ( $N_{\text{ср}} = 98\ 000$  циклов) полосы с тремя отверстиями, обработанной в зоне отверстий обжатием фасок отверстий, находится на одном уровне с усталостной долговечностью полосы с тремя отверстиями ( $N_{\text{ср}} = 101\ 000$  циклов).

### *Анализ результатов усталостных испытаний полос с отверстиями*

Анализ результатов усталостных испытаний полос с тремя функциональными отверстиями, обработанных в зоне отверстий позволяет записать аналитические выражения для кривых усталости:

- при обработке стенок отверстий раскаткой с относительным натягом 0,2%:

$$\sigma^{3.69299} N = 2,07643 \cdot 10^{13} \quad \text{или} \quad \sigma = 4.03744 \cdot 10^3 N^{-0.270783}.$$

- при обработке стенок отверстий раскаткой с относительным натягом 0,6%:

$$\sigma^{4.47043} N = 9,24922 \cdot 10^{14} \quad \text{или} \quad \sigma = 2.22742 \cdot 10^3 N^{-0.223692}.$$

- при обработке стенок отверстий дорнованием с относительным натягом 2%:

$$\sigma^{6.11416} N = 3.18877 \cdot 10^{18} \quad \text{или} \quad \sigma = 1.06257 \cdot 10^3 N^{-0.163555},$$

- при обработке стенок отверстий дорнованием с относительным натягом 3%:

$$\sigma^{5.42147} N = 1.54531 \cdot 10^{17} \quad \text{или} \quad \sigma = 1.48096 \cdot 10^3 N^{-0.184452},$$

- при обработке полос в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации:

$$\sigma^{5.14986} N = 5.39036 \cdot 10^{16} \quad \text{или} \quad \sigma = 1.77396 \cdot 10^3 N^{-0.19418},$$

где  $\sigma = \sigma_{0 \text{ бр max}}$ , МПа.

По данным аналитическим зависимостям построены графики кривых усталости для полос с отверстиями (рисунок 4.11).

На рисунках 4.12 – 4.14 показаны номограммы влияния методов обработки на усталостную долговечность полос с отверстиями.

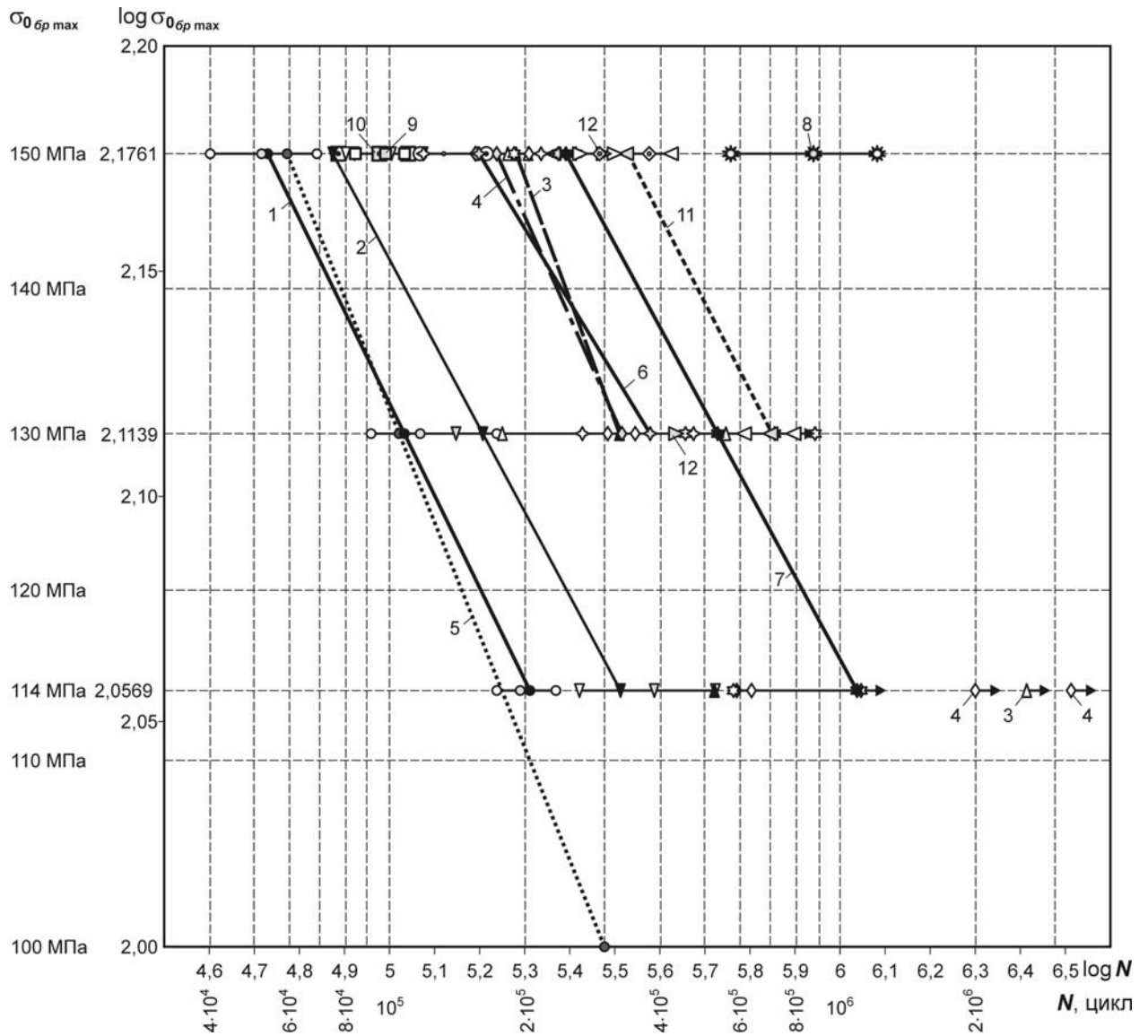


Рисунок 4.11 – Кривые выносливости полосы:

- 1 –  $\circ$  с одним отверстием ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм из материала Д16Т;
  - 2 –  $\nabla$  тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий  $l = 12$  мм);
  - 3 –  $\Delta$  тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм ( $l = 12$  мм), обработанной в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом  $\delta = 0,2\%$ ;
  - 4 –  $\diamond$  тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм ( $l = 12$  мм), обработанной в зоне отверстий раскаткой  $\delta = 0,6\%$ ;
  - 5 –  $\bullet$  одним отверстием ( $B/d = 6$ ) из материала Д16ЧТ, испытанной в ЦАГИ;
  - 6 –  $\blacklozenge$  тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм ( $l = 12$  мм), обработанной в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом  $\delta = 2\%$ ;
  - 7 –  $\star$  тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм ( $l = 12$  мм), обработанной в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 3%;
  - 8 –  $\star$  тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм ( $l = 12$  мм), обработанной в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 2% и обжатием фасок отверстий;
  - 9 –  $\square$  тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанной в зоне отверстий обжатием фасок;
  - 10 –  $\square$  тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанной в зоне отверстий раскаткой и обжатием фасок;
  - 11 –  $\blacktriangleleft$  тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм ( $l = 12$  мм), обработанной в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации без обжатия фасок;
  - 12 –  $\blacktriangleright$  тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм ( $l = 12$  мм), обработанной в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации и обжатием фасок;
- $\star \rightarrow$  – разрушение образцов от фреттинг-коррозии по захватам

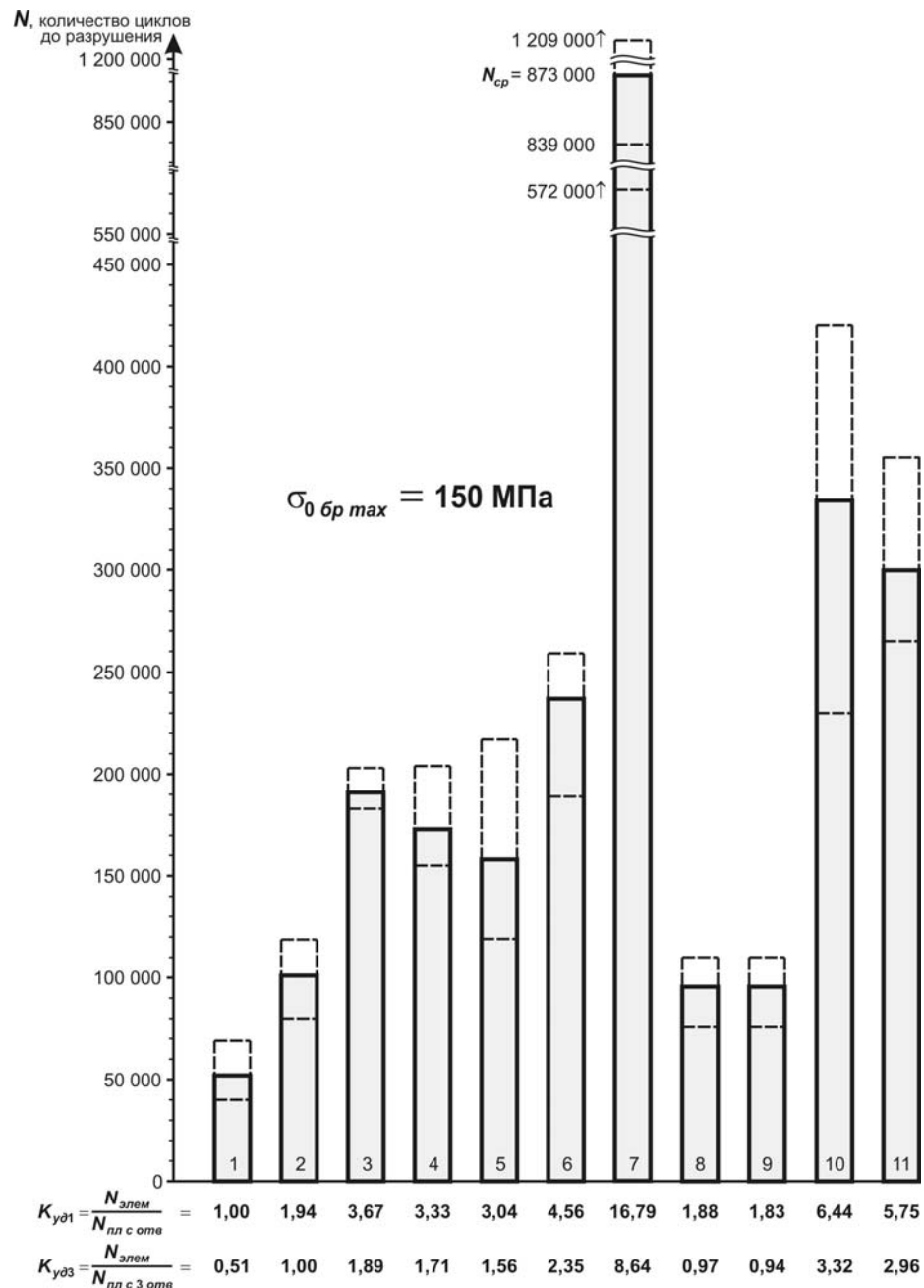


Рисунок 4.12 – Влияние количества отверстий, раскатки, дорнования, обжатия отверстий и обжатия фасок на долговечность полос при  $\sigma_{0 \text{ бр max}} = 150 \text{ МПа}$ :

- 1 – с одним отверстием ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм из материала Д16Т;
- 2 – тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм;
- 3 – тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,2%;
- 4 – тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,6%;
- 5 – тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 2%;
- 6 – тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 3%;
- 7 – тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 2% и обжатием фасок;
- 8 – тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий обжатием фасок;
- 9 – тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий раскаткой и обжатием фасок;
- 10 – тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм ( $l = 12 \text{ мм}$ ), обработанных в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации;
- 11 – тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм ( $l = 12 \text{ мм}$ ), обработанных в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации и обжатием фасок

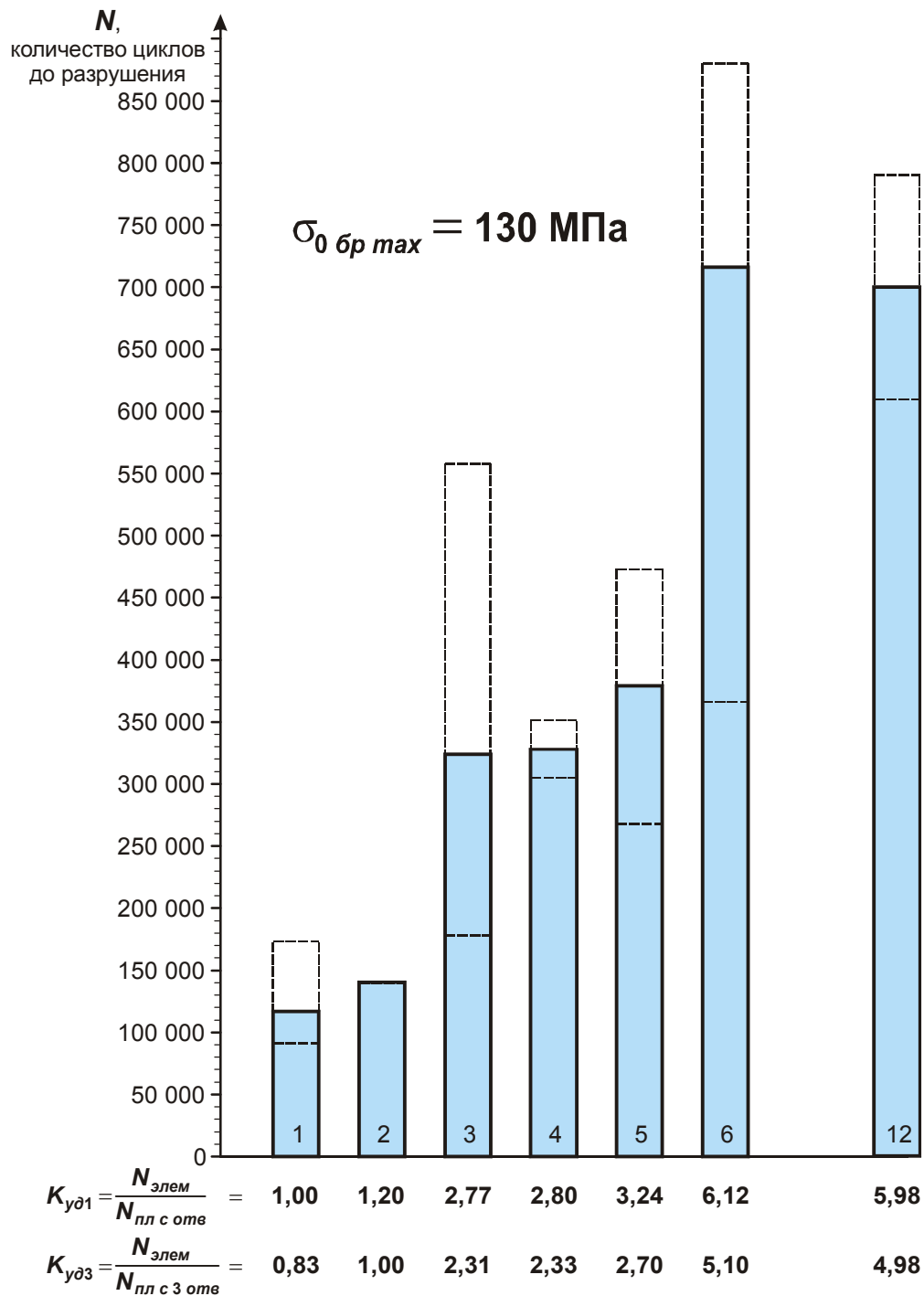


Рисунок 4.13 – Влияние количества отверстий, раскатки, дорнования, обжатия отверстий и упрочнения фасок на долговечность полос при  $\sigma_{0 \text{ бр max}} = 130 \text{ МПа}$ :

- 1 – с одним отверстием ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм из материала Д16Т;
- 2 – тремя отверстиями ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм;
- 3 – тремя отверстиями ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,2%;
- 4 – тремя отверстиями ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,6%;
- 5 – тремя отверстиями ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 2%;
- 6 – тремя отверстиями ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 3%;
- 12 – тремя отверстиями ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий 12 мм), обработанных в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации

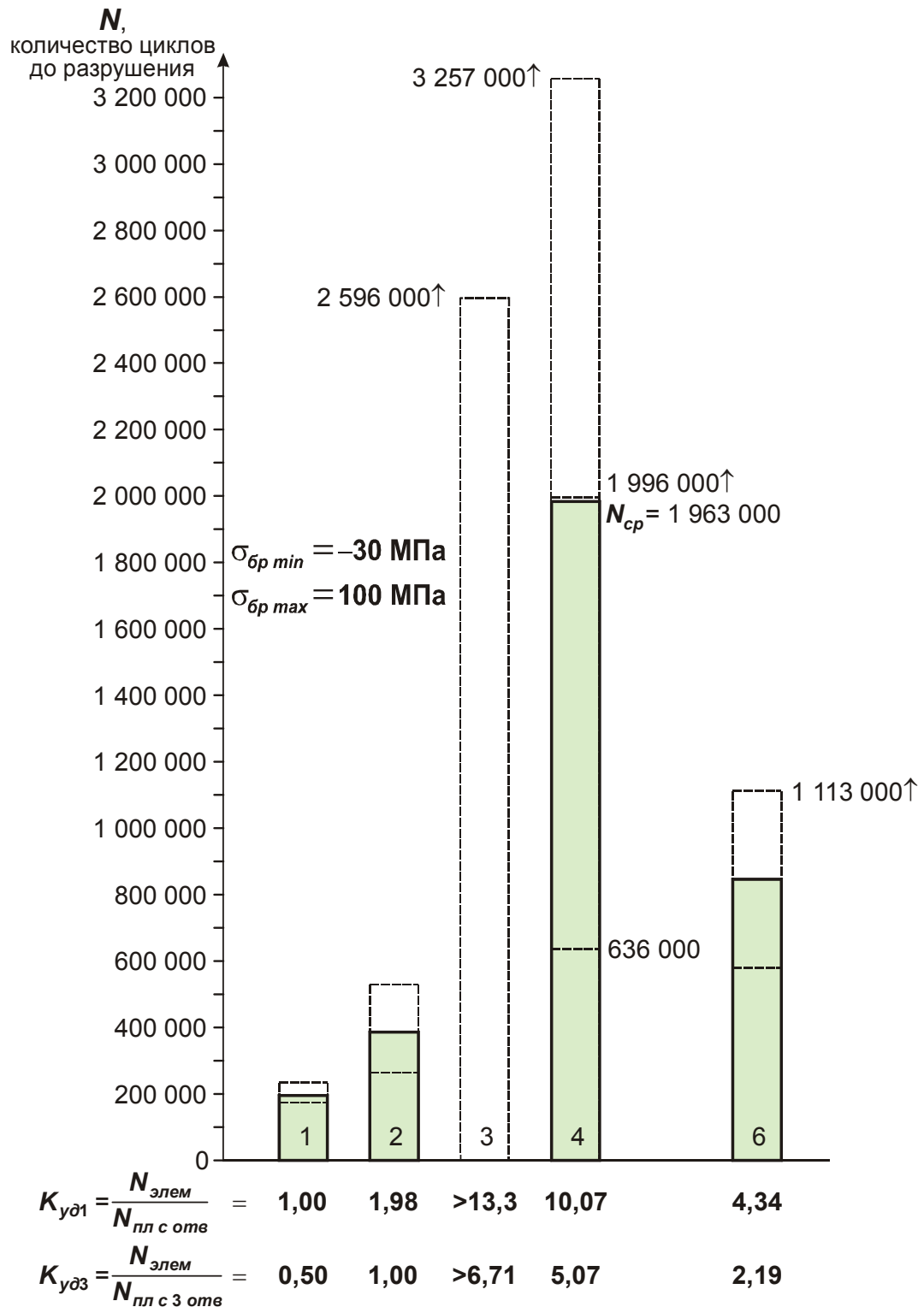


Рисунок 4.14 – Влияние количества отверстий, раскатки и дорнования на долговечность полос при  $\sigma_{0\ бр\ max} = 114\ \text{МПа}$  ( $\sigma_{бр\ min} = -30\ \text{МПа}$ ;  $\sigma_{бр\ max} = 100\ \text{МПа}$ ):

- 1 – с одним отверстием ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм из материала Д16Т;
- 2 – тремя отверстиями ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм;
- 3 – тремя отверстиями ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,2%;
- 4 – тремя отверстиями ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,6%;
- 6 – тремя отверстиями ( $V/d = 6$ ) диаметром 8 мм, обработанных в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 3%

#### 4.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНСТРУКТИВНО-ПОДОБНЫХ ОБРАЗЦОВ СТРИНГЕРОВ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

Для проведения испытаний на усталостную долговечность конструктивно-подобных образцов стрингеров с отверстиями для перетекания топлива (ОПТ) были спроектированы образцы стрингеров.

Трехмерная модель стрингера показана на рисунке 4.15.

Захватные части образцов спроектированы так, чтобы центры тяжести захватов и центры тяжести образцов в регулярных зонах совпадали (рисунок 4.16). Таким образом, обеспечена передача нагрузок в регулярную зону образцов без эксцентриситета.

Образцы стрингеров (рисунок 4.17) были изготовлены из плиты Д16Т толщиной 55 мм путем механического фрезерования на вертикально- и горизонтально-фрезерных станках.

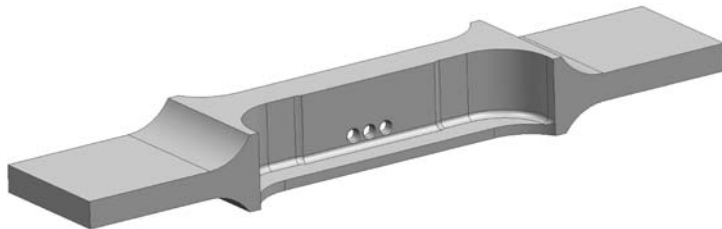


Рисунок 4.15 – Трехмерная модель конструктивно-подобного образца стрингера с системой отверстий

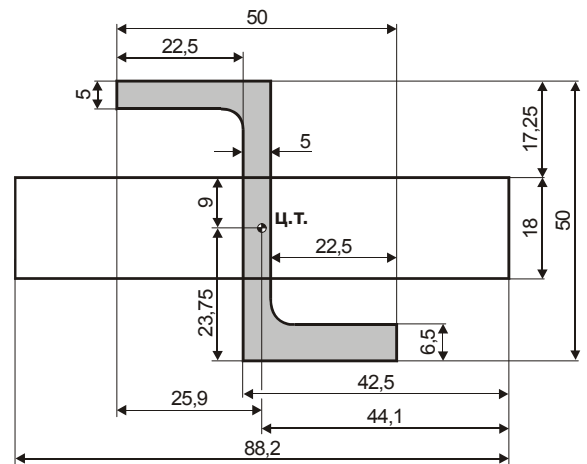


Рисунок 4.16 – Центры тяжести регулярной зоны и захватов образцов

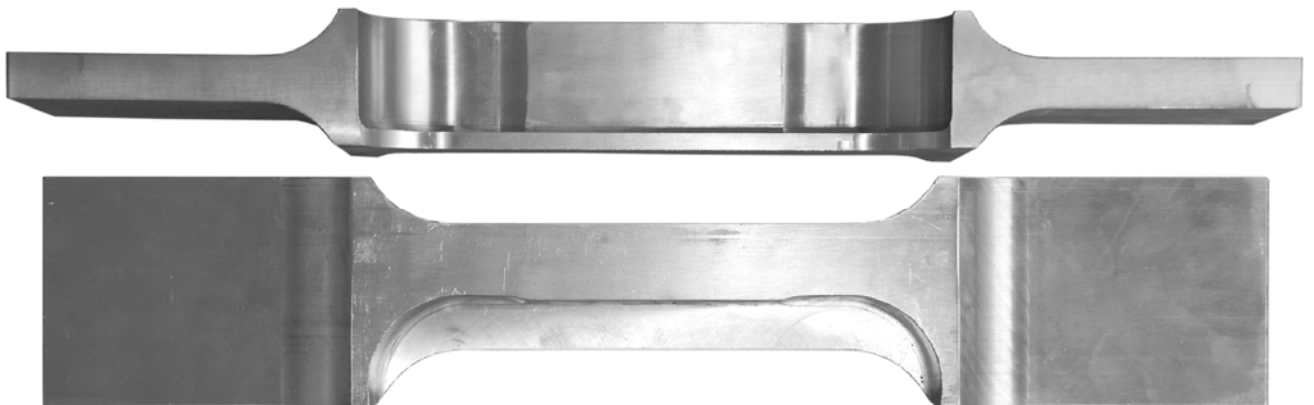


Рисунок 4.17 – Образцы стрингеров для проведения усталостных испытаний

После выполнения отверстий и обработки стрингеров в зоне ОПТ образцы прошли дробеструйную обработку стенки стрингера (с двух сторон) в зоне отверстий. После дробеструйной обработки на образцы было нанесено покрытие Ан.Окс.нхр. по серийной технологии авиационного предприятия.

Испытания конструктивно-подобных образцов стрингеров с отверстиями для перетекания топлива проводились на гидравлической установке для усталостных и статических испытаний ЦДМ-10ПУ (рисунок 4.18).

В испытательной установке ЦДМ-10ПУ образцы стрингеров нагружали одноосными переменными циклическими нагрузками. Частота нагружения составляла 11 Гц.

Конструктивно-подобные образцы стрингеров с тремя отверстиями испытывали на двух уровнях нагружения.

Усталостное разрушение образцов стрингеров происходило в сечении по оси крайнего отверстия.

На уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 100$  МПа среднее значение долговечности до полного разрушения составило  $N_{cp} = 100\ 100$  циклов нагружения, на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа –  $N_{cp} = 78\ 800$  циклов нагружения.

Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рисунке 4.19.

Дальнейшие испытания по определению влияния конструктивно-технологических параметров на усталостную долговечность конструктивно-подобных образ-

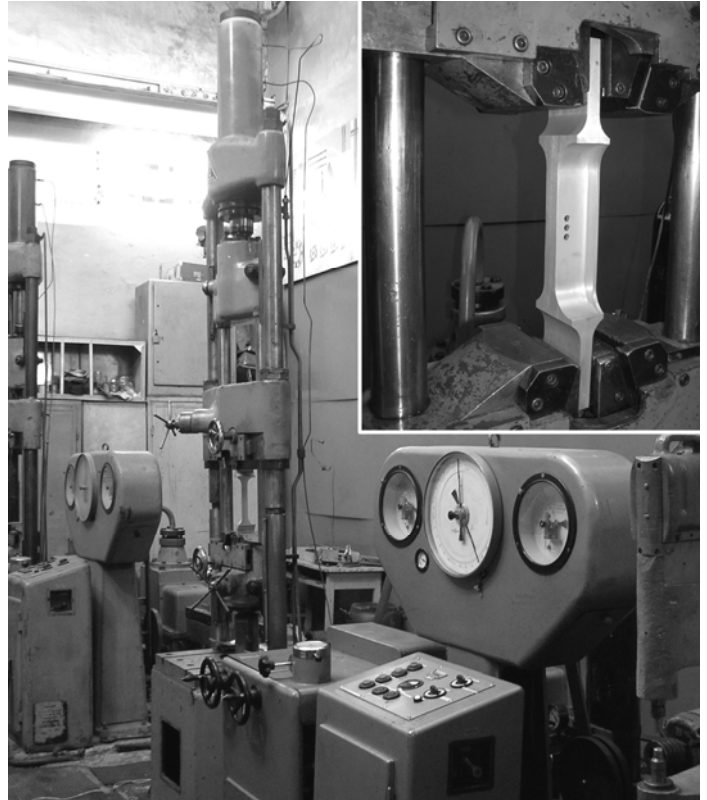


Рисунок 4.18 – Установка для проведения испытаний ЦДМ-10ПУ

цов стрингеров проводили на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 100$  МПа.

При обработке конструктивно-подобных образцов стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива раскаткой стенок отверстий с относительным натягом 0,3% усталостное разрушение образцов происходило как в сечении по оси крайнего отверстия, так и в зоне радиусного перехода «толстой» полки стрингера к захвату.

Среднее значение долговечности составило  $N_{cp} = 195\ 880$  циклов нагружения. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рисунке 4.20.

В результате испытаний установлено, что усталостная долговечность конструктивно-подобных образцов стрингеров, обработанных в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий с относительным натягом 0,3%, выше усталостной долговечности стрингера с тремя отверстиями на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 100$  МПа в 2,0 раза.

При обработке конструктивно-подобных образцов стрингеров в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом 3% усталостное разрушение образцов стрингеров происходило в зоне радиусного перехода между вертикальной, верхней и нижней полками стрингера. Однако часть образцов при достижении  $N = 10^6$  циклов не разрушилась. Испытания продолжились на более высоких уровнях нагружения. При увеличении

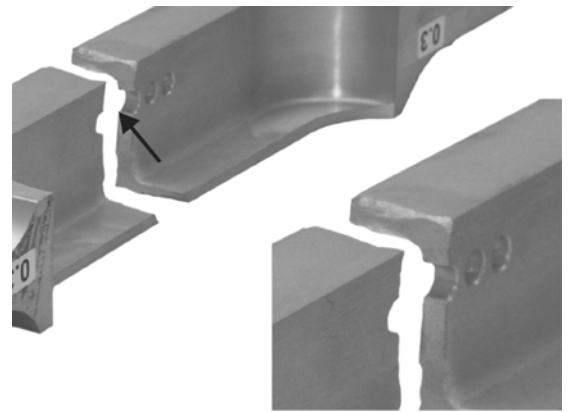


Рисунок 4.19 – Характер усталостного разрушения конструктивно-подобного образца стрингера с тремя отверстиями

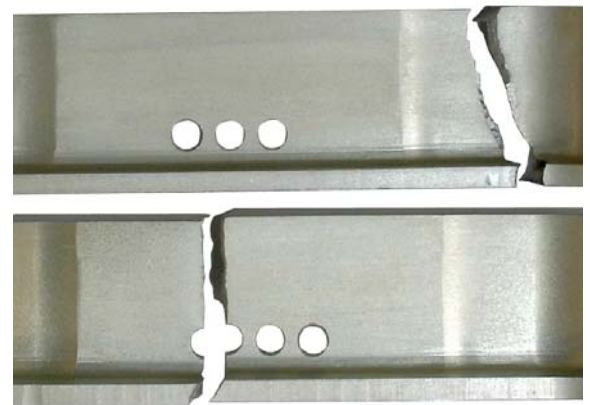


Рисунок 4.20 – Зоны и характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов стрингеров с ОПТ (материал Д16Т), обработанных в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий с относительным натягом 0,3%, на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,

$$\sigma_{бр\ max} = 100 \text{ МПа}$$



нагрузки образцы разрушались в сечении по оси крайнего отверстия.

Было установлено, что при обработке конструктивно-подобных образцов стрингеров в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом 3% долговечность стрингера в зоне отверстий для перетекания топлива на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 100$  МПа превышает 1 000 000 циклов нагружения.

Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рисунке 4.21.

В результате проведения усталостных испытаний установлено, что усталостная долговечность стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива при выполнении дорнования стенок отверстий с относительным натягом 3% выше усталостной долговечности стрингеров, обработанных в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий с относительным натягом 0,3%, более чем в 5 раз, и выше усталостной долговечности стрингера с тремя отверстиями – более чем в 10 раз.

Однако барьером, препятствующим реализации полученного эффекта от дорнования, могут стать другие концентраторы напряжений в виде радиусных переходов конструктивных элементов или повреждения поверхностного слоя, полученные в результате обработки, в виде забоин, рисок, царапин. Поэтому необходимо следить за тем, чтобы стрингер полностью соответствовал техническим условиям, которые указаны в чертеже.

При обработке конструктивно-подобных образцов стрингеров в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации усталостное разрушение одного образца произошло с наружной стороны «толстой» полки стрингера, а остальные образцы при достижении  $N = 10^6$  циклов нагружения не разрушились. Для определения зон вероятного усталостного разрушения испы-

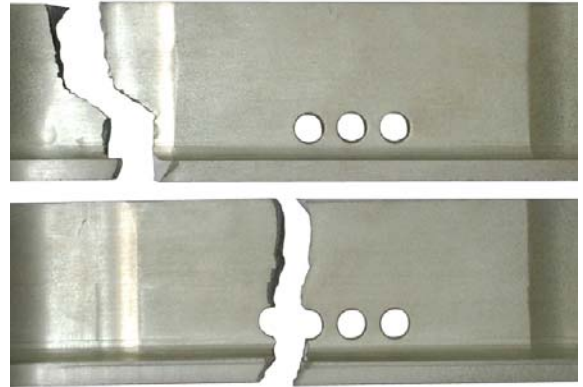


Рисунок 4.21 – Зоны и характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов стрингеров с ОПТ (материал Д16Т), обработанных в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом 3%, на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 100$  МПа

тания оставшихся образцов продолжились на более высоких уровнях нагружения.

При увеличении нагрузки разрушение образцов проходило в сечении по оси крайнего отверстия, при этом разрушение одного образца произошло в сечении по оси центрального отверстия.

Установлено, что при обработке конструктивно-подобных образцов стрингеров в зоне отверстий барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации долговечность стрингера в зоне отверстий для перетекания топлива на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 100$  МПа превышает  $10^6$  циклов нагружения. Однако она может быть ограничена появлением усталостных трещин в зонах других концентраторов напряжений.

Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рисунке 4.22.

Установлено, что усталостная долговечность стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива при выполнении барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации выше усталостной долговечности стрингеров, обработанных в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий с относительным натягом 0,3%, более чем в 5 раз, стрингера с тремя отверстиями – более чем в 10 раз.

Однако, как и при обработке стенок отверстий дорнованием, барьером, препятствующим реализации полученного эффекта от барьерного обжатия, могут стать другие концентраторы напряжений в виде радиусных переходов конструктивных элементов

или повреждения поверхностного слоя, полученные в результате обработки, в виде забоин, рисок, царапин.

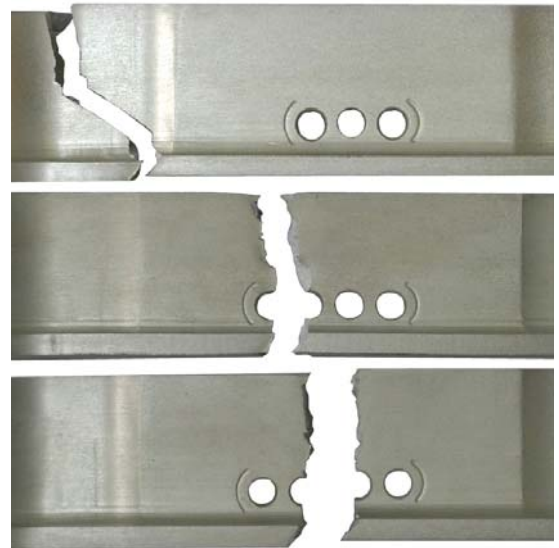


Рисунок 4.22 – Характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов стрингеров с ОПТ (материал Д16Т), обработанных в зоне отверстий барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации, на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = -30$  МПа,

$$\sigma_{бр\ max} = 100 \text{ МПа}$$

Ресурс стрингера с отверстиями для перетекания топлива в рассматриваемом сечении получаем делением долговечности на коэффициент надежности, определенный в соответствии с Нормами летной годности [47]:

$$T = N/\eta,$$

где  $\eta$  – коэффициент надежности, значение которого на стадии рабочего проектирования принимают равным четырем.

Тогда ресурс стрингера

$$T = N/\eta = 10^6 / 4 = 250\,000 \text{ эквивалентных полетов.}$$

Полученное значение превышает проектный ресурс самолета (80 тыс. полетов) более чем в три раза.

#### 4.4. ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ

В результате проведения экспериментальных исследований образцов пластин и конструктивно подобных образцов стрингеров с функциональными отверстиями установлено, что разработанные конструктивно-технологические методы обработки конструктивных элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий раскаткой, дорнованием стенок отверстий, барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации, позволяют обеспечить регламентируемые ресурсные характеристики конструктивных элементов планера самолета.

## Раздел 5

## ТЕХНОЛОГИЯ И СРЕДСТВА ОСНАЩЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ

На основе численных и экспериментальных исследований разработаны технологии обработки конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий следующими методами:

- раскаткой отверстий с относительным радиальным натягом до 0,6%;
- дорнованием отверстий с относительным радиальным натягом до 3%;
- барьерным обжатием методом выштамповки сегментных лунок (далее по тексту – барьерное обжатие) глубиной 0,3 мм в зоне функциональных отверстий;
- обжатием фасок по кромкам функциональных отверстий.

Эффективность обработки указанными методами подтверждена результатами численных исследований и сравнительных усталостных испытаний стандартных образцов с функциональными отверстиями. Результаты усталостных испытаний образцов (на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа) показали (рисунок 5.1), что усталостная долговечность образцов обработанных в зоне функциональных отверстий методами локального пластического деформирования приводит к увеличению усталостной долговечности по сравнению с необработанными образцами при:

- раскатке с натягом от 0,2 до 0,6% в 1,3 – 4,0 раза;
- дорновании с натягом 3% в 3,4 – 6,3 раза;
- барьерном обжатии в 4,3 – 5,7 раза.

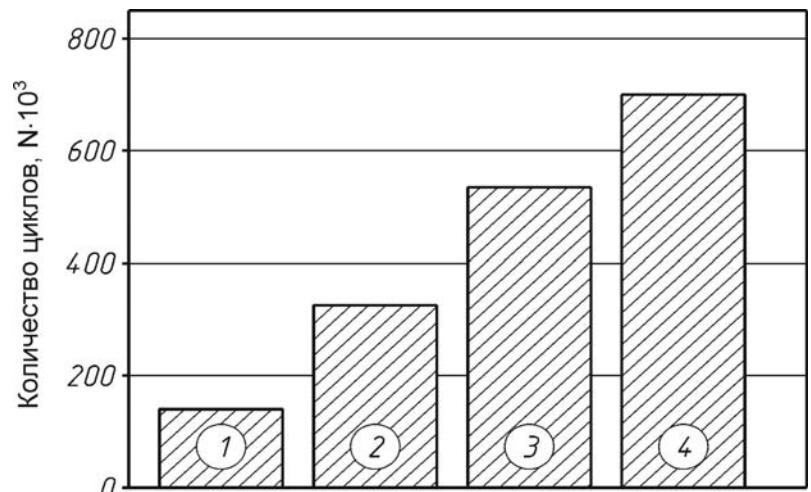


Рисунок 5.1 – Зависимость усталостной долговечности образцов от метода обработки при уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа;  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа:  
1 – без обработки; 2 – раскатка с натягом от 0,2 до 0,6%; 3 – дорнование с натягом от 2,5 до 3,0%;  
4 – барьерное обжатие

Обжатию фасок совместно с дорнованием стенок функциональных отверстий позволяет дополнительно увеличить долговечность в 1,5 – 2,5 раза. Усталостная долговечность образцов после обработки раскаткой и барьерным обжатием, при дополнительном обжатию фасок отверстий, практически не изменяется.

На основании результатов проведенных исследований установлены следующие граничные значения параметров, которые приняты в качестве заданных при разработке технологии выполнения обработки зоны функциональных отверстий конструктивных элементов планера самолета методами:

***раскатки:***

- абсолютный натяг – от 0,016 до 0,050 мм;
- относительный натяг – от 0,20 до 0,62%;
- шероховатость поверхности отверстий не более  $Ra = 0,8$  мкм.

***дорнования:***

- абсолютный натяг – от 0,20 до 0,26 мм;
- относительный натяг – от 2,5 до 3,2%;
- шероховатость поверхности отверстий не более  $Ra = 0,8$  мкм.

***барьерного обжатия:***

- глубина сегментной лунки от 0,2 до 0,3 мм;
- шероховатость поверхности лунок не более  $Ra = 1,6$  мкм.

***обжатия фасок:***

- величина пластической деформации фаски от 0,15 до 0,21 мм.

Задачами, подлежащими решению в ходе разработки технологии обработки зоны функциональных отверстий конструктивных элементов планера самолета методами локального пластического деформирования, являлись:

- экспериментальная оценка технологической точности и стабильности процессов обработки зоны функциональных отверстий;
- определение технологических параметров, обеспечивающих получение заданных значений параметров обработки зоны функциональных отверстий;
- определение основных параметров конструкции инструмента для обработки зоны функциональных отверстий;
- определение технических требований к средствам технологического оснаще-

ния для обработки зоны функциональных отверстий конструктивных элементов планера самолета транспортной категории;

- проектирование технологических процессов обработки зоны функциональных отверстий;
- укрупненная сравнительная оценка технико-экономических показателей указанных методов обработки. Выбор основного и альтернативных методов обработки зоны функциональных отверстий методами локального пластического деформирования.

## 5.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ И СТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ЗОНЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ

### 5.1.1. Технологическая точность и стабильность процесса раскатки

#### ***Экспериментальная отработка процесса раскатки стенок функциональных отверстий. Оценка точности и стабильности процесса раскатки***

Целями экспериментальной отработки процесса раскатки и оценки точности и стабильности процесса раскатки стенок функциональных отверстий являются:

- определение величины и предельных отклонений диаметров предварительных отверстий под раскатку из условия обеспечения заданной величины натяга при раскатке;
- определение величины и предельных отклонений диаметров отверстий после раскатки;
- получение исходных данных для настройки рабочей головки раскатника;
- определение возможности применения процесса раскатки для обработки конструктивных элементов планера самолета транспортной категории в зоне функциональных отверстий.

Экспериментальная отработка процесса раскатки проводилась раскатником мод. G 1.1 компании ECOROLL AG Werkzeugtechnik (Германия).

Апробация процесса раскатки с помощью сверлильного станка и ручной сверлильной машины СМ 21-9-2500, не выявила влияние типа применяемого при раскатке оборудования на показатели обработки стенок функциональных отверстий. Поэтому отработка процесса раскатки проводилась с помощью ручной сверлильной машины (рисунок 5.2).

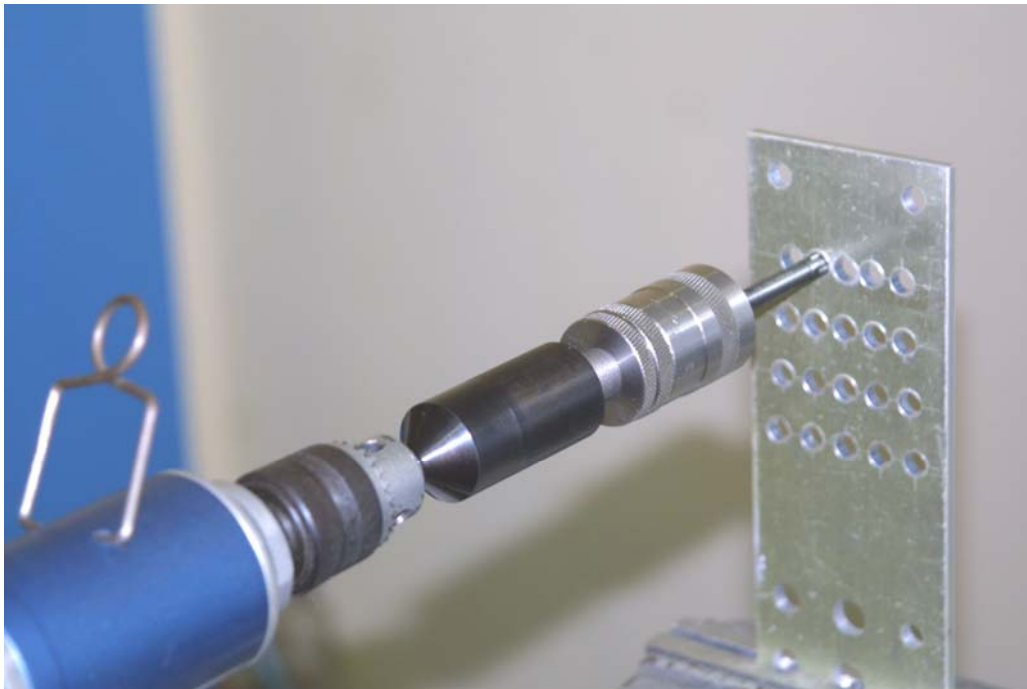


Рисунок 5.2 – Обработка стенок функциональных отверстий в образцах из материала Д16АТ л.5

В качестве контролируемых параметров, характеризующих процесс обработки отверстий методом раскатки, приняты следующие:

- диаметр отверстия перед раскаткой;
- диаметр отверстия после раскатки;
- величины абсолютного и относительного натягов при раскатке;
- остаточная деформация отверстий в результате раскатки;
- усадка отверстий после вывода раскатника из отверстия.

Для оценки точности и стабильности процесса раскатки по всем контролируемым параметрам рассчитывались следующие показатели:

- среднеарифметические значения параметров;
- дисперсия;
- поле рассеяния.

Значения указанных показателей рассчитывались по результатам экспериментальной отработки процесса раскатки.

Экспериментально установлено (таблица 5.1), что в процессе раскатки происходит упругое и пластическое деформирование окружающего отверстие материала. В результате пластического деформирования материала происходит увеличение диаметра отверстия на величину остаточной деформации.

Таблица 5.1 – Результаты экспериментальной обработки процесса раскатки функциональных отверстий

| Диаметр настройки раскатника, мм | Диаметр отверстия, мм |                | Поле рассеяния диаметров отверстий после раскатки, мм | Натяг          |                  | Остаточная деформация, мм | Поле рассеяния остаточной деформации, мм | Усадка, мм | Поле рассеяния усадки, мм |
|----------------------------------|-----------------------|----------------|---|----------------|------------------|---------------------------|--|------------|---------------------------|
|                                  | до раскатки           | после раскатки |   | абсолютный, мм | относительный, % |                           |  |            |                           |
| 8,025                            | 8,005                 | 8,013          | 0,020   | 0,020          | 0,25             | 0,009                     | 0,013                                    | 0,011      | 0,009                     |
| 8,040                            | 8,007                 | 8,026          | 0,012   | 0,033          | 0,42             | 0,019                     | 0,016                                    | 0,014      | 0,012                     |
| 8,052                            | 8,002                 | 8,033          | 0,025   | 0,050          | 0,62             | 0,030                     | 0,029                                    | 0,020      | 0,025                     |

Величина остаточной деформации увеличивается с увеличением натяга при раскатке от 0,009 мм, при раскатке с относительным натягом  $\delta = 0,2\%$ , до 0,031 мм, при раскатке с натягом  $\delta = 0,6\%$  (рисунок 5.3).

Упругая составляющая деформирования окружающего отверстия материала вызывает усадку отверстия после прохождения раскатника. Величина усадки отверстий также зависит от натяга при раскатке, увеличиваясь от 0,01 мм до 0,02 мм с увеличением натяга от 0,2% до 0,6% (рисунок 5.4).

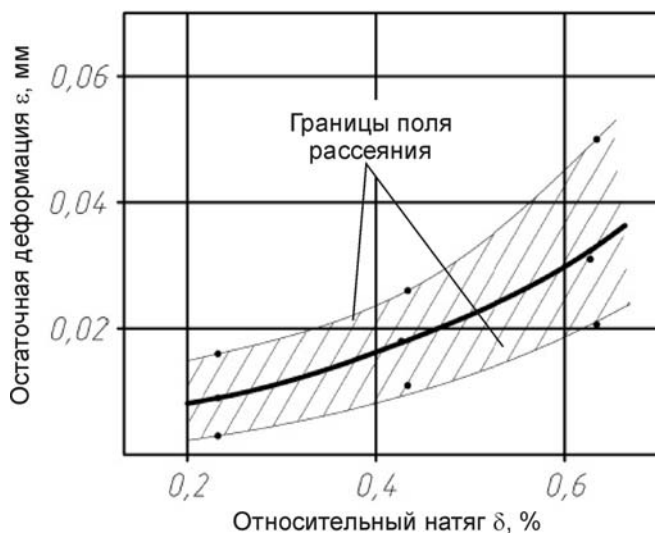


Рисунок 5.3 – Зависимость величины остаточной деформации отверстия от натяга при раскатке

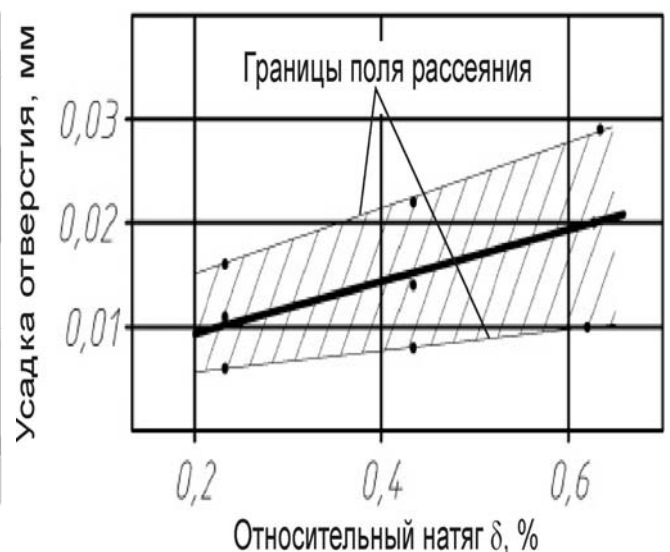


Рисунок 5.4 – Зависимость величины усадки отверстия от натяга при раскатке



С увеличением натяга при раскатке увеличивается диаметр полученного отверстия и поле рассеяния его величины (рисунок 5.5).

Указанные закономерности влияния величины натяга на параметры процесса раскатки действительны для случая раскатки отверстий с натягами до 0,65%.

При раскатке с большими натягами наблюдается отслоение чешуйчатых частиц металла с поверхности стенок отверстий, в связи с чем, раскатка с натягами более 0,65% не может быть рекомендована в качестве метода обработки зоны функциональных отверстий.

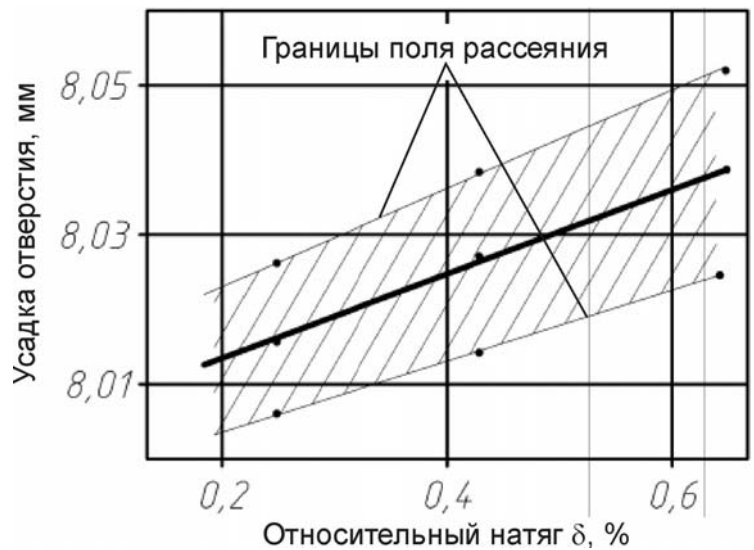


Рисунок 5.5 – Зависимость диаметра отверстия после раскатки от величины натяга

### ***Обобщенные результаты оценки точности и стабильности процесса раскатки отверстий***

1. Технологический процесс раскатки отверстий с относительным натягом до 0,6% может быть реализован при обработке зон функциональных отверстий конструктивных элементов планера самолета.

2. Процесс раскатки стенок отверстий с относительным натягом  $\delta = 0,6\%$  характеризуется следующими значениями основных показателей:

- среднеарифметическое значение величины диаметра отверстий после раскатки не зависит от толщины стенки конструктивного элемента и, при диаметре раскатника, равном 8,05 мм, составляет 8,033 мм. Поле рассеяния диаметра отверстий не превышает 0,025 мм;
- остаточная деформация отверстий в результате раскатки равна 0,030 мм. Поле рассеяния величины остаточной деформации не превышает 0,03 мм;
- усадка отверстий после прохождения раскатника составляет 0,02 мм. Поле рассеяния величины усадки не превышает 0,025 мм.

3. Процесс раскатки отверстий с относительным натягом  $\delta = 0,4\%$  характеризуется следующими значениями основных показателей:

- среднеарифметическое значение величины диаметра отверстий после раскатки, при диаметре раскатника, равном 8,04 мм, составляет 8,026 мм. Поле рассеяния диаметра отверстий не превышает 0,012 мм.
  - остаточная деформация отверстий в результате раскатки равна 0,019 мм. Поле рассеяния величины остаточной деформации не превышает 0,016 мм;
  - усадка отверстий после прохождения раскатника составляет 0,014 мм. Поле рассеяния величины усадки не превышает 0,012 мм.
4. Процесс раскатки отверстий с относительным натягом  $\delta = 0,2\%$  характеризуется следующими значениями основных показателей:
- среднеарифметическое значение величины диаметра отверстий после раскатки, при диаметре раскатника, равном 8,025 мм, составляет 8,013 мм. Поле рассеяния диаметра отверстий не превышает 0,02 мм.
  - остаточная деформация отверстий в результате раскатки равна 0,009 мм. Поле рассеяния величины остаточной деформации не превышает 0,013 мм;
  - усадка отверстий после прохождения раскатника составляет 0,011 мм. Поле рассеяния величины усадки не превышает 0,009 мм.
5. Шероховатость поверхности отверстий  $R_a$  после раскатки с относительным натягом от 0,2 до 0,6% не превышает 0,8 мкм.
6. В качестве технологической смазки при раскатке рекомендуется применение индустриального масла И-40А.
7. Влияние субъективного фактора на качество обработки отверстий раскаткой обусловлено возможной ошибкой оператора при настройке диаметра раскатной головки.

### ***Проектирование технологического процесса раскатки функциональных отверстий***

#### *Исходные данные для проектирования технологического процесса раскатки*

Исходными данными для проектирования технологического процесса обработки функциональных отверстий методом раскатки являются:

- $d$  – диаметр функционального отверстия, равный  $8H11\left(\begin{smallmatrix} +0,090 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$ ;
- НО и ВО предельные нижнее и верхнее отклонения диаметра функционального отверстия, равные 0 и 0,09 мм, соответственно;
- $\alpha_{\max}$  – максимальная величина абсолютного натяга при раскатке, принятая

по результатам отработки процесса раскатки и испытаний образцов на долговечность, равной 0,05 мм;

- $u$  – усадка отверстий после раскатки, принимаемая по результатам экспериментальной отработки процесса раскатки, равной 0,02 мм;
- $\Delta_0$  – поле рассеяния диаметров отверстий после раскатки, принимаемое по результатам экспериментальной отработки процесса раскатки, равным 0,025 мм.

### *Расчет параметров процесса раскатки*

1. Диаметр предварительных отверстий под раскатку, рассчитывался по формуле:

$$d_n = d + \frac{BO + HO}{2} + u - \alpha_{\max} = 8 + \frac{0,09 + 0}{2} + 0,02 - 0,05 = 8,015 \text{ мм},$$

где  $d$  – номинальный диаметр функционального отверстия;  $BO$  и  $HO$  – верхнее и нижнее предельные отклонения диаметра функционального отверстия;  $u$  – усадка функционального отверстия после прохождения раскатника;  $\alpha_{\max}$  – максимальная величина абсолютного натяга при раскатке.

Принимаем:  $d_n = 8H7\left(\begin{smallmatrix} +0,015 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$

2. Номинальный диаметр настройки раскатной головки рассчитывался по формуле:

$$D_p = d + \alpha - BO_p = 8 + 0,05 - 0,01 = 8,04 \text{ мм},$$

где  $D_p$  – номинальный диаметр настройки раскатной головки;

$BO_p$  – верхнее предельное отклонение диаметра настройки раскатной головки, принятое равным 0,01 мм.

Исполнительный диаметр настройки раскатной головки принимаем равным:

$$D_p = 8,04 \pm 0,010 \text{ мм}.$$

3. Номинальный абсолютный натяг при раскатке рассчитывался по формуле:

$$\alpha_n = D_p - \left( d_n + \frac{BO_n + HO_n}{2} \right) = 8,04 - \left( 8 + \frac{0,015}{2} \right) = 0,0325 \text{ мм},$$

где  $BO_n$  и  $HO_n$  – верхнее и нижнее предельные отклонения диаметра предварительного отверстия.

4. Расчетная величина поля допуска абсолютного натяга при раскатке (при значении доверительной вероятности 0,9973) равна:

$$T_n = \sqrt{T_n^2 + T_p^2} = \sqrt{0,015^2 + 0,020^2} = 0,025 \text{ (мм)}$$

где  $T_n$  – поле допуска диаметра предварительного отверстия;  $T_p$  – поле допуска диаметра настройки раскатной головки.

Соответственно, величина абсолютного натяга при раскатке будет находиться в пределах:

$$\alpha_{\min} = \alpha_n - \frac{T_n}{2} = 0,0325 - 0,0125 = 0,020 \text{ мм}; \quad \alpha_{\max} = \alpha_n + \frac{T_n}{2} = 0,0325 + 0,0125 = 0,045 \text{ мм}.$$

4. Средняя величина диаметра отверстия после раскатки равна:

$$d_{cp} = D_p - u = 8,04 - 0,02 = 8,02 \text{ мм}$$

где  $u=0,02$  мм – величина усадки отверстия после раскатки, определенная по результатам экспериментальной обработки процесса раскатки.

Расчетная величина поля допуска диаметра функционального отверстия после раскатки (при значении доверительной вероятности 0,9973) равна:

$$T_o = \sqrt{\Delta_o^2 + T_p^2} = \sqrt{0,012^2 + 0,02^2} = 0,028 \text{ мм},$$

где  $\Delta_o=0,020$ мм – поле рассеяния диаметра функционального отверстия, определенное по результатам экспериментальной обработки процесса раскатки.

Соответственно, разброс величины диаметра отверстий после раскатки будет находиться в пределах от 8,006 до 8,034 мм, что удовлетворяет требованиям к точности функциональных отверстий.

5. Результаты испытаний усталостной долговечности образцов с отверстиями, обработанными раскаткой, дают основания считать, что изменение абсолютного натяга в пределах от 0,02 мм до 0,05 мм не оказывает существенного влияния на усталостную долговечность образцов. Следовательно, можно принять предельную величину поля допуска ( $T_o$ ) натяга при раскатке, равной:  $T_o = 0,05 - 0,02 = 0,03$  мм.

6. Коэффициент точности технологического процесса раскатки отверстий, рассчитанный согласно рекомендациям ГОСТ 27.202-83, равен:  $K_m = \frac{T_n}{T_o} = \frac{0,025}{0,030} = 0,83$ ,

что свидетельствует об удовлетворительной стабильности этого процесса при соблюдении требований к точности настройки раскатной головки.

В РТМ 1294 рекомендуется следующая процедура настройки диаметра раскатной головки:

- измерение диаметра предварительного отверстия, подготовленного под раскатку, нутромером с ценой деления не более 0,002 мм;
- расчет диаметра раскатной головки раскатника как суммы фактического диаметра отверстия под раскатывание и требуемого натяга;
- установка диаметра раскатной головки с контролем его величины измерительной скобой с ценой деления не более 0,002 мм.

Настройку раскатной головки раскатника указанным способом сложно реализовать в производственных условиях в связи с высокой трудоемкостью (около 15 мин) и необходимостью организации специального рабочего места, оснащенного необходимыми средствами измерений.

С целью рационализации процесса настройки раскатной головки проведена экспериментальная проверка возможности и оценка стабильности этой настройки с помощью калибр-колец. Конструкция и основные размеры калибр-колец для настройки и контроля диаметра раскатной головки после настройки приведены на рисунке 5.6 и в таблице 5.2.

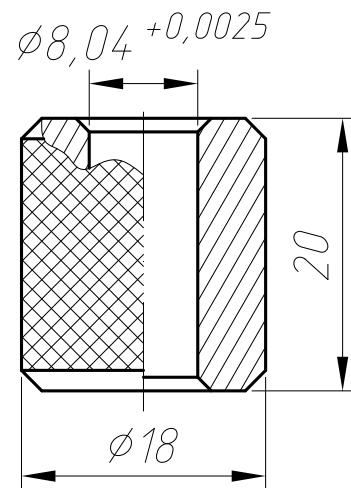


Рисунок 5.6 – Калибр-кольцо для настройки и контроля диаметра раскатной головки

Таблица 5.2 – Исполнительные диаметры калибр-колец

| Назначение калибр-кольца             | Исполнительный диаметр D, мм | Предельное отклонение, мм |
|--------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Настройка диаметра раскатной головки | 8,04                         | +0,0025                   |
| Контроль диаметра раскатной головки: |                              |                           |
| – проходной;                         | 8,049                        | +0,0025                   |
| – непроходной                        | 8,030                        | +0,0025                   |

Процедура настройки диаметра раскатной головки с помощью калибр-колец следующая:

- ввести раскатную головку в отверстие калибр-кольца для настройки диаметра раскатной головки;
- увеличивая диаметр раскатной головки с помощью регулировочного механизма раскатника, добиться прилегания роликов к стенкам отверстия калибр-кольца;
- вывести раскатную головку из отверстия калибр-кольца.
- повторно ввести раскатную головку в отверстие калибр-кольца. Раскатная головка должна входить в отверстие с небольшим натягом;
- контролировать правильность настройки диаметра раскатной головки с помощью предельных калибр-колец.

Результаты экспериментальной отработки указанного метода настройки диаметра раскатной головки свидетельствуют о том, что:

- точность настройки этим методом составляет  $\pm 0,007$  мм;
- коэффициент стабильности процесса настройки равен 0,7.

Это позволяет рекомендовать указанный метод настройки для применения в производственных условиях.

Необходимость настройки диаметра раскатной головки с высокой точностью ( $\pm 0,01$  мм), требует от исполнителя устойчивых навыков по выполнению этой настройки и не исключает влияние субъективного фактора на качество обработанных функциональных отверстий. В этой связи, следует признать целесообразной аттестацию персонала, выполняющего обработку методом раскатки.

Таким образом, в результате отработки процесса раскатки отверстий и проведенных расчетов, установлены следующие значения конструкторско-технологических параметров обработки функциональных отверстий методом раскатки:

- диаметр предварительного отверстия, подготовленного под раскатку – 8H7;
- шероховатость поверхности предварительного отверстия –  $Ra=1,6$  мкм;
- диаметр настройки раскатной головки –  $8,04 \pm 0,01$  мм;
- натяг при раскатке:
  - абсолютный – от 0,020 до 0,045 мм;
  - относительный – от 0,25 до 0,56%.

- диаметр отверстия после раскатки – от 8,006 до 8,034 мм;
- шероховатость поверхности отверстия после раскатки –  $Ra=0,8$  мкм.

*Технические требования к раскатнику*

1. Диапазон настройки диаметра раскатной головки должен быть не менее, чем от 8,020 до 8,050 мм.
2. Дискретность настройки диаметра раскатной головки, не более 0,002 мм.
3. Механизм регулирования диаметра раскатной головки должен иметь лимб с ценой деления не более 0,005 мм.
4. Радиус сферической заходной части раскатных роликов должен быть не менее 1,0 мм.
5. Длина выступающей из корпуса раскатника части сепаратора должна быть не менее 60 мм.

Указанным требованиям отвечают раскатники компании ECOROLL AG Werkzeugtechnik (Германия).

Раскатники по ОСТ 1.51023 не отвечают указанным требованиям в части обеспечения точности настройки диаметра раскатной головки.

*5.1.2. Технологическая точность и стабильность процесса дорнования*

***Экспериментальная отработка процесса дорнования функциональных отверстий. Оценка точности и стабильности процесса дорнования***

Целями экспериментальной отработки процесса дорнования функциональных отверстий, оценки точности и стабильности процесса дорнования являлись:

- определение величины и предельных отклонений диаметров предварительных отверстий, подготовленных под дорнование, из условия обеспечения заданной величины натяга при дорновании функциональных отверстий;
- определение величины и предельных отклонений диаметров функциональных отверстий после дорнования;
- получение исходных данных для проектирования дорнов;
- определение возможности применения процесса дорнования для обработки функциональных отверстий в конструктивных элементах планера самолета транспортной категории.

Экспериментальная отработка процесса дорнования проводилась с применением экспериментальных образцов дорнов и машины для затягивания болтов МБЗ-1,5 (рисунок 5.7).



В качестве контролируемых параметров, характеризующих процесс обработки функциональных отверстий методом дорнования, приняты следующие:

Рисунок 5.7 – Дорнование стенок функциональных отверстий

- диаметр предварительного отверстия перед дорнованием;
- диаметр отверстия после дорнования;
- величины абсолютного и относительного натягов при дорновании;
- остаточная деформация отверстий в результате дорнования;
- усадка отверстий после дорнования.

Для оценки точности и стабильности процесса дорнования для всех контролируемых параметров рассчитывались следующие показатели:

- среднеарифметическое значение параметров;
- дисперсия;
- поле рассеяния.

Значения указанных показателей рассчитывались по результатам экспериментальной отработки процесса дорнования на образцах из материала Д16АТ л.5.

Экспериментально установлено (таблица 5.3), что дорнование отверстий приводит к упругому и пластическому деформированию окружающего отверстие материала.

В результате дорнования происходит увеличение диаметра отверстия на величину остаточной деформации. Величина остаточной деформации растет от 0,080 до 0,156 мм с увеличением натяга при дорновании от  $\delta = 2\%$  до  $\delta = 3\%$  (рисунок 5.8).



Таблица 5.3 – Результаты экспериментальной обработки процесса дорнования стенок функциональных отверстий

| Диаметр дорна, мм | Диаметр отверстия, мм |                  | Поле рассеяния диаметра отверстия после дорнования, мм | Натяг          |                  | Остаточная деформация, мм | Поле рассеяния остаточной деформации, мм | Усадка, мм | Поле рассеяния усадки, мм |
|-------------------|-----------------------|------------------|--|----------------|------------------|---------------------------|--|------------|---------------------------|
|                   | до дорнования         | после дорнования |  | абсолютный, мм | относительный, % |                           |  |            |                           |
| 8,168             | 8,015                 | 8,094            | 0,052  | 0,153          | 1,91             | 0,08                      | 0,054                                    | 0,074      | 0,052                     |
| 8,178             | 7,952                 | 8,107            | 0,030  | 0,222          | 2,77             | 0,156                     | 0,055                                    | 0,066      | 0,019                     |
| 8,178             | 7,945                 | 8,102            | 0,022  | 0,228          | 2,85             | 0,155                     | 0,045                                    | 0,073      | 0,025                     |
| 8,168             | 7,919                 | 8,075            | 0,056  | 0,249          | 3,11             | 0,156                     | 0,061                                    | 0,093      | 0,056                     |

Упругая составляющая деформирования материала при дорновании вызывает усадку отверстия после прохождения дорна. Величина усадки отверстий практически не зависит от величины натяга при дорновании и составляет в среднем 0,08 мм. Поле рассеяния величины усадки отверстий составляет 0,05 мм.

Поле рассеяния диаметров функциональных отверстий после дорнования также не зависит от натяга и не превышает 0,056 мм.

В результате пластического деформирования окружающего отверстие материала при дорновании наблюдается деформация перемычки между функциональными отверстиями.

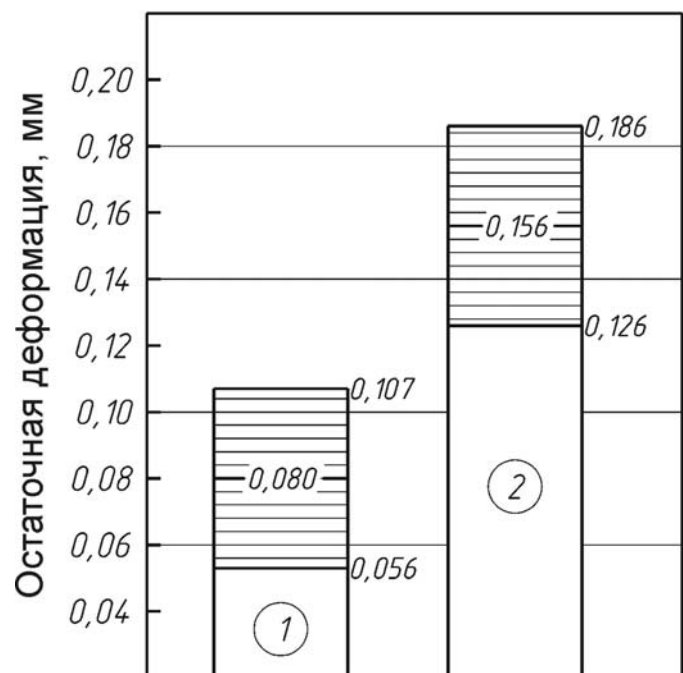


Рисунок 5.8 – Влияние натяга при дорновании на величину остаточной деформации отверстия (1 – натяг 2%; 2 – натяг 3%)

Величина деформации перемычки между функциональными отверстиями в результате дорнования зависит от ее толщины (рисунок 5.9).

При заданной в конструкторской документации на стрингеры толщине перемычки между отверстиями, равной 4 мм, деформация перемычки составляет 0,04 мм.

Эта деформация вызывает искажение формы отверстия, поэтому фактическое увеличение диаметра отверстия в результате дорнования следует измерять в плоскости, перпендикулярной к оси стрингера.

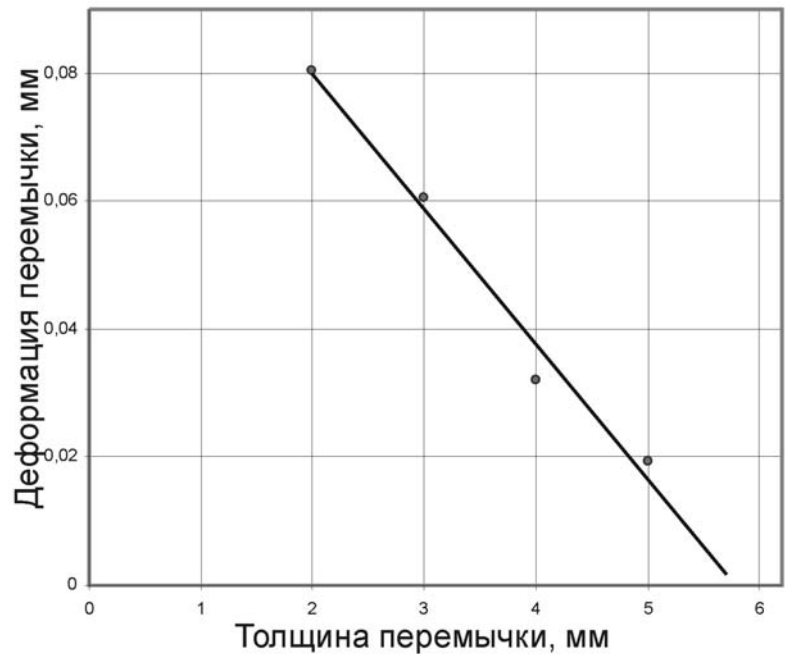


Рисунок 5.9 – Зависимость величины деформации перемычки между функциональными отверстиями от ее толщины при дорновании с относительным натягом  $\delta = 3\%$

### ***Обобщенные результаты оценки точности и стабильности процесса дорнования функциональных отверстий***

1. Технологический процесс дорнования отверстий с относительным натягом до 3% может быть реализован при обработке функциональных отверстий в стрингерах продольного набора крыла.

2. Процесс дорнования функциональных отверстий с относительным натягом  $\delta = 3\%$  характеризуется следующими значениями основных показателей:

- среднеарифметическое значение величины диаметра отверстий после дорнования не зависит от толщины стенки стрингера и, при диаметре дорна, равном 8,168 мм, составляет 8,1 мм. Поле рассеяния диаметров отверстий не превышает 0,056 мм;
- остаточная деформация отверстий в результате дорнования равна 0,155 мм. Поле рассеяния величины остаточной деформации не превышает 0,061 мм;
- усадка отверстий после прохождения дорна составляет 0,08мм. Поле рассеяния величины усадки не превышает 0,056 мм.

3. Процесс дорнования функциональных отверстий с относительным натягом

$\delta=2\%$  характеризуется следующими значениями основных показателей:

- среднеарифметическое значение величины диаметра отверстий после дорнования, при диаметре дорна, равном 8,168 мм, составляет 8,1 мм. Поле рассеяния диаметра отверстий не превышает 0,052 мм;
- остаточная деформация отверстий в результате дорнования равна 0,08 мм. Поле рассеяния величины остаточной деформации не превышает 0,054 мм;
- усадка отверстий после прохождения дорна составляет 0,074 мм. Поле рассеяния величины усадки не превышает 0,052 мм.

4. Шероховатость поверхности отверстий  $R_a$ , после дорнования с относительным натягом от  $\delta=2\%$  до  $\delta = 3\%$ , не превышает 0,8 мкм.

5. Осевое усилие при дорновании отверстий диаметром 8 мм не превышает 9,4 кН.

### ***Проектирование технологического процесса дорнования функциональных отверстий***

#### *Исходные данные для проектирования технологического процесса дорнования функциональных отверстий*

Исходными данными для проектирования технологического процесса дорнования являются:

$d$  – диаметр функционального отверстия, равный 8Н11;

НО и ВО предельные нижнее и верхнее отклонения диаметра функционального отверстия, равные 0 и 0,09 мм соответственно;

$\alpha_{\max}$  – максимальная величина абсолютного натяга при дорновании, принятая по результатам испытаний образцов на долговечность, равной 0,24 мм;

$u$  – среднеарифметическое значение усадки отверстий после прохождения дорна, принятое по результатам экспериментальной отработки процесса дорнования, равным 0,08 мм;

$\Delta_0$  – поле рассеяния диаметров отверстий после прохождения дорна, принятое по результатам экспериментальной отработки процесса дорнования, равным 0,052 мм;

$\gamma$  – максимальная величина пластической деформации перемычки между соседними функциональными отверстиями после прохождения дорна, принятая по результатам экспериментальной отработки процесса дорнования, равной 0,045 мм.

#### *Расчет параметров процесса дорнования*

1. Диаметр предварительных отверстий под дорнование рассчитывался по формуле:

$$d_n = d + \frac{BO - HO}{2} + u - \alpha_{ном} = 8 + \frac{0,15 + 0}{2} + 0,08 - 0,24 = 7,915 \text{ мм},$$

где  $d$  – номинальный диаметр функционального отверстия;  $BO$  и  $HO$  – верхнее и нижнее предельные отклонения диаметра отверстия;  $u$  – усадка отверстия после прохождения дорна;  $\alpha_{ном}$  – максимальная величина абсолютного натяга при дорновании.

Округляя до десятых долей миллиметра, принимаем:  $d_n = 7,9H9 \left( \begin{smallmatrix} +0,036 \\ 0 \end{smallmatrix} \right)$

2. Исполнительный диаметр деформирующего элемента дорна рассчитывался по формуле:

$$D = d + \frac{BO - HO}{2} + u = 8 + \frac{0,15 - 0}{2} + 0,08 = 8,155 \text{ мм},$$

где  $D$  – номинальный диаметр деформирующего элемента дорна.

Принимаем:  $D = 8,15k7 \left( \begin{smallmatrix} +0,016 \\ +0,001 \end{smallmatrix} \right)$ .

3. Средняя величина диаметров отверстий после дорнования равна:

$$d_{cp} = D + \frac{BO_d + HO_d}{2} - u = 8,15 + \frac{0,016 + 0,001}{2} - 0,08 = 8,0785 \text{ мм},$$

где  $BO_d$  и  $HO_d$  – верхнее и нижнее предельные отклонения диаметра деформирующего элемента дорна.

Расчетная величина поля рассеяния диаметров отверстий после дорнования (при значении доверительной вероятности 0,9973) равна:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_o^2 + T_d^2} = \sqrt{0,052^2 + 0,015^2} = 0,054 \text{ мм},$$

где  $\Delta_o$  – поле рассеяния диаметров отверстий, определенное по результатам экспериментальной отработки процесса дорнования;  $T_d$  – поле допуска исполнительного диаметра деформирующего элемента дорна.

Соответственно, разброс величины диаметров отверстий после дорнования будет в пределах от 8,051 мм до 8,105 мм, что удовлетворяет требованиям к точности функциональных отверстий.

4. Расчетная величина поля рассеяния абсолютного натяга при дорновании (при значении доверительной вероятности 0,9973) равна:

$$T_n = \sqrt{T_n^2 + T_o^2} = \sqrt{0,036^2 + 0,015^2} = 0,039 \text{ мм},$$

где  $T_{\text{п}}$  – поле допуска диаметра предварительного отверстия;  $T_0$  – поле допуска исполнительного диаметра деформирующего элемента дорна.

Соответственно, величина абсолютного натяга при дорновании будет находиться в пределах:

$$\alpha_{\min} = \alpha_n - \frac{T_n}{2} = 0,24 - \frac{0,039}{2} = 0,22 \text{ мм}, \quad \alpha_{\max} = \alpha_n + \frac{T_n}{2} = 0,24 + \frac{0,039}{2} = 0,26 \text{ мм}.$$

Производственной инструкцией ПИ 1.4.948 «Дорнование отверстий в пакетах из алюминиевых сплавов» рекомендуется величина абсолютного натяга при дорновании в пределах от 0,190 мм до 0,260 мм, откуда следует, что поле допуска на величину натяга составляет 0,070 мм.

5. Коэффициент точности технологического процесса дорнования отверстий, рассчитанный согласно рекомендациям ГОСТ 27.202-83, равен:  $K_m = \frac{0,039}{0,070} = 0,56$ , что свидетельствует о высокой стабильности этого процесса.

Поскольку, при выполнении дорнования функциональных отверстий отсутствует необходимость в настройке и регулировании технологических параметров процесса, влияние субъективного фактора на качество обработки отверстий практически не сказывается.

Таким образом, в результате отработки процесса дорнования функциональных отверстий и проведенных расчетов, установлены следующие значения конструкторско-технологических параметров обработки отверстий методом дорнования:

- диаметр предварительного отверстия, подготовленного под дорнование – 7,9Н9;
- шероховатость поверхности предварительного отверстия – Ra=1,6 мкм;
- диаметр деформирующего элемента дорна – 8,1u7;
- натяг при дорновании:
  - абсолютный – от 0,20 до 0,24 мм;
  - относительный – от 2,5 до 3,0%
- диаметр отверстия после дорнования – от 8,028 до 8,082 мм;
- шероховатость поверхности отверстия после дорнования – Ra=0,8 мкм;
- осевое усилие при дорновании – 10 кН;

– технологическая смазка при дорновании - индустриальное масло И-40А.

*Конструкторские параметры дорна для обработки функциональных отверстий*

1. Исполнительный диаметр деформирующего элемента дорна в соответствии с п. 5.2.2 принят равным 8,1u7.

2. Ширина калибрующей ленточки деформирующего элемента дорна принята в соответствии с ПИ 1.4.948-81, равной 0,6 мм.

3. Углы переднего и заднего конусов деформирующего элемента дорна приняты равными 3° в соответствии с рекомендациями ПИ ЕРМИ 1-93 «Выполнение точных упрочненных методом дорнирования отверстий под болты».

4. Диаметр направляющей дорна рассчитывался по формуле:

$$D_1 = d_n - \gamma = 7,9 - 0,044 = 7,856 \text{ мм}$$

где  $\gamma$  – максимальная величина пластической деформации перемычки между отверстиями в результате дорнования.

Округляя до десятых долей миллиметра, принимаем:  $D_1 = 7,9d9 \begin{pmatrix} -0,040 \\ -0,076 \end{pmatrix}$

5. Остальные параметры дорнов назначены из конструкторских соображений.

*Технические требования к машине для дорнования функциональных отверстий*

Компоновка машины для дорнования отверстий мод. МД-8 и её размеры должны обеспечивать возможность дорнования отверстий с учетом ограничений по подходам в зону обработки функциональных отверстий (рисунок 5.10). Подходы в зону обработки ограничиваются следующими размерами:

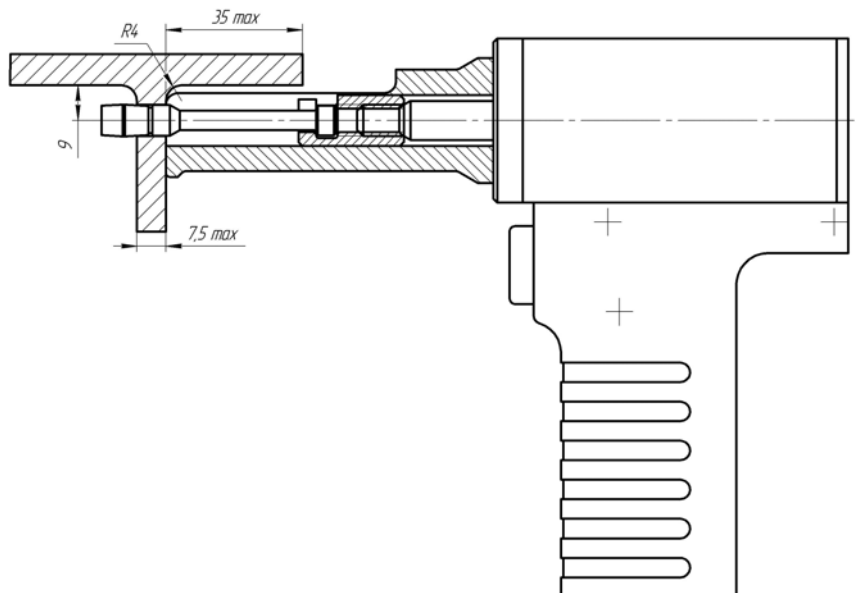


Рисунок 5.10 – Конструкторское исполнение машины МД-8 с учетом ограничений по подходам в зону расположения функциональных отверстий

– расстоянием от оси отверстий до полки стрингера, равным 9 мм;

- наличием перехода между полкой стрингера и его стенкой радиусом, равным 4 мм;
- шириной полки стрингера величиной до 35 мм.

#### *Техническая характеристика машины МД-8*

1. Осевое усилие на штоке машины – не менее 10 кН.
2. Рабочий ход штока – не менее 15 мм.
3. Давление жидкости, подаваемой в гидравлическую полость цилиндра – не более 25 МПа;
4. Давление сжатого воздуха, подаваемого в пневматическую полость цилиндра машины – 0,5 МПа.

#### *5.1.3. Технологическая точность и стабильность процесса барьерного обжатия*

#### **Экспериментальная отработка процесса обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием**

Целями экспериментальной отработки процесса обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием являлись:

- определение величины усилия штампования, необходимого для образования лунок глубиной 0,3 мм;
- получение исходных данных для проектирования обжимок и специального пресса для штампования лунок;
- оценка точности и стабильности процесса штампования лунок;
- определение возможности обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием в стрингерах самолета транспортной категории.

Экспериментальная отработка процесса обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием осуществлялась на специальном гидравлическом прессе (рисунок 5.11).

В качестве регулируемого технологического параметра процесса барьерного обжатия,



Рисунок 5.11 – Обработка зоны функциональных отверстий методом барьерного обжатия

определяющего глубину образуемых лунок, принята величина давления жидкости, подаваемой в гидравлическую полость цилиндра прессы.

Штампование лунок осуществлялась специальными обжимками (рисунок 5.12).

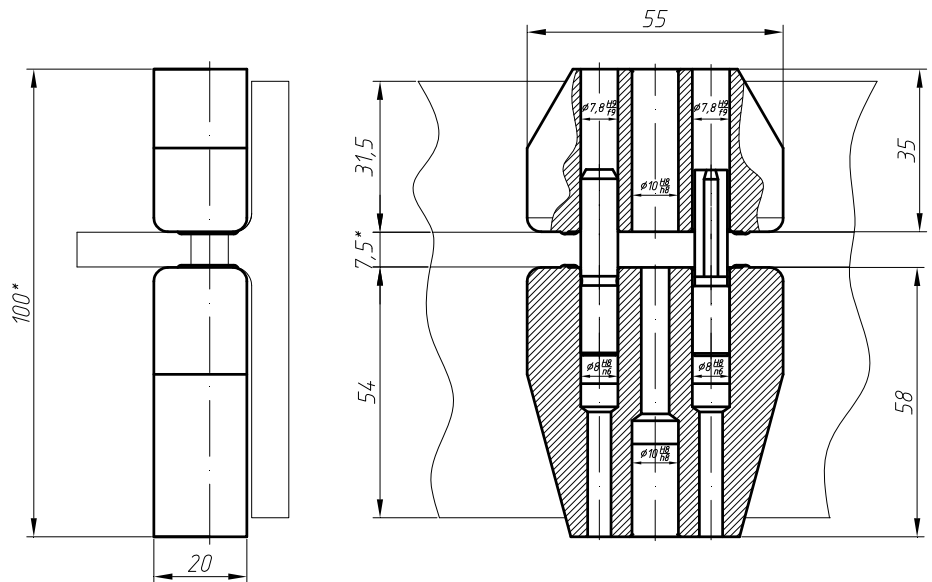


Рисунок 5.12 – Обжимки для барьерного обжата

Глубина получаемых лунок измерялась с помощью приспособления (рисунок 5.13), оснащенного индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм.

В качестве контролируемого параметра, характеризующего процесс обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием, принята глубина образуемых лунок.

Для оценки точности и стабильности процесса штампования рассчитывались следующие показатели контролируемого параметра:

- среднеарифметическое значение глубины лунок;
- дисперсия;
- поле рассеяния;

Значения указанных показателей рассчитывались по результатам экспериментальной отработки процесса барьерного обжата.

Зависимость глубины сегментной лунки от усилия штампования приведена на рисунке 5.14. Для образования лунок глубиной 0,3 мм необходимо создание усилия штампования, равное 50 кН. Поле рассеяния глубины полученных лунок в этом случае составляет, не более 0,19 мм.



Рисунок 5.13 – Измерение глубины лунки



В процессе штампования лунок в результате пластической деформации материала детали наблюдается искажение формы и размеров отверстий, крайних из группы функциональных отверстий. Уменьшение диаметров отверстий в плоскости, параллельной полки стрингера и проходящей через ось группы отверстий, составляет примерно 0,13 мм.

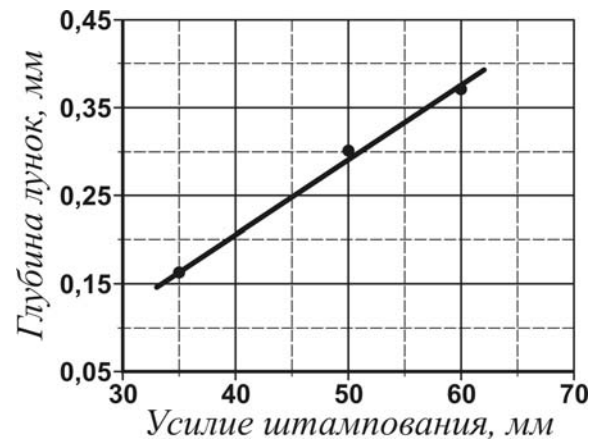


Рисунок 5.14 – Зависимость глубины сегментной лунки от усилия штампования

*Обобщенные результаты отработки процесса обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием*

1. Технологический процесс обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием может быть реализован при обработке зоны отверстий для перетекания топлива в стрингерах самолета транспортной категории.

2. Исходя из условия обеспечения заданных значений параметров степени обработки зоны функциональных отверстий, номинальная величина усилия при штамповании должна быть равна 50 кН.

3. Процесс штампования лунок характеризуется следующими значениями основных показателей:

- среднеарифметическое значение глубины лунок составляет 0,30 мм;
- поле рассеяния глубины лунок, не более 0,19 мм.
- шероховатость поверхности лунок Ra не превышает 1,6 мкм;
- деформация стенок отверстий со стороны расположения лунок – до 0,13 мм.

*Проектирование технологического процесса обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием*

*Исходные данные для проектирования технологического процесса барьерного обжатия*

Исходными данными для проектирования технологического процесса барьерного обжатия являются:

- форма и размеры лунок (рисунок 5.15);
- номинальная величина усилия штампования лунок, равная 50 кН;

– уменьшение на 0,13 мм диаметров отверстий, крайних из группы функциональных отверстий, в результате деформации их стенок при барьерном обжати.

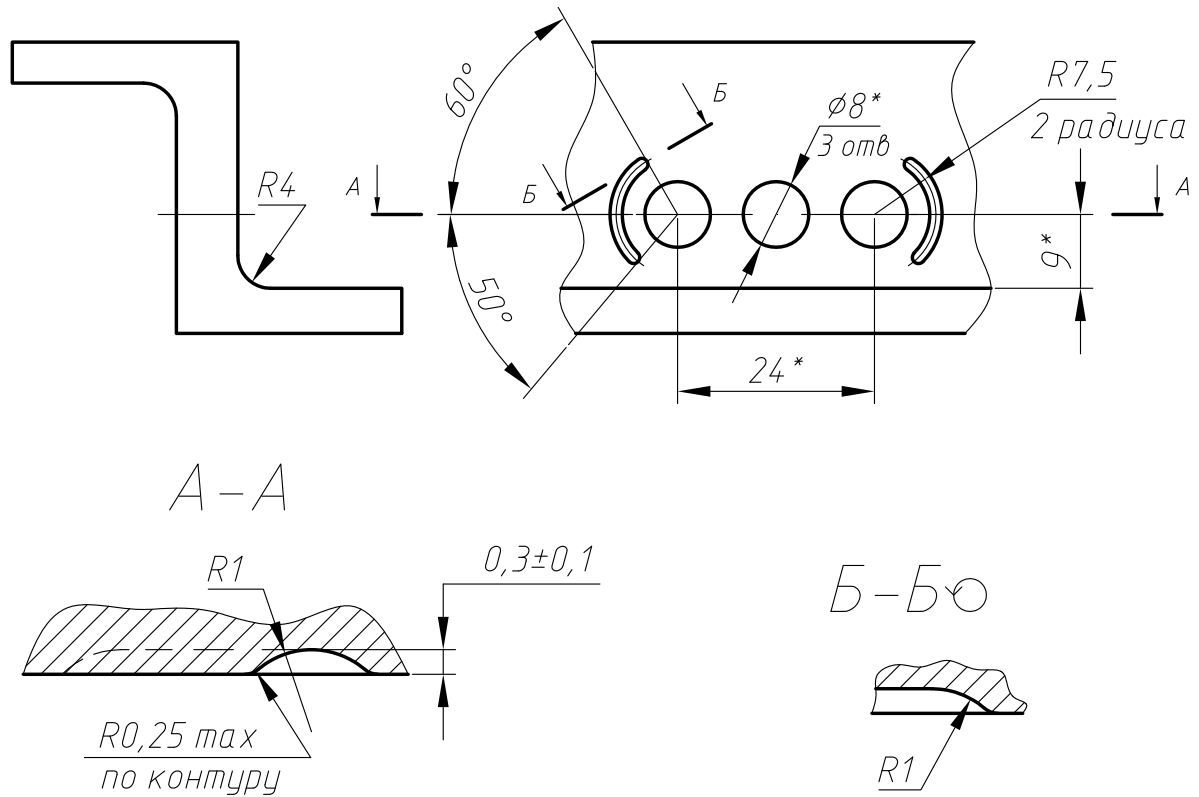


Рисунок 5.15 – Форма и размеры лунок при барьерном обжати зоны ОПТ

*Требования к конструкции обжимок для обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием*

Комплект обжимок для обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием должен включать две обжимки для одновременной выштамповки четырех лунок с обеих сторон стенки стрингера. Для базирования обжимок относительно функциональных отверстий в одну из обжимок должны быть запрессованы два пальца, один цилиндрический, а второй – срезанный. Во второй обжимке, соответственно, должны быть выполнены два направляющих отверстия. Учитывая, что в процессе штампования лунок наблюдается деформация стенок функциональных отверстий, диаметры пальцев должны быть меньше номинального диаметра функционального отверстия на 0,15 мм.

Компоновка обжимок и их размеры должны обеспечивать возможность обработки отверстий с учетом ограничений по подходам в зону обработки функциональных отверстий. Подходы в зону обработки ограничиваются следующими

размерами:

- расстоянием от оси отверстий до полки стрингера, равным 9 мм;
- радиусом перехода между полкой стрингера и его стенкой, равным 4 мм;
- шириной полки стрингера величиной до 65 мм.

*Технические требования к установке для обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием*

Компоновка установки мод. УБО-50 для обработки зоны функциональных отверстий барьерным обжатием должна предусматривать её закрепление на тумбочке, верстаке или специальном столе.

Установка должна включать:

- основание;
- силовой гидравлический цилиндр с посадочным гнездом в штоке для установки одной из обжимок;
- кронштейн с посадочным гнездом для установки второй обжимки, закрепленный на основании;
- органы управления установкой.

Рабочее место для обработки зоны функциональных отверстий должно быть оснащено поддерживающим устройством для обрабатываемого стрингера.

*Техническая характеристика установки УБО-50*

1. Осевое усилие на штоке силового цилиндра, не менее – 50 кН;
2. Допускаемое отклонение осевого усилия от номинального значения – не более  $\pm 5\%$ .
3. Рабочий ход штока – не менее 40 мм.
4. Давление жидкости, подаваемой в гидравлическую полость цилиндра – не более 25 МПа. В качестве источника гидропитания рекомендуется использовать пневмогидравлический насос-мультипликатор модели НПМ-2ВМ. Допускается использование мультипликаторов других моделей;
5. Давление воздуха, подаваемого в пневматическую полость цилиндра, не менее – 0,49 МПа;
6. Отклонение от соосности посадочных гнезд для установки обжимок не более – 0,05 мм.

## 5.2. ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ МЕТОДОМ РАСКАТКИ

Предварительные отверстия диаметром 8 мм, подготовленные под раскатку, должны быть выполнены с полем допуска Н7 и шероховатостью поверхности не выше  $R_a = 1,6$  мкм. По кромкам отверстий должны быть сняты фаски в соответствии с требованиями конструкторской документации на конструктивные элементы.

Обработку предварительных отверстий рекомендуется производить сверлением с последующим развертыванием или протягиванием.

Подготовка раскатника к выполнению обработки зоны функциональных отверстий включает:

- удаление консервирующей смазки с раскатника;
- визуальный контроль отсутствия загрязнений раскатной головки и ее повреждений;
- настройку диаметра раскатной головки на размер  $8,04 \pm 0,01$  мм с помощью калибр-кольца;
- проверку правильности настройки диаметра раскатной головки с помощью предельных калибр-колец.

Раскатку отверстий осуществлять в следующей последовательности:

- нанести на раскатник технологическую смазку;
- вставить раскатник направляющей частью сепаратора раскатной головки в отверстие;
- включить вращение раскатника и протолкнуть его через отверстие;
- вывести раскатник из отверстия;
- протереть отверстие сухим безворсовым тампоном.

После раскатки контролировать:

- отсутствие повреждений стенки и кромок отверстия – визуально;
- отсутствие стружки на раскатной головке;
- диаметр отверстия – специальной предельной калибр-пробкой;
- диаметр отверстия после раскатки должен быть в пределах от 8,006 мм до 8,034 мм;
- шероховатость поверхности отверстия – сравнением с эталоном шероховатости. Шероховатость поверхности отверстий должна быть не более  $R_a = 0,8$  мкм.

Поскольку, в процессе раскатки возможна пластическая деформация перемычки между отверстиями, диаметр отверстия после раскатки следует контролировать в плоскости, перпендикулярной продольной оси конструктивного элемента. Контроль рекомендуется выполнять специальной двухсторонней калибр-пробкой с неполными проходной и непроходной вставками.

В процессе обработки зоны функциональных отверстий, периодически необходимо проверять диаметр настройки раскатной головки с помощью предельных калибр-колец. Проверку рекомендуется проводить не реже, чем после обработки 20 отверстий.

### 5.3. ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ МЕТОДОМ ДОРНОВАНИЯ

Предварительные отверстия диаметром 7,9 мм, подготовленные под дорнование, должны быть выполнены с полем допуска Н9 и шероховатостью поверхности не выше  $Ra = 1,6$  мкм. По кромкам отверстий должны быть сняты фаски. Размер фаски должен быть на 0,05 мм больше указанного в конструкторской документации на конструктивные элементы.

Обработку предварительных отверстий рекомендуется производить сверлением с последующим развертыванием или сверлением комбинированным сверлом-разверткой в один переход.

Дорнование отверстий осуществлять в следующей последовательности:

- нанести на дорн технологическую смазку.
- вставить дорн направляющей в функциональное отверстие;
- захватить хвостовик дорна патроном машины МД-8;
- включить машину и протянуть дорн через отверстие;
- вынуть дорн с патрона машины.

После дорнования контролировать:

- отсутствие повреждений стенки и кромок отверстия – визуально;
- диаметр отверстия – специальной предельной калибр-пробкой. Диаметр отверстия после дорнования должен быть в пределах от 8,028 до 8,082 мм;
- шероховатость поверхности отверстия – сравнением с эталоном шероховатости. Шероховатость поверхности отверстий должна быть не более  $Ra=0,8$  мкм.

Поскольку, в процессе дорнования происходит пластическая деформация перемычки между отверстиями, контролировать диаметр отверстия после дорнования следует в плоскости, перпендикулярной продольной оси конструктивного элемента. Контроль рекомендуется выполнять специальными двухсторонними калибр-пробками с неполными проходными и непроходными вставками.

Критериям износа дорна является налипание обрабатываемого материала или наличия рисок на рабочей поверхности дорна. Восстановление работоспособности дорна осуществляется полированием рабочей поверхности дорна в пределах поля допуска на его исполнительный диаметр.

#### 5.4. ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ МЕТОДОМ БАРЬЕРНОГО ОБЖАТИЯ

Функциональные отверстия диаметром 8 мм должны быть выполнены с полем допуска H12 и шероховатостью поверхности не выше  $Ra = 1,6$  мкм. Расстояние между осями крайних отверстий в группе из трех функциональных отверстий должно быть равно  $24 \pm 0,1$  мм. По кромкам отверстий должны быть сняты фаски в соответствии с требованиями конструкторской документации на конструктивный элемент.

Барьерное обжатие осуществлять в следующей последовательности:

- установить стрингер с функциональными отверстиями на базирующие пальцы обжимки;
- включить рабочий ход установки УБО-50 и выполнить штампование четырех лунок одновременно;
- включить обратный ход установки УБО-50;
- снять стрингер с базирующих пальцев обжимки.

После штампования контролировать:

- глубину лунок с помощью приспособления, указанного на рисунке 5.13;
- отсутствие повреждений стенок и кромок лунок – визуально;
- шероховатость поверхности лунок – сравнением с эталоном шероховатости.

#### 5.5. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Укрупненная оценка технико-экономической эффективности обработки зоны

функциональных отверстий методами раскатки, дорнования и барьерного обжатия выполнялась исходя из оптимального соотношения показателя «цена–качество» на основе сравнительного анализа совокупности технических и экономических показателей каждого из методов.

В процессе анализа проводилось сравнение единичных, базовых, относительных и обобщенных показателей методов обработки:

- единичный показатель – количественная характеристика одного из показателей соответствующего метода упрочнения;
- базовый показатель – единичный показатель метода обработки раскаткой, принятого в качестве базового метода;
- относительный показатель – отношение единичного показателя анализируемого метода обработки к соответствующему базовому показателю;
- обобщенный показатель – средневзвешенный арифметический показатель, характеризующий совокупность всех технико-экономических показателей соответствующего метода обработки.

Степень влияния единичных показателей на технико-экономические показатели метода обработки учитывались путем присвоения каждому показателю коэффициента весомости  $K_i$ . Эти коэффициенты назначены по результатам экспертных оценок.

При назначении коэффициентов весомости показателей методов обработки, соблюдалось условие:

$$\sum_{i=1}^n K_i = 1, \quad (5.1)$$

где  $K_i$  – численное значение коэффициента весомости  $i$ -го показателя метода упрочнения;  $n$  – количество оцениваемых показателей.

Расчет относительных единичных показателей осуществляется по формуле:

$$q_i = P_i / P_{i0}, \quad (5.2)$$

или 
$$q_i = P_{i0} / P_i \quad (5.3)$$

где  $P_i$  и  $P_{i0}$  – значения соответственно единичных показателей оцениваемого и «базового» методов обработки

Формула (5.2) применяется, если увеличению  $P_i$  соответствует улучшение показателя, а формула (5.3) – когда увеличению  $P_i$  соответствует ухудшение показателя.

Полученные относительные единичные показатели позволяют оценить степень соответствия каждого из них базовым показателям.

При  $q_i = 1$ ,  $i$ -й единичный показатель анализируемого метода обработки соответствует базовому показателю. Если  $q_i < 1$ ,  $i$ -й единичный показатель ниже, а если  $q_i > 1$ ,  $i$ -й единичный показатель выше базового.

Для комплексной оценки влияния единичных показателей метода обработки на его технико-экономические показатели рассчитывался обобщенный средневзвешенный арифметический показатель метода обработки  $Q$ :

$$Q = \sum_{i=1}^n K_i \cdot q_i. \quad (5.4)$$

Обобщенный показатель представляет количественную характеристику влияния единичных показателей метода обработки на его технико-экономические показатели по сравнению с базовым методом. Большая величина обобщенного показателя соответствует лучшему варианту выбираемого метода обработки зоны функциональных отверстий.

Перечень показателей методов обработки, оказывающих существенное влияние на технико-экономическую эффективность их применения, а также коэффициенты весомости этих показателей определены методом экспертных оценок.

Показатели методов обработки были разбиты на три группы:

- первая – показатели, определяющие качественные характеристики обработки зоны функциональных отверстий;
- вторая – показатели, влияющие на трудозатраты при выполнении обработки зоны функциональных отверстий;
- третья – показатели, определяющие уровень материальных затрат на обеспечение производства инструментом и оснасткой.

К первой группе показателей отнесены:

- усталостная долговечность образцов с обработанными функциональными отверстиями, численные значения которой определены в результате испытаний стандартных образцов с обработанными отверстиями при эксплуатационном уровне нагружения  $\sigma_{\bar{p} \max} = 130$  МПа (см. раздел 4).



- коэффициент стабильности технологической операции обработки. Численные значения коэффициентов рассчитаны согласно рекомендациям ГОСТ 27.202-83 по результатам экспериментальной отработки технологических процессов обработки;
- оценка степени влияния субъективного фактора на качественные показатели процесса обработки (таблица 5.4).

Ко второй группе показателей отнесены:

- относительная трудоемкость выполнения предварительных отверстий. За единицу принята трудоемкость выполнения предварительных отверстий под раскатку;
- время выполнения обработки группы из трех отверстий, определенное методом хронометрирования операции обработки при отработке технологии обработки зон функциональных отверстий;
- время подготовки инструмента к выполнению обработки, входящее в состав подготовительно-заключительного времени.

Таблица 5.4 – Результаты оценки влияния субъективного фактора на качество обработки отверстий

| Метод обработки   | Действия исполнителя, связанные с настройкой оборудования, инструмента | Оценка влияния субъективного фактора, баллов |
|-------------------|--|--|
| Дорнование        | Отсутствуют  | 5  |
| Барьерное обжатие | Настройка усилия штампования установки для обжатия                     | 4  |
| Раскатка          | Настройка исполнительного диаметра раскатной головки                   | 3  |

К третьей группе показателей отнесены:

- удельная (отнесенная на одно отверстие) стоимость инструмента для обработки зон функциональных отверстий;
- удельная (отнесенная на одно отверстие) стоимость восстановления работоспособности изношенного инструмента.

Результаты экспертной оценки влияния субъективного фактора на качество упрочнения отверстий, связанного с возможными ошибками исполнителя при на-

стройке оборудования и упрочняющего инструмента для выполнения операции упрочнения, приведены в таблица 5.4. Оценка проводилась на основании опыта выполнения обработки зоны функциональных отверстий при проведении отработки технологических процессов обработки и изготовлении образцов для усталостных испытаний.

Обобщенные показатели технико-экономической эффективности методов обработки зоны функциональных отверстий рассчитывались как для каждой из трех групп единичных показателей, так и суммарно по всем единичным показателям методов обработки.

Значения единичных показателей, а также результаты расчета относительных и обобщенных показателей методов обработки зоны функциональных отверстий приведены в таблице 5.5.

Большая величина обобщенного показателя соответствует лучшему варианту рассматриваемых методов обработки.

Сравнение обобщенных показателей по каждой из групп единичных показателей методов обработки отверстий (рисунок 5.16) дают основания считать, что, с точки зрения обеспечения качественных показателей обработки зоны функциональных отверстий (первая группа единичных показателей), лучшим является метод обработки барьерным обжатием.

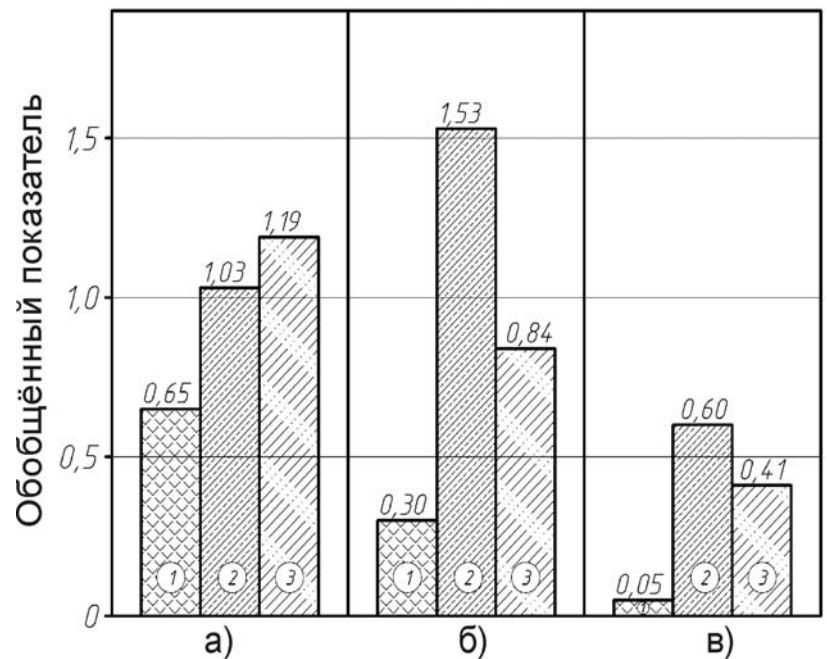


Рисунок 5.16 – Обобщенные технико-экономические показатели методов обработки зоны функциональных отверстий: 1 – обработка методом раскатки; 2 – обработка методом дорнования; 3 – обработка методом барьерного обжатия: а – групповые показатели, определяющие качественные характеристики обработки; б – групповые показатели, определяющие уровень трудозатрат при выполнении обработки; в – групповые показатели, определяющие уровень затрат на обеспечение производства оборудованием и инструментом

Таблица 5.5 – Техничко-экономические показатели методов обработки зоны функциональных отверстий

| № группы показателей                          | Наименование единичных показателей методов обработки   | Коэффициент весомости |                       | Единичные показатели методов обработки |            |                    | Обобщенные показатели методов |        |             |        |                    |        |
|---|--|-----------------------|-----------------------|--|------------|--------------------|-------------------------------|--------|-------------|--------|--------------------|--------|
|   |  | группы показателей    | единичных показателей | раскатки (базовый)                     | дорнования | барьерного обжатия | раскатки (баз)                |        | Дорнование  |        | барьерного обжатия |        |
|   |  |                       |                       |  |            |                    | единичные                     | группы | единичные   | группы | единичные          | группы |
| I   | Усталостная долговечность стандартных образцов с функциональными отверстиями, N 10 <sup>3</sup> циклов ( $\sigma_{брmax} = 130$ МПа) | 0,65                  | 0,35                  | 325                                    | 535        | 700                | 0,35                          | 0,65   | 0,58        | 1,03   | 0,82               | 1,19   |
|   | Коэффициент точности технологической операции обработки  |                       | 0,20                  | 0,83                                   | 0,6        | 0,7                | 0,20                          |        | 0,28        |        | 0,24               |        |
|   | Влияние субъективного фактора на качество обработки, баллов  |                       | 0,10                  | 3                                      | 5          | 4                  | 0,10                          |        | 0,17        |        | 0,13               |        |
| II  | Относительная трудоемкость выполнения отверстий для обработки  | 0,30                  | 0,08                  | 1,0                                    | 0,7        | 0,2                | 0,08                          | 0,30   | 0,11        | 1,53   | 0,40               | 0,84   |
|   | Трудоемкость выполнения обработки группы из трех отверстий, мин  |                       | 0,17                  | 0,75                                   | 0,75       | 0,40               | 0,17                          |        | 0,17        |        | 0,32               |        |
|   | Трудоемкость подготовки инструмента к работе, мин  |                       | 0,05                  | 5,0                                    | 0,2        | 2,0                | 0,05                          |        | 1,25        |        | 0,12               |        |
| III   | Удельная стоимость инструмента дол.США/отверстие   | 0,05                  | 0,03                  | 0,37                                   | 0,04       | 0,045              | 0,03                          | 0,05   | 0,28        | 0,6    | 0,25               | 0,41   |
|   | Удельная стоимость восстановления работоспособности инструмента дол.США/отверстие  |                       | 0,02                  | 0,08                                   | 0,005      | 0,01               | 0,02                          |        | 0,32        |        | 0,16               |        |
| <b>Итоговые обобщенные показатели методов</b> |  |                       |                       |  |            |                    | <b>1,0</b>                    |        | <b>3,16</b> |        | <b>2,44</b>        |        |

Преимущество метода обработки барьерным обжатием обусловлено, прежде всего, тем, что усталостная долговечность образцов, обработанных методом барьерного обжатия, выше усталостной долговечности образцов, обработанных дорнованием в 1,32 раза, а обработанных раскаткой в 2,15 раза.

С точки зрения влияния метода обработки на показатели, определяющие уровень трудозатрат при выполнении обработки зон функциональных отверстий (вторая группа единичных показателей) и уровень материальных затрат на обеспечение производства инструментом и оснасткой (третья группа единичных показателей), лучшим методом обработки является дорнование. Это является следствием меньших трудозатрат при подготовке дорна к выполнению обработки по сравнению с подготовкой раскатника и обжимок для барьерного обжатия, а также существенно меньшей стоимостью дорна по сравнению со стоимостью раскатника ( $\approx 15$  раз) и обжимок для барьерного обжатия ( $\approx 12$  раз).

Сравнение обобщенных показателей по всей совокупности рассматриваемых единичных показателей технико-экономической эффективности анализируемых методов обработки, также свидетельствует, что лучшим из рассматриваемых для обработки зон функциональных отверстий является метод дорнованием.

Преимущество дорнования обусловлено высоким уровнем стабильности процесса, низкими затратами на инструмент и отсутствием необходимости в настройке этого инструмента перед работой.

Комплексная оценка показателей технико-экономической эффективности по результатам расчета обобщенных показателей методов обработки позволяет ранжировать методы обработки зон функциональных отверстий следующим образом:

1. Дорнование с относительным натягом от 2,5 до 3,0%.
2. Барьерное обжатие выштамповкой лунок сегментной конфигурации глубиной от 0,2 до 0,4 мм.
3. Раскатка с относительным натягом от 0,25 до 0,60%.

#### 5.6. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСА ПЛАНЕРА САМОЛЕТА В ЗОНАХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ

На основании представленных выше (разделы 2, 3, 4, 5) результатов, разра-

ботаны конструктивно-технологические методы обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий.

Разработанные конструктивно-технологические методы обеспечения ресурса планера самолета в зонах функциональных отверстий включают в себя:

- ◆ образование отверстий с назначенным допуском;
- ◆ контроль размеров, выполненных отверстий;
- ◆ обработка конструктивных элементов в зоне функциональных отверстий:
  - раскаткой стенок отверстий с относительным натягом от 0,25 до 0,60 %;
  - дорнованием стенок отверстий с относительным натягом от 2,5 до 3,0 %;
  - барьерное обжатие зоны функциональных отверстий выштамповкой лунок сегментной конфигурации глубиной от 0,2 до 0,4 мм;
- ◆ контроль зон функциональных отверстий после выполнения операций обработки.

В зависимости от назначения конструктивного элемента, необходимых показателей уровня повышения усталостной долговечности и ресурса конструктивных элементов в зонах функциональных отверстий выбирается конструктивно-технологический метод обеспечения ресурса.

### 5.7. ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ

В результате проведенных исследований:

1. Исследована технологическая точность и стабильность процессов обработки зоны функциональных отверстий, в результате отработки процесса раскатки, дорнования, барьерного обжатия и проведенных расчетов, установлены значения конструкторско-технологических параметров обработки зон функциональных отверстий.

2. Разработана технология и средства оснащения обработки конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий методом раскатки. Установлен рекомендуемый диапазон относительного натяга при раскатке стенок функциональных отверстий который должен находиться в диапазоне от 0,25 до 0,60%.

3. Разработана технология и средства оснащения обработки конструктивных

элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий методом дорнования. Установлен рекомендуемый диапазон относительного натяга при дорновании стенок функциональных отверстий который должен находиться в диапазоне от 2,5 до 3,0%.

4. Разработана технология и средства оснащения обработки конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий методом барьерного обжата. Барьерное обжатие выштамповкой лунок сегментной конфигурации должно осуществляться глубиной от 0,2 до 0,4 мм.

5. Проведена комплексная оценка показателей технико-экономической эффективности методов обработки зон функциональных отверстий. Результат расчета обобщенных показателей позволил ранжировать методы обработки зон функциональных отверстий следующим образом:

1. Дорнование с относительным натягом от 2,5 до 3,0%.
2. Барьерное обжатие выштамповкой лунок сегментной конфигурации глубиной от 0,2 до 0,4 мм.
3. Раскатка с относительным натягом от 0,25 до 0,60%.

## ВЫВОДЫ

---

В соответствии с поставленной целью и задачами в диссертации получены следующие результаты:

1. На основе анализа конструктивно-технологических особенностей и методов обеспечения ресурса силовых конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий предложено исследовать эффективность методов локального пластического деформирования для достижения заданного ресурса планера самолета.
2. Научно обоснованы конструктивно-технологические методы обеспечения усталостной долговечности планера самолета в зонах функциональных отверстий путем анализа характеристик локального НДС в зонах вероятного усталостного разрушения. Разработан метод анализа влияния локального утолщения, раскатки, дорнования, барьерного обжатия на характеристики локального НДС конструктивных элементов планера самолета с функциональными отверстиями с учетом истории нагружения. Установлено, что применение разработанных методов приводит к снижению удельной энергии деформирования в зоне одиночного функционального отверстия в 1,03 – 4,5 раза на эксплуатационных уровнях нагружения.
3. Экспериментальные исследования усталостной долговечности базовых образцов полосы с отверстием и системой отверстий показали, что усталостная долговечность полосы с тремя отверстиями выше усталостной долговечности полосы с одним отверстием в 1,6 – 2 раза на эксплуатационных уровнях нагружения.
4. Проведенные исследования влияния раскатки, дорнования и барьерного обжатия полос с отверстием и системой отверстий на характеристики локального НДС показали, что применение указанных способов обработки приводит к снижению максимальной удельной энергии деформирования в 1,03 – 3,9 раза по сравнению с  $W_{0\text{ экв}}$  полосы с одним отверстием и в 1,03 – 4,75 раза по сравнению с  $W_{0\text{ экв}}$  полосы с системой отверстий.
5. Проведенные исследования влияния утолщения, форм отверстий, расположения отверстий, раскатки, дорнования и барьерного обжатия конструктив-

ных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий на характеристики локального НДС показали, что применение указанных конструктивных и технологических методов приводит к снижению максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в 1,1 – 3,9 раза по сравнению с базовыми вариантами.

6. Проведенные экспериментальные исследования влияния способов обработки конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий на усталостную долговечность, показали, что на эксплуатационных уровнях нагружения раскатка с относительным радиальным натягом от 0,2 до 0,6% повышает усталостную долговечность в 1,3 – 4,0 раза; дорнование стенок отверстий с относительным радиальным натягом 2...3% – в 3,4 – 6,3 раза; барьерное обжатие глубиной 0,2...0,3 мм методом выштамповки сегментных лунок – в 4,3 – 5,7 раза, что позволяет обеспечить заданные ресурсные характеристики планера самолета в зоне функциональных отверстий.
7. Разработана технология и средства оснащения процессов обработки конструктивных элементов планера самолета в зонах функциональных отверстий раскаткой, дорнованием и барьерным обжатием.
8. На основе комплексной оценки показателей технико-экономической эффективности методов обработки для обеспечения ресурса конструктивных элементов планера самолета из алюминиевых сплавов в зоне функциональных отверстий рекомендуется ранжировать методы следующие образом:
  - 1) дорнование с относительным радиальным натягом от 2,5 до 3,0%;
  - 2) барьерное обжатие методом выштамповки сегментных лунок глубиной от 0,2 до 0,4 мм;
  - 3) раскатка с относительным радиальным натягом от 0,25 до 0,60%.
9. Результаты работы внедрены в производство на ГП «АНТОНОВ», ХГАПП и в учебный процесс Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 50 лет на рынке высоких технологий. Юбилейный выпуск журнала // Технологические системы. – 2014. – № 1 (66). – 110 с.
2. 35 лет на рынке высоких технологий / под ред. Г.А. Кривова. – К.: МИИ ВЦ, 1999. – 230 с.
3. 6-й междунар. науч.–техн. симп. «Авиационные технологии XXI века: новые рубежи авиационной науки»: тез. докл. 14 – 19 августа в рамках международного авиасалона МАКС–2001. – Жуковский, Россия. – 427 с.
4. Аболихина Е.В. Коррозионная стойкость обшивок нижних панелей внутри кессонов крыла самолетов Ан-24, Ан-26 / Е.В. Аболихина, А.И. Семенец, А.П. Еретин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 41. – Х., 2009. – С. 76 – 91.
5. Авиастроение: в 3 т. – М.: ВИНТИ, 1976. – Т. 3: Машинное проектирование летательных аппаратов. – 215 с.
6. Авиастроение: летательные аппараты, двигатели, системы, технологии / Кол. авторов; под ред. А.Г. Братухина. – М.: Машиностроение, 2000. – 536 с.
7. Авиационные материалы: справ. в 9 т. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – Т. 1: Конструкционные стали; под общ. ред. Р.Е. Шалина. М.: ОНТИ – 1983.
8. Авиационные материалы: справ. в 9 т. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – Т. 4: Алюминиевые и бериллиевые сплавы. – Ч. 1; под общ. ред. Р.Е. Шалина. – М.: ОНТИ, 1982. – 627 с.
9. Астахов М.Ф. Справочная книга по расчету самолета на прочность / М.Ф. Астахов. – М.: Оборонгиз, 1954. – 629 с.
10. Балабуев П.В. Стратегия и практика АНТК «Антонов» в создании самолетов «АН» на основе полного электронного определения изделия / П.В. Балабуев, В.И. Матусевич // Информационные технологии в наукоемком машиностроении: Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса / под общ. ред. А.Г. Братухина. – К.: Техніка. – 2001. – С. 84 – 97.
11. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
12. Бронз Л.Д. Разработка технологии упрочнения крепежных отверстий дорнованием с большими натягами / Л.Д. Бронз, В.Ф. Воронов //Авиационная промышленность. – 1979. – № 10.– С. 7 – 9.
13. Бронз Л.Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов / Л.Д. Бронз. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.

14. Василевский Е.Т. Проектирование с учетом усталостной долговечности соединений силовых элементов планера самолета с втулками: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02 / Василевский Евгений Тимофеевич. – Х., 1985. – 118 с.
15. Василевский Е.Т. Методика назначения допускаемых напряжений для обеспечения заданного ресурса крыла / Е.Т. Василевский, В.А. Гребеников // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 25(2). – Х., 2000. – С. 116 – 122.
16. Василевский, Е. Т. Влияние величины одностороннего утолщения в зоне отверстия на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее растяжении [Текст] / Е. Т. Василевский, В. Ф. Семенцов // Открытые информационные и компьютерные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 69. – Х., 2015. – С. 158 – 164.
17. Вигдорчик С.А. Конструктивно-технологические пути увеличения ресурса самолета / С.А. Вигдорчик. – М.: МАИ, 1980. – 67 с.
18. Влияние последовательного применения дорнования и барьерного обжата 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.
19. Воробьев, В.Г. Технические средства и методы обеспечения безопасности полетов [Текст] / В.Г. Воробьев, Б.В. зубков, Б.Д. Уриновский. – М.: Транспорт, 1989. – 152 с.
20. Выносливость монолитных панелей с прерванными стрингерами / С.И. Олькин, А.З. Воробьев, В.И. Ермоленко, А.А. Ковачев // Тр. ЦАГИ. – 1978. – Вып. 1920. – С. 3 – 11.
21. Гребеников А.Г. Методология обеспечения характеристик сопротивления усталости сборных конструкций планера самолета // Тр. Междунар. науч.-метод. конф. «Подготовка специалистов к работе в условиях открытых информационных и компьютерных технологий». – Х.: ХАИ. – 1996. – С. 86 – 87.
22. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций / А.Г. Гребеников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 532 с.
23. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования сборных самолетных конструкций регламентируемой долговечности / А.Г. Гребеников // Открытые информационные и компьютерные интегрированные техноло-

- гии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 23. – Х., 2004. – С. 191 – 200.
24. Гребеников А.Г. Принципы и методы обеспечения усталостной долговечности соединений самолетных конструкций с учетом фреттинг-коррозии / А.Г. Гребеников // Тр. IV Всесоюз. конф. «Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов». – Х.: ХАИ. – 1991. – С. 104.
  25. Гришин В.И. Прочность элементов авиационных конструкций с концентраторами напряжений (по материалам иностранной печати за 1970 – 1982 гг.) В.И. Гришин, В.Ю. Донченко, Г.А. Кожевников. – М.: ЦАГИ. – 1983. – № 620. – 76 с.
  26. Громашев А.Г. Технологическое проектирование высокоресурсных заклепочных и болтовых соединений. Актуальные проблемы самолетостроения / А.Г. Громашев. – К.: Изд. комп. «КИТ», 2007. – 344 с.
  27. Журавлев С.В. Повышение усталостной долговечности образцов с одиночным отверстием за счет предварительной пластической деформации / С.В. Журавлев, Ф.А. Овсеян, Н.Я. Ротницкая // Авиационная промышленность. – 1988. – № 5. – С. 67 – 69.
  28. Исследование выносливости нижних панелей крыла с отверстиями для перетекания топлива / В.П. Рычик, Е.А. Литвиненко, Н.Т. Остапенко, Е.Т. Василевский // Тр. науч.-техн. конф. по выносливости и ресурсу авиационных конструкций (ноябрь 1976); под ред. А.З. Воробьева и Н.Г. Белого. – С. 100 – 103.
  29. Исследование концентрации напряжений в нижних панелях крыла методами фотоупругости / В.П. Рычик, А.Е. Литвиненко, Е.Т. Василевский и др. // Усталостные характеристики летательных аппаратов: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та. – Вып. 1. – Х., 1977. – С. 66 – 74.
  30. Кива, Д.С. Научные основы интегрированного проектирования самолетов транспортной категории [Текст]: монография / Д.С. Кива, А.Г. Гребеников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2014. – Ч. 1. – 439 с.
  31. Кива, Д.С. Научные основы интегрированного проектирования самолетов транспортной категории [Текст]: монография / Д.С. Кива, А.Г. Гребеников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2014. – Ч. 2. – 326 с.
  32. Кива, Д.С. Научные основы интегрированного проектирования самолетов транспортной категории [Текст]: монография / Д.С. Кива, А.Г. Гребеников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк.

- авиаци. ин-т», 2014. – Ч. 3. – 376 с.
33. Климович В.В. О методике оценки усталостной долговечности крыла большого удлинения / В.В. Климович, В.Г. Лейбов // Тр. ЦАГИ. – 1973. – Вып. 1534. – 12 с.
  34. Конструктивно-технологические методы повышения усталостной долговечности элементов конструкции планера самолета в зоне функциональных отверстий [Текст] / Д.С. Кива, Г.А. Кривов, В.Ф. Семенцов и др. – Киев: КВИЦ, 2015. – 188 с.
  35. Конструкционные материалы в самолетостроении [Текст] / А.Г. Моляр, А.А. Коцюба, А.С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко. – Киев: КВИЦ, 2015. – 188 с.
  36. Козий С.И. Штамповка-дорнование отверстий под механические точечные соединения / С.И. Козий, А.Ю. Иголкин, А.И. Хромов // Авиационная промышленность. – 1988. – № 7. – С. 37 – 39.
  37. Конструктивно-технологические способы повышения усталостной долговечности поперечных срезных болтовых соединений самолетных конструкций: РТМ / А.Г. Гребеников, В.Н. Клименко, В.Н. Стебенев и др. // Сопротивление усталости и трещиностойкость сплавов, элементов и агрегатов авиационных конструкций. – М.: ЦАГИ, – 1990. – Вып. 6. – 80 с.
  38. Конструкционная прочность материалов и деталей ГТД: руководство для конструкторов // Тр. ЦИАМ. – 1979. – № 835. – 522 с.
  39. Конструкционные материалы для летательных аппаратов: учеб. пособие / П.Ф. Вербенец, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, В.В. Кириченко. – Х.: ХАИ, 1984. – 109 с.
  40. Кривцов В.С. Основы аэрокосмической техники: учеб. для высш. учеб. заведений / В.С. Кривцов, Я.С. Карпов, М.Н. Федотов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – Ч.1. – 620 с.
  41. Кудрявцев И.В. Упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием / И.В. Кудрявцев // Вестник машиностроения. – 1977. – № 3. – С. 32 – 36.
  42. Леонтьев А.А. Деформирующее протягивание отверстий в пакетах из алюминиевых сплавов / Леонтьев А.А. // Авиационная промышленность. – 1987. – № 9. – С. 7–9.
  43. 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.
  44. Метод анализа характеристик локального НДС при растяжении пластин с отверстиями / Е.Т. Василевский, В.А. Гребеников, А.М. Гуменный, С.П. Свет-

- личный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 35. – С. 13 – 29.
45. Метод анализа влияния последовательного применения раскатки и барьерного обжата пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС при растяжении / А.Г. Гребеников, В.А. Матвиенко, С.П. Светличный, А.М. Гуменный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 36. – Х., 2007. – С. 39 – 48.
  46. Методы регламентирования прочности летательных аппаратов // Обзоры ЦАГИ. – 1982. – № 609. – 108 с.
  47. Нормы летной годности самолетов транспортной категории (АП-25). – М.: МАК, 1994 – 322 с.
  48. Основы общего проектирования самолетов с газотурбинными двигателями: учеб. пособие: в 2 ч. / П.В. Балабуев, С.А. Бычков, А.Г. Гребеников и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – Ч. 2. – 390 с.
  49. Основы общего проектирования самолетов с газотурбинными двигателями: учеб. пособие: в 2 ч. / П.В. Балабуев, С.А. Бычков, А.Г. Гребеников и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – Ч. 1. – 454 с.
  50. Осташ О.П. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довід. посіб. / О.П. Осташ, В.М. Федірко, В.М. Учанін, С.А. Бичков та ін. / за заг. ред. В.В. Панасюка; за ред. О.П. Осташа, В.М. Федірка. – Л.: Сполум, 2007. – Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій. – 1068 с.
  51. Пестов Н.М. Исследование выносливости полосы с нагруженным отверстием / Н.М. Пестов // Расчеты элементов авиационных конструкций. – М.: Машиностроение. – 1967. – № 5. – С. 7 – 14.
  52. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. Графики и формулы для расчета конструктивных элементов на прочность / Р. Петерсон. – М.: Мир, 1977. – 302 с.
  53. Поспелов С.В. Упрочнение – важный резерв повышения ресурса и надежности самолетов / С.В. Поспелов, И.А. Якушкин, А.А. Ерохин // Авиационная промышленность. – 1982. – № 4. – С. 3 – 5.
  54. Проектирование гражданских самолетов: Теории и методы / И.Я. Катыврев, М.С. Неймарк, В.М. Шейнин и др.; под ред. Г.В. Новожилова. – М.: Машиностроение, 1991. – 672 с.
  55. Проектирование конструкций самолетов / Е.С. Войт, А.И. Ендогур, З.А. Мелик-Саркисян, И.М. Авлядин. – М.: Машиностроение, 1987. – 416 с.

56. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий / Ю.Г. Проскуряков. – М.: Машгиз, 1961. – 192 с.
57. Пширков В.Ф. Технология выполнения высокоресурсных соединений / В.Ф. Пширков. – М.: Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации», 1980. – 170 с.
58. Расчетно-экспериментальное исследование прочности крупногабаритных образцов с типовыми концентраторами напряжений / В.И. Абрамов, А.М. Доценко, А.А. Глаговский, А.Н. Поляков // Авиационная промышленность. – 1991. – № 1. – С. 5 – 8.
59. Розенблат В.В. Упрочняющие методы обработки деталей / В.В. Розенблат, Е.А. Коржавин, А.А. Дрогунов // Авиационная промышленность. – 1986. – № 8. – С. 15.
60. Рокитянский Р.И. Крыло современного транспортного самолета / Р.И. Рокитянский // Теория и практика проектирования пассажирских самолетов. – М.: Наука. – 1976. – С. 256 – 263.
61. Семенцов, В. Ф. Влияние величины радиального натяга при дорновании и уровня нагружения при растяжении на характеристики локального напряженно-деформированного состояния полосы с отверстием [Текст] / В. Ф. Семенцов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2015. – № 67. – С. 123 – 134.
62. Семенцов, В. Ф. Влияние барьерного обжатия на характеристики локального НДС полосы с отверстием при ее растяжении [Текст] / В. Ф. Семенцов, Е. Т. Василевский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2015. – № 68. – С. 23 – 34.
63. Самолет Ан-140. Стандартная спецификация: учеб. / П.В. Балабуев, А.Г. Гребеников, П.А. Ключев и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2004. – 260 с.
64. Современные технологии авиастроения / кол. авторов; под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.
65. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / А.И. Пекарш, Ю.М. Тарасов, Г.А. Кривов и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.
66. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебеньев, Т.С. Родченко. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
67. Стандартная спецификация на тип самолета (вертолета): учеб. /

- А.Г. Гребеников, П.А. Ключев, В.Н. Король и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2004. – 336 с.
68. Стебеньев В.Н. Методика оценки сопротивления усталости соединений / В.Н. Стебеньев // Сопротивление усталости элементов авиаконструкций: Тр. ЦАГИ. – 1981. – Вып. 2117. – С. 42 – 54.
  69. Стебеньев В.Н. Проектирование соединений элементов конструкций с учетом усталости / В.Н. Стебеньев // Тр. ЦАГИ. – 1986. – Вып. 2309. – С. 62 – 68.
  70. Теория и практика проектирования пассажирских самолетов. – М.: Наука, 1976. – 439 с.
  71. 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.
  72. Технология выполнения высокоресурсных соединений в конструкциях самолетов: учеб. пособие / В.Ф. Громов, Н.М. Киселев, Р.М. Кондратенко и др.; под ред. А.И. Яркоца. – М.: МАИ, 1985. – 156 с.
  73. Трощенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – К.: Наук. думка, 1987. – Ч.1. – 508 с.
  74. Трощенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – К.: Наук. думка, 1987. – Ч.2. – 822 с.
  75. Улучшенные и новые алюминиевые, и титановые сплавы в самолетостроении: обзоры ЦАГИ. – 1984. – № 645. – 44 с.
  76. Урбанский Ю.С. Усталостная прочность и долговечность упрочненных болтовых и заклепочных соединений из сплавов Д16Т и В95 / Ю.С. Урбанский, В.Н. Беспалько, В.К. Федирко // Авиационная промышленность. – 1973. – № 12.
  77. Федирко В.К. Местное пневмодинамическое упрочнение / В.К. Федирко, С.П. Крапивин, В.Н. Беспалько // Авиационная промышленность. – 1975. – № 10.
  78. Фишелович В.И. Оценка долговечности элементов авиационных конструкций / В.И. Фишелович // Авиационная промышленность. – 1988. – № 10. – С. 67 – 68.
  79. Фомичев П.А. Энергетический метод расчета долговечности элементов авиаконструкций / П.А. Фомичев // Авиационная космическая техника и технология. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 1999. – Вып. 15. – С. 168 – 171.
  80. Форрест П. Усталость материалов / П. Форрест; пер. с англ.; под ред. С.В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
  81. Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости / Р.Б. Хейвуд; пер. с англ.; под ред. И.Ф. Образцова. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
  82. Хилл П. Наука и искусство проектирования / П. Хилл; Пер. с англ. Е.Г. Коваленко; под ред. В.Ф. Венды. – М.: Мир, 1973. – 264 с.

83. Шахатуни, Е.А. Увеличение выносливости самолетных конструкций путем обжатия вокруг отверстий цилиндрических поясов [Текст] / Е. А. Шахатуни, Ф. М. Любарец // *Авиационная промышленность*. № 9. – 1977. – № 9. – С. 12 – 13.
84. Экспериментальные исследования влияния конструктивных и технологических факторов на выносливость типовых элементов авиационных конструкций / Б.И. Олькин, Н.И. Гиванова, Т.С. Родченко и др. // *Тр. ЦАГИ*. – Вып. 2033. – 1980. – С. 3 – 14.
85. Эксплуатация, обслуживание, ремонт, надежность [Текст] / *Авиационный технический справочник*; под общ. Ред. В.Г. Александрова. – М.: Транспорт, 1969. – 412 с.
86. ANSYS Element Guide. Chapter 3. Element References. Section 3.1. Element Library.001087. 4<sup>th</sup> Edition. SAS IP<sup>©</sup>.
87. ANSYS Structural Analysis Guide. Chapter 8. Nonlinear Structural Analysis. Section 8.4.1.1.1 Plastic Material Models. 001087. 4<sup>th</sup> Edition. SAS IP<sup>©</sup>..
88. ANSYS Element Reference. ANSYS Release 10.0. Documentation. ANSYS. Inc., 2006.
89. ANSYS Contact Technology Guide. Chapter 3. Surface-to-Surface Contact. 001087. 4<sup>th</sup> Edition. SAS IP<sup>©</sup>.
90. Leis B.N. «An approach for fatigue crack initiation Life prediction with applications to complex structures», *Fatigue Life of structures under operational Loads*. 9 th ICAF Symposium LBF – Report / 1977. – P. 3.4/1 – 3.4/47.
91. Watter J. Crichlow. On fatigue analysis and testing for the design of the aircraft. AGARD – LS – 62, 1973. P. 6 – 1... 6 – 36.