

УДК 629.7.01

Г.А. Кривов, А.Г. Гребеников, Е.Т. Василевский,
В.А. Матвиенко, В.А. Резник, А.М. Гуменный,
С.П. Светличный

Конструктивно-технологические методы обеспечения высокоресурсных характеристик стрингеров баков-кессонов крыла в зоне отверстий для перетекания топлива

*ОАО Украинский научно-исследовательский институт
авиационной технологии,
Авиационный научно-технический комплекс им. О.К. Антонова,
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Разработаны конструктивно-технологические методы обработки конструктивных элементов панелей крыла в зоне системы отверстий для перетекания топлива дорнованием стенок отверстий, барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации, последовательным применением дорнования стенок отверстий и барьерного обжатия, позволяющие обеспечить заданные ресурсные характеристики панелей крыла в зоне системы отверстий для перетекания топлива.

Ключевые слова: усталостная долговечность, стрингер, отверстие для перетекания топлива, дорнование, барьерное обжатие.

На современных транспортных самолетах практически весь запас топлива размещается в крыле. Для уменьшения остатка невырабатываемого топлива в вертикальных полках стрингеров баков-кессонов выполняют отверстия для перетекания топлива, которые, в свою очередь, являются концентраторами напряжений и могут приводить к снижению усталостной долговечности стрингеров.

Стрингеры растянутых панелей крыла входят в перечень силовых элементов конструкции планера самолета, определяющих его ресурс. Поэтому одной из задач при обеспечении характеристик сопротивления усталости баков-кессонов крыла является исключение в них усталостных разрушений от отверстий в вертикальных полках стрингеров, выполненных для перетекания топлива и дренажа.

При проектировании и конструировании стрингеров с отверстиями для перетекания топлива необходимо обеспечить их долговечность, равную долговечности регулярной зоны крыла или превышающую её.

Анализ разрушений натуральных конструкций баков-кессонов показывает [4, 9], что вид таких разрушений носит многоочаговый характер с частичным или полным разрушением многих вертикальных полок, часто без выхода усталостных трещин на внешнюю поверхность обшивки крыла.

В тех случаях, когда не применяют специальные методы повышения характеристик сопротивления усталости зон отверстий для перетекания топлива, значения показателей качества K_y ($K_y = 3\sigma_{пол} / \sigma_{эл}$, где $\sigma_{эл}$ – напряжение брутто в элементе конструкции; $\sigma_{пол}$ – номинальное напряжение брутто в регулярном сечении образца (полоса с отверстием из соответствующего материала и полуфабриката), взятое по кривой усталости на уровне усталостной долговечности, равной усталостной долговечности элемента) по отдельным концентраторам могут достигать четырех [9].

Для снижения отрицательного влияния отверстий для перетекания топлива на усталостную долговечность стрингеров существует ряд известных конструк-

тивных и технологических приемов.

К конструктивным приемам относятся: выбор рациональной формы отверстий, их взаимного расположения; выбор параметров местного утолщения полки стрингера; рациональное расположение отверстий по размаху крыла [4, 5, 9].

Замена круглого отверстия в вертикальной полке стрингера на эллиптическое или тройное с крайними отверстиями меньшего диаметра (перемычка между стенками отверстий составляла 1 мм) позволяет снизить коэффициент концентрации с 3,39 до 2,70 [4, 9]. Однако выполнение таких отверстий является сложной технологической операцией, при проведении которой возможны технологические отклонения, вызывающие снижение усталостной долговечности панели [4].

Утолщение вертикальной полки стрингера в зоне отверстий для перетекания топлива приводит к повышению усталостной долговечности. Эффективность этого приема в значительной степени зависит от принятых геометрических параметров утолщения и формы отверстия [9].

Для выбора рациональных параметров зоны усиления необходимы как расчетная оценка НДС и усталостной долговечности, так и экспериментальная проверка конструктивных решений с учетом технологии серийного изготовления [3, 4].

Экспериментально установлено [9], что компенсация (утолщение) на величину $\Delta F \approx 5...8\%$ (где $\Delta F = [(F_2 - F_1) / F_1] \cdot 100\%$. Здесь F_1 – площадь регулярно сечения; F_2 – площадь по сечению отверстия, которую чаще всего можно реализовать исходя из размеров заготовок) не приводит к значительному повышению усталостной долговечности. Значения K_y в этих случаях изменяются от 3,0 до 2,7.

Анализ литературных источников показал [7, 8, 10, 11], что в ряде случаев существующие технологические методы обработки являются эффективным средством повышения усталостной долговечности конструктивных элементов с одиночными отверстиями. Большинство из них заключается в обработке элементов конструкции в зоне отверстий путем пластического деформирования металла. Анализ показал следующее:

1) обработка полосы из В95Т в зоне отверстия методом дорнования с относительным натягом 3,0...3,5% повышает её долговечность в 3 – 5 раз. Однако дорнование отверстий без одновременного обжатия фасок не обеспечивает гарантированного повышения усталостной долговечности, так как в этом случае усталостные трещины могут развиваться от необжатых фасок;

2) обработка полосы из Д16Т в зоне отверстия ($\varnothing 6...12$ мм) дорнованием через технологическую втулку (натяг – 1,2; 2,4 и 3,6%; усилие протягивания оправки 4...11,8 кН) повышает её долговечность в 3,5 – 4 раза;

3) обработка полосы в зоне отверстия ($\varnothing 5...10$ мм) путём выштамповки лунок сегментной конфигурации (угол обхвата отверстия канавкой 100...110°, глубина канавки 0,3...0,4 мм; усилие обжатия 46...96 кН) повышает её долговечность в 3,5 – 4,8 раза;

4) обработка полосы (материал Д16Т, В93Т1, В95Т1) в зоне отверстия ($\varnothing 6...20$ мм) точечным обжатием поверхностей, прилегающих к отверстию, пуансонами со сферическими выступами повышает её долговечность в 2,7 – 5,9 раза;

5) обработка полосы из Д16Т в зоне отверстия ($\varnothing 6...12$ мм) клиновыми обжимками повышает её долговечность в 6,5 – 8 раз, угол скоса – 1...2°;

6) обработка полосы в зоне отверстия путём выполнения обжатия поясков вокруг отверстия повышает её долговечность более чем в 10 раз, $\varnothing 6, 8, 10$ мм).

Исследования [10], выполненные на образцах из материала Д16 прессованного профиля с отверстиями эллиптической формы, показали, что обработка отверстий путем нагартовки, т.е. поджатием материала в холодном состоянии в форме канавок вокруг отверстия с обеих сторон образца, приводит к значительному эффекту. Такой технологический процесс позволяет повысить средние значения усталостной долговечности образцов по сравнению с исходным вариантом ($N_{исх} = 2,1 \cdot 10^5$ циклов) примерно в десять раз. При этом для исходного варианта образцов $K_y \approx 3,3$, а для обжатых $K_y \approx 1,7$.

Результаты экспериментов [9] свидетельствуют о том, что только поверхностная виброобработка панели без обработки стенок отверстий и фасок также не обеспечивает повышения усталостной долговечности. Характер разрушения в этом случае такой же, как и у необработанных образцов. Поэтому для получения максимального эффекта от технологических методов обработки необходимо осуществлять как обработку отверстий, так и поверхностную обработку всей панели, включая обжатие фасок.

Прогнозирование усталостной долговечности [2] в зонах вероятного усталостного разрушения конструктивных элементов проводят, основываясь на предположении, что соотношение долговечности образца, принятого за базу, и рассматриваемого образца, эквивалентно изменению удельной энергии деформирования ($W = \sigma \times \varepsilon$) эквивалентного отнулевого цикла в типовых зонах их вероятного усталостного разрушения:

$$N_m = \frac{C_\sigma}{(\sigma_{\sigma p.0\sigma})^m (W_m/W_\sigma)^k},$$

где W_σ , W_m – удельная энергия деформирования в наиболее опасных зонах базового образца и модификаций образца соответственно; $k = 3$ – показатель степени влияния отношения локальной удельной энергии деформирования модифицированного и базового образцов на долговечность конструктивного элемента.

Проведенный анализ показал, что большинство представленных в литературе конструктивно-технологических методов повышения усталостной долговечности конструктивных элементов в зоне отверстий относятся к одиночным отверстиям. Целью данной работы является разработка конструктивно-технологических методов обеспечения высокоресурсных характеристик стрингеров баков-кессонов крыла в зоне группы отверстий для перетекания топлива.

Для выбора конструктивно-технологических методов обработки стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива проведены численные исследования характеристик локального НДС конструктивных элементов в зоне отверстий для перетекания топлива с помощью системы инженерного анализа ANSYS. Анализ локального НДС проведен на полосах (рис. 1) и стрингерах (рис. 2) с отверстиями для перетекания топлива.

На рис. 3 и 4 показаны трехмерные модели технологического инструмента для обработки стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива.

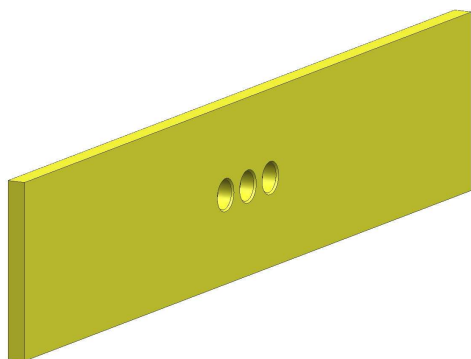


Рис. 1. Трехмерная модель полосы с отверстиями для перетекания топлива

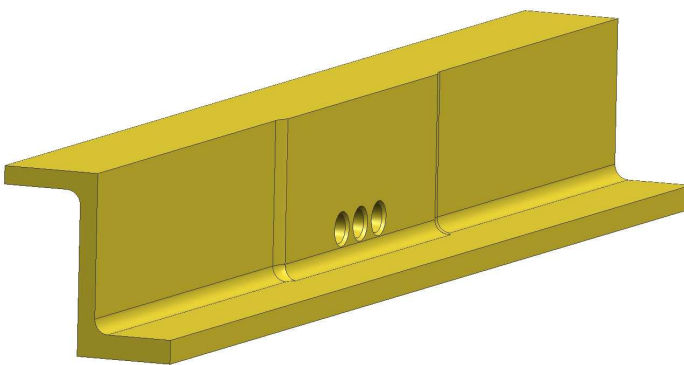


Рис. 2. Трехмерная модель участка стрингера с отверстиями для перетекания топлива

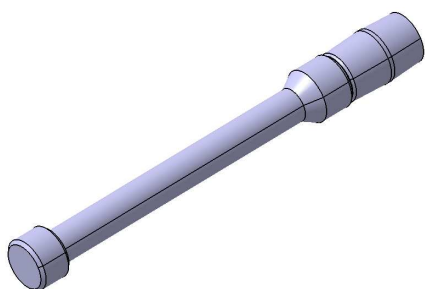


Рис. 3. Трехмерная модель дорна

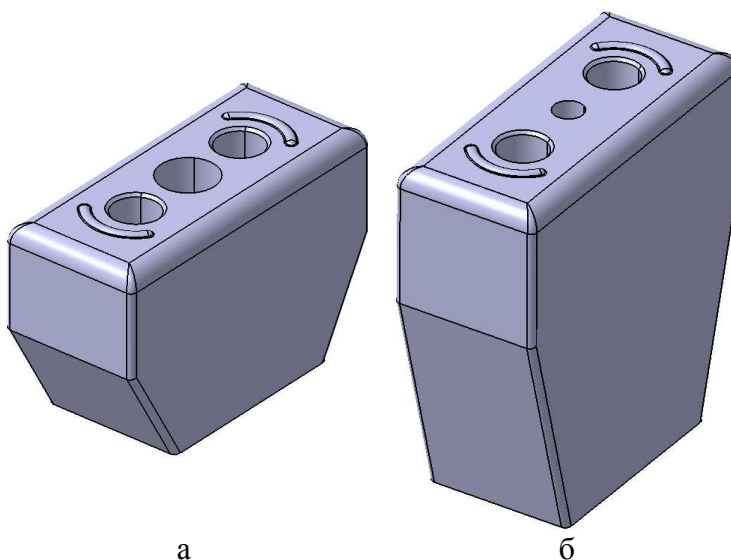


Рис. 4. Трехмерные модели: а – верхней обжимки; б – нижней обжимки

Исследовано влияние на характеристики локального НДС следующих конструктивных параметров: форма отверстий, расстояния между центрами отверстий, положения отверстий относительно усиления вертикальной полки стрингера в продольном направлении; расстояния от нижней полки стрингера до центра отверстий, величины усиления вертикальной полки стрингера.

Исследовано влияние на характеристики локального НДС в зоне отверстий для перетекания топлива следующих технологических методов обработки конструктивных элементов: дорнование стенок отверстий с относительным натягом 1, 2, 3 %; раскатка стенок отверстий с относительным натягом 0,4; 0,6 %; барьерное обжатие в виде лунок сегментной конфигурации с различными значениями глубины обжатия 0,2; 0,4; 0,6 мм.

На рис. 5 показаны результаты численных исследований влияния уровня нагружения и методов обработки полосы в зоне отверстий для перетекания топлива на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла.

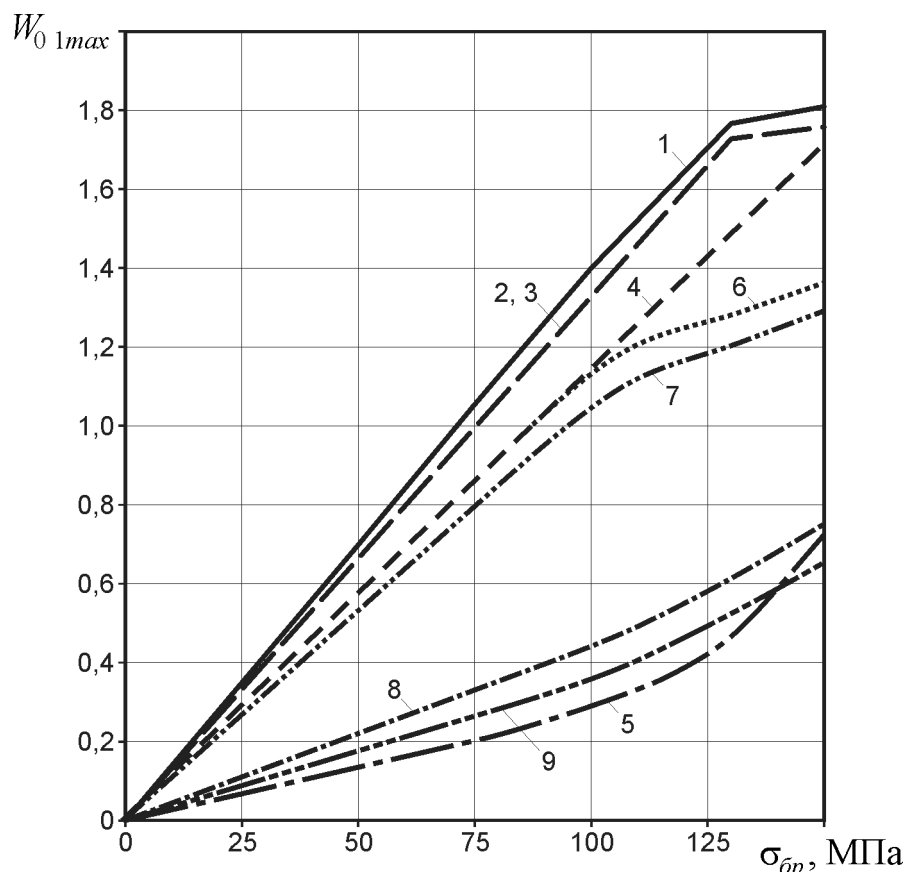


Рис. 5. Влияние уровня нагружения и метода обработки полосы в зоне отверстий для перетекания топлива на величину максимальной удельной энергии деформирования в полосе:

- 1 – с отверстием $\varnothing 8,006$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$; 2 – с тремя отверстиями $\varnothing 8,006$ мм, расстояние между отверстиями $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$; 3 – с тремя отверстиями $\varnothing 8,007$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$, обработка методом раскатки с натягом $0,2\%$; 4 – с тремя отверстиями $\varnothing 8,007$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$, обработка методом раскатки с натягом $0,6\%$; 5 – с тремя отверстиями $\varnothing 7,912$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$, обработка методом дорнования с натягом 2% ; 6 – с тремя отверстиями $\varnothing 8,007$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$, $l = 12$ мм методом выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия $0,3$ мм, угол раствора 60° , зона обжатия; 7 – с тремя отверстиями $\varnothing 8,007$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$, обработка методом выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия $0,3$ мм, угол раствора 50° , зона обжатия; 8 – с тремя отверстиями $\varnothing 8,007$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$, обработка методом выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия $0,3$ мм, угол раствора 60° , по оси крайнего отверстия; 9 – с тремя отверстиями $\varnothing 8,007$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$, обработка методом выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия $0,3$ мм, угол раствора 50° , по оси крайнего отверстия

В результате проведенных численных исследований установлено, что при напряжениях $\sigma_{0p} = 100 \dots 150$ МПа:

- 1) применение трех отверстий $\varnothing 8$ мм, расстояние между центрами отверстий $l = 12$ мм, вместо одного приводит к снижению максимальной удельной энергии деформирования в $1,02$ – $1,05$ раза по сравнению с полосой с одним от-

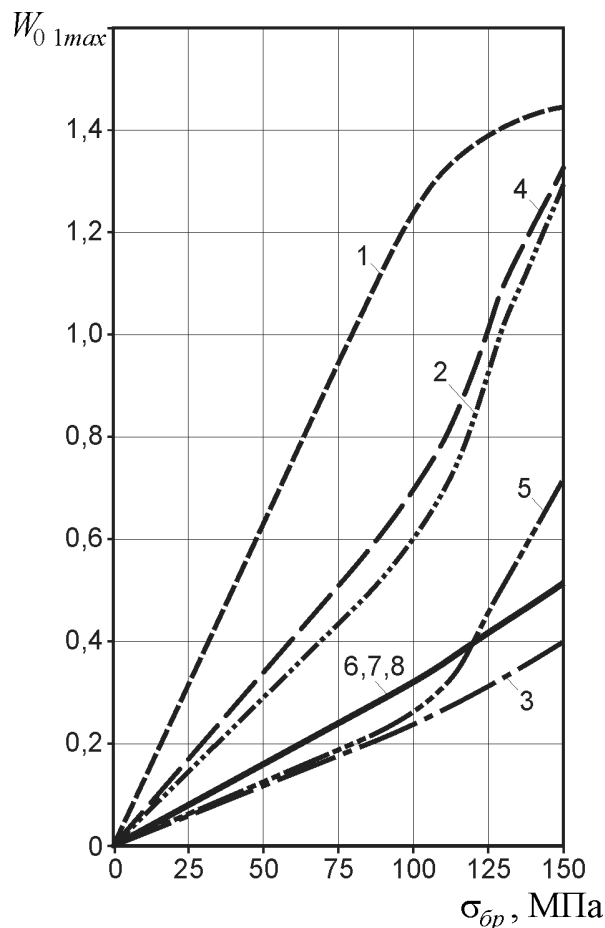
верстием;

2) обработка полосы с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, $l = 12$ мм, методом раскатки стенок отверстий с относительным натягом 0,2; 0,6 % вызывает снижение максимальной удельной энергии деформирования в 1,006–1,16 раза по сравнению с этими характеристиками для пластины с тремя отверстиями;

3) обработка пластины с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, $l = 12$ мм, методом дорнования стенок отверстий с относительным натягом 2% приводит к снижению максимальной удельной энергии деформирования в 2,46–4,75 раза по сравнению с этими характеристиками для полосы с тремя отверстиями;

4) обработка пластины с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, $l = 12$ мм, методом выштамповки сегментных лунок при глубине обжатия 0,3 мм (угол раствора 50; 60°) вызывает снижение максимальной удельной энергии деформирования в 2,36–3,23 раза по сравнению с этими характеристиками для пластины с тремя отверстиями.

На рис. 6 показаны результаты численных исследований влияния уровня нагружения и методов обработки стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла.



- 1 – полоса с отверстием, фаска 0,8 мм;
- 2 – стрингер с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, расстояние между центрами отверстий $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$;
- 3 – стрингер с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,8 \times 45^\circ$; обработка методом дорнования с натягом 3 %;
- 4 – стрингер с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,8 \times 45^\circ$; обработка методом раскатки с натягом 0,6 %;
- 5 – стрингер с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$; обработка методом барьерного обжатия, глубина 0,2 мм;
- 6 – стрингер с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$; обработка методом барьерного обжатия, глубина 0,3 мм;
- 7 – стрингер с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$; обработка методом барьерного обжатия, глубина 0,4 мм;
- 8 – стрингер с тремя отверстиями $\varnothing 8$ мм, $l = 12$ мм, фаска $0,5 \times 45^\circ$; обработка методом барьерного обжатия, глубина 0,5 мм

Рис. 6. Влияние уровня нагружения и метода обработки стрингера в зоне отверстий для перетекания топлива на величину максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в стрингере

В результате проведенных численных исследований установлено:

1) обработка стрингера методом дорнования стенок отверстий с относительным натягом 3% приводит к снижению максимальной удельной энергии деформирования в 2,50 – 3,23 раза по сравнению со стрингером с тремя отверстиями ($\sigma_{\bar{\sigma}_p} = 130, 150$ МПа);

2) обработка стрингера методом выштамповки лунок сегментной конфигурации приводит к снижению максимальной удельной энергии деформирования в 1,82 – 2,53 раза по сравнению со стрингером с тремя отверстиями (глубина обжатия 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 мм).

Выполненный на полосах с отверстиями и стрингерах численный анализ позволил определить основные конструктивно-технологические способы обработки конструктивных элементов в зоне отверстий для перетекания топлива.

Эффективность методов обработки конструктивных элементов панелей крыла в зоне отверстий для перетекания топлива оценивали на полосах с отверстиями. Экспериментально определено влияние различных методов обработки на усталостную долговечность полосы в зоне отверстий для перетекания топлива, что позволило выбрать основные конструктивно-технологические параметры обработки конструктивных элементов в зоне отверстий, для проведения исследований на конструктивно-подобных образцах стрингеров.

На рис. 7 показаны кривые усталости полосы с отверстиями для перетекания топлива, полученные в результате проведенных экспериментальных исследований.

На рис. 8 изображены номограммы влияния методов обработки на усталостную долговечность полосы с отверстиями на уровне нагружения $\sigma_{0 \text{ бр max}} = 150$ МПа.

На основе численного анализа локального НДС конструктивных элементов и проведенных экспериментальных исследований на полосах с отверстиями для перетекания топлива были выбраны следующие основные конструктивно-технологические методы обработки стрингеров в зоне отверстий:

- раскатка стенок отверстий с относительным натягом 0,3%;
- дорнование стенок отверстий с относительным натягом 3%;
- обработка стенки стрингера в зоне отверстий барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации;
- обработка конструктивно-подобных образцов стрингеров в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжатия.

Для проведения экспериментальных исследований, направленных на определение влияния методов обработки стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива на усталостную долговечность, были спроектированы и изготовлены конструктивно-подобные образцы стрингеров.

Трехмерная модель конструктивно-подобных образцов стрингеров с отверстиями для перетекания топлива показана на рис. 9.

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

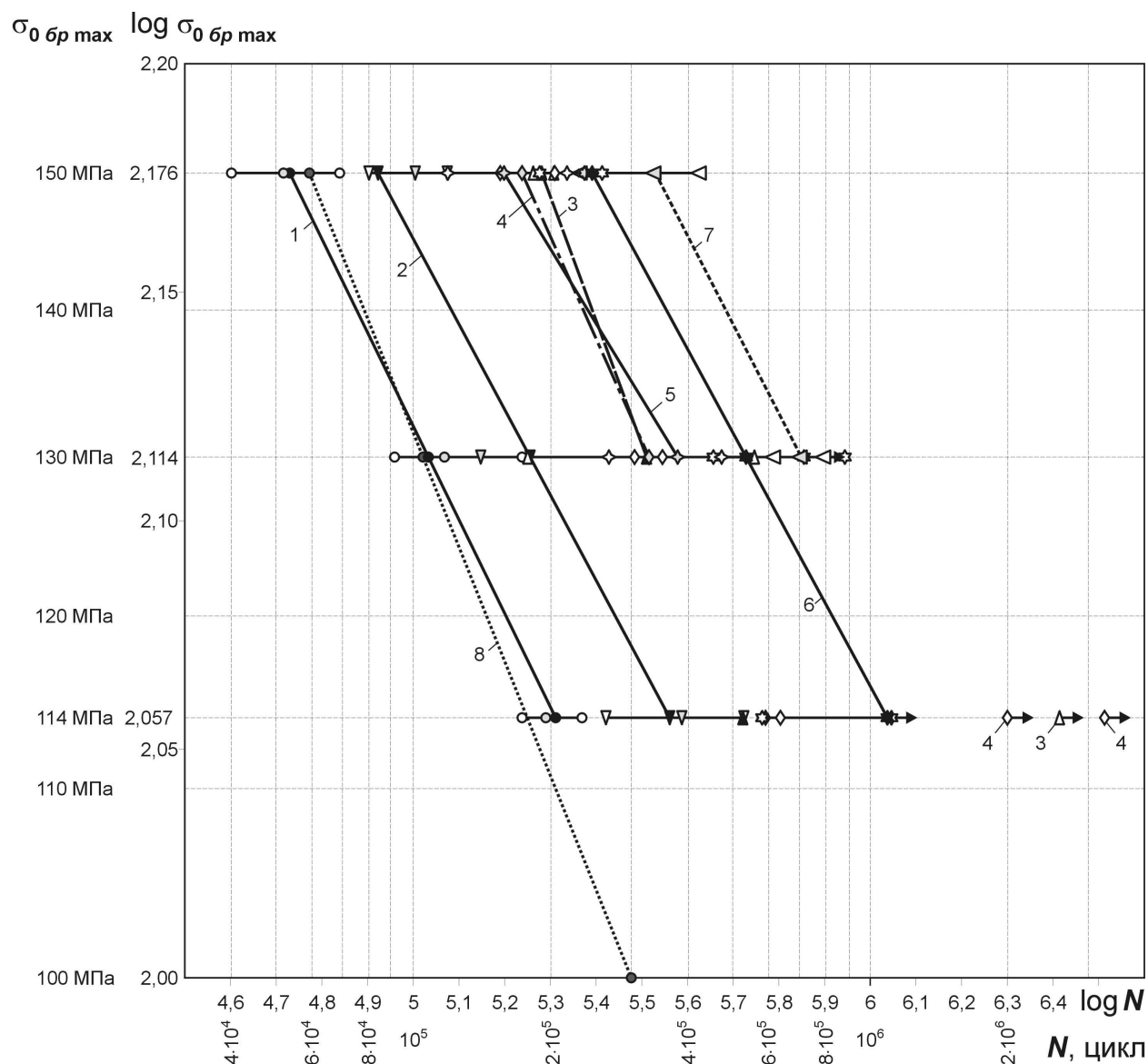


Рис. 7. Кривые выносливости полосы из материала Д16Т ($B/d = 6$, $\varnothing 8$ мм):

- 1 – с одним отверстием (\circ);
- 2 – с тремя отверстиями (расстояние между центрами отверстий $l = 12$ мм), не обработанная в зоне отверстий (∇);
- 3 – с тремя отверстиями ($l = 12$ мм), обработанная в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий с относительным натягом 0,2% (Δ);
- 4 – с тремя отверстиями ($l = 12$ мм), обработанная в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий с относительным натягом 0,6% (\diamond);
- 5 – с тремя отверстиями ($l = 12$ мм), обработанная в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом 2% (\blacklozenge);
- 6 – с тремя отверстиями ($l = 12$ мм), обработанная в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом 3% (\star);
- 7 – с тремя отверстиями ($l = 12$ мм), обработанная в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации (\triangleleft);
- 8 – с одним отверстием из материала Д16ЧТ, испытанная в ЦАГИ (\bullet);
- $\Delta \rightarrow$, $\diamond \rightarrow$ – разрушение образцов от фреттинг-коррозии по захватам

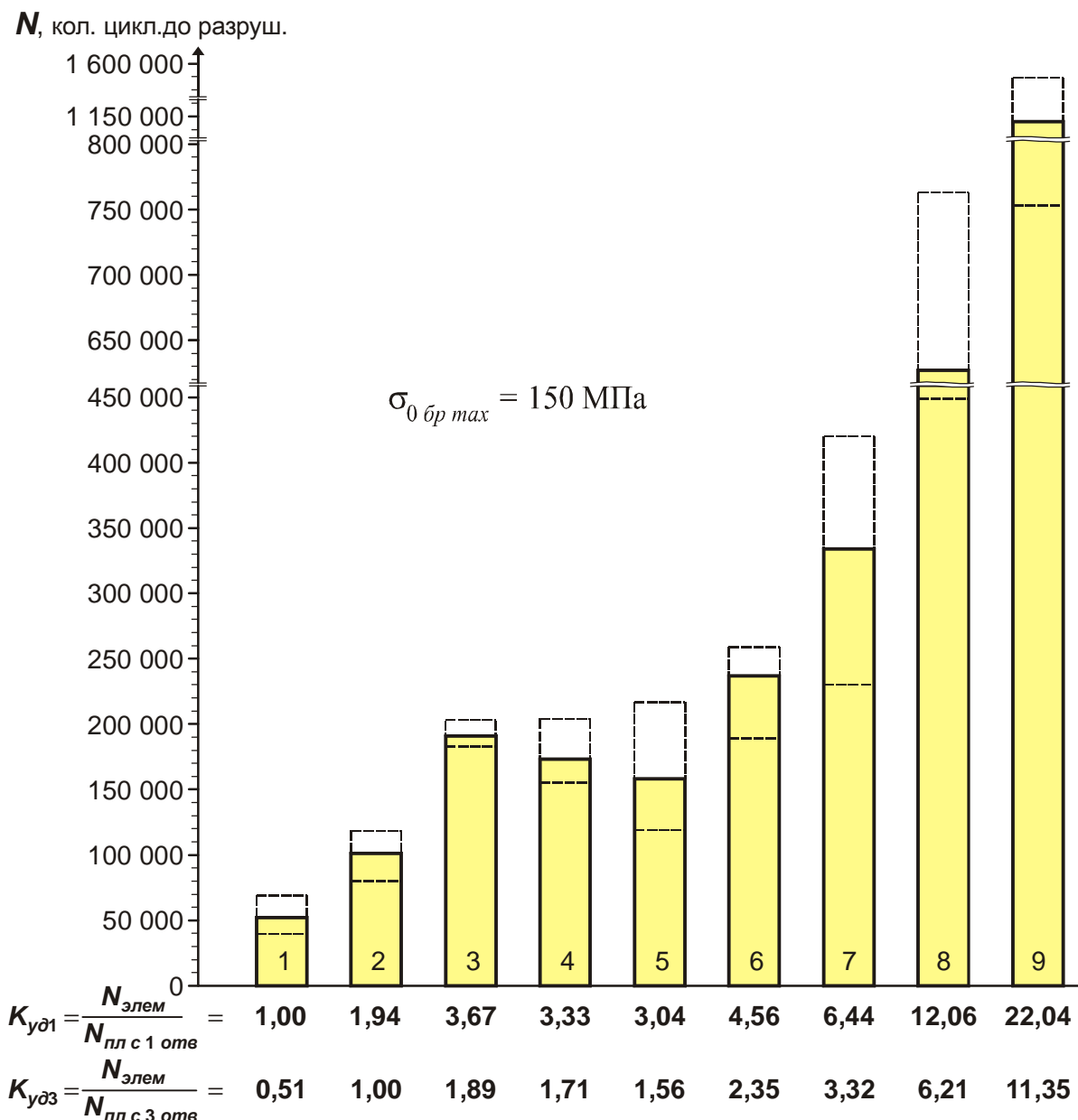


Рис. 8. Влияние методов обработки полосы ($B/d = 6$) в зоне отверстий ($\varnothing 8$ мм) на усталостную долговечность при $\sigma_{0 \text{ br max}} = 150$ МПа:

1 – полоса с одним отверстием из материала Д16Т; 2 – полоса с тремя отверстиями (расстояние между центрами отверстий $l = 12$ мм), не обработанная в зоне отверстий; 3 – полоса с тремя отверстиями ($l = 12$ мм), обработанная в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,2%; 4 – полоса с тремя отверстиями ($l = 12$ мм), обработанная в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,6%; 5 – полоса с тремя отверстиями ($l = 12$ мм), обработанная в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 2%; 6 – полоса с тремя отверстиями ($l = 12$ мм), обработанная в зоне отверстий дорнованием с относительным натягом 3%; 7 – полоса с тремя отверстиями ($l = 12$ мм), обработанная в зоне отверстий методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации; 8 – полоса с тремя отверстиями ($l = 12$ мм), обработанная в зоне отверстий методом последовательного применения раскатки стенок отверстий с относительным натягом 0,4% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации; 9 – полоса с тремя отверстиями, обработанная в зоне отверстий методом последовательного применения дорнования стенок отверстий с относительным натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации

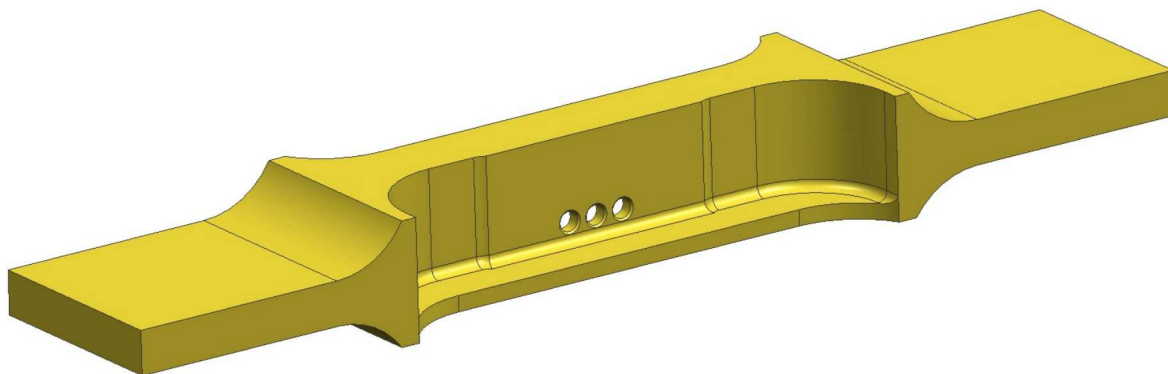


Рис. 9. Трехмерная модель конструктивно-подобного образца стрингера для проведения усталостных испытаний

Конструктивно-подобные образцы стрингеров были изготовлены из плиты Д16Т толщиной 55 мм путем механического фрезерования на вертикально- и горизонтально-фрезерных станках.

После выполнения отверстий и обработки стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива (ОПТ) образцы прошли дробеструйную обработку вертикальной полки стрингера (с двух сторон) в зоне отверстий в соответствии с ПИ 1.4.379-91. 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 проводили на гидравлической установке для усталостных и статических испытаний ЦДМ-10ПУ в проблемной научно-исследовательской лаборатории ресурса самолетных конструкций Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

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

Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рис. 10.

Дальнейшие испытания по определению влияния конструктивно-технологических параметров на усталостную долговечность конструктивно-подобных образцов стрингеров проводили на уровне нагружения: $\sigma_{\bar{\sigma}p \min} = -30$ МПа, $\sigma_{\bar{\sigma}p \max} = 100$ 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 (6,5 мм) стрингера к захвату.

Среднее значение долговечности составило $N_{cp} = 195\ 880$ циклов нагружения. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рис. 11.

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 полкой и 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 нагрузки образцы разрушались в сечении по оси крайнего отверстия.

При этом 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 рис. 12.

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, выше усталостной долговечности стрингера с тремя отверстиями – более чем в 10 раз.

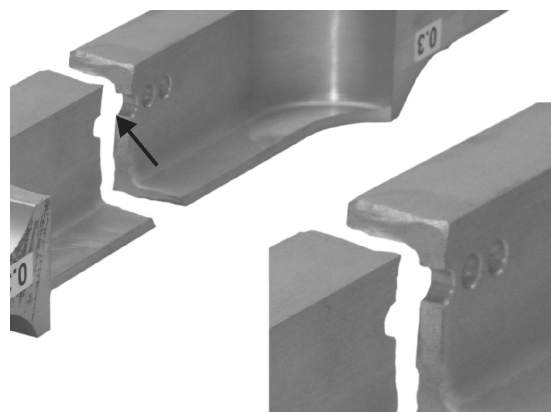


Рис. 10. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобного образца стрингера с тремя отверстиями

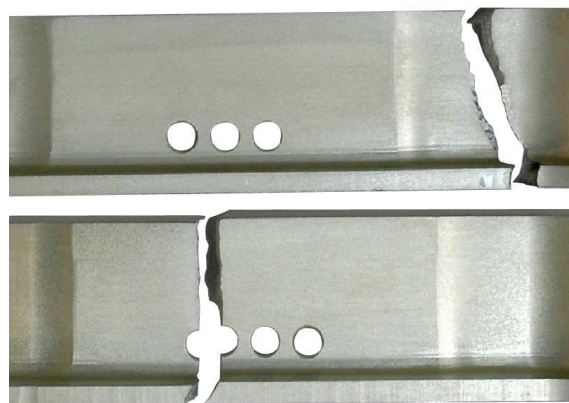


Рис. 11. Зоны и характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов стрингеров с ОПТ (материал Д16Т), обработанных в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий с относительным натягом 0,3% на уровне нагружения $\sigma_{бр\ min} = -30$ МПа,

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

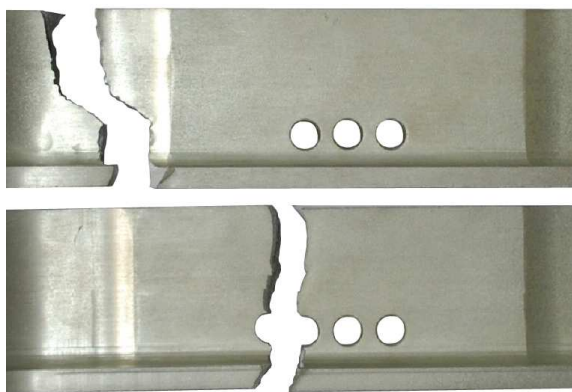


Рис. 12. Зоны и характер усталостного разрушения конструктивно-подобных образцов стрингеров с ОПТ (материал Д16Т), обработанных в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом 3% на уровне нагружения $\sigma_{\text{бр min}} = -30$ МПа,

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

испытания оставшихся образцов продолжились на более высоких уровнях нагружения. При увеличении нагрузки образцы разрушались в сечении по оси крайнего отверстия, при этом разрушение одного образца произошло в сечении по оси центрального отверстия.



Рис. 13. 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: $\sigma_{\text{бр min}} = -30$ МПа,

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

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, рисков, царапин. Поэтому необходимо следить за тем, чтобы стрингер полностью соответствовал ТУ, 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

При этом 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 $\sigma_{\text{бр min}} = -30$ МПа, $\sigma_{\text{бр max}} = 100$ МПа превышает 1 000 000 циклов нагружения.

Однако она может быть ограничена появлением усталостных трещин в зонах других концентраторов напряжений.

Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рис. 13.

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 обжата, 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 ТУ, которые указаны в чертеже.

Конструктивно-подобные образцы стрингеров с тремя отверстиями, обработанные в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжата, испытывали на двух уровнях нагружения: $\sigma_{\bar{p} \min} = -30$ МПа, $\sigma_{\bar{p} \max} = 100$ МПа и $\sigma_{\bar{p} \min} = 0$ МПа, $\sigma_{\bar{p} \max} = 150$ МПа.

При обработке конструктивно-подобных образцов стрингеров в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжата на уровне нагружения $\sigma_{\bar{p} \min} = -30$ МПа, $\sigma_{\bar{p} \max} = 100$ МПа при достижении $N = 10^6$ циклов нагружения образцы стрингеров не разрушились. После этого испытания образцов продолжились на уровне нагружения $\sigma_{\bar{p} \min} = 0$ МПа, $\sigma_{\bar{p} \max} = 150$ МПа.

Усталостное разрушение образцов происходило в центральной зоне стенки стрингера, т.е. вне зоны отверстий для перетекания топлива. Зоны и характер усталостного разрушения образцов показаны на рис. 14.

На уровне нагружения $\sigma_{\bar{p} \min} = 0$ МПа, $\sigma_{\bar{p} \max} = 150$ МПа при обработке конструктивно-подобных образцов стрингеров в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжата усталостное разрушение образцов происходило в центральной зоне стенки стрингера, т.е. вне зоны отверстий для перетекания топлива.

Среднее значение долговечности составило $N_{cp} = 265\ 500 \uparrow$ циклов нагружения. Зоны и характер усталостного разрушения образцов показаны на рис. 15.

В результате проведения усталостных испытаний установлено, что усталостная долговечность конструктивно-подобных образцов стрингеров, обработанных в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжата, выше усталостной долговечности стрингера с тремя отверстиями на уровне нагружения $\sigma_{0 \bar{p} \max} = 150$ МПа более чем в 3,5 раза, на уровне нагружения $\sigma_{\bar{p} \min} = -30$ МПа, $\sigma_{\bar{p} \max} = 100$ МПа – более чем в 10 раз.

По результатам усталостных испытаний установлено, что усталостная долговечность конструктивно-подобных образцов стрингеров, обработанных в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий, барьерным обжатием в виде лунок сег-



Рис. 14. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобного образца стрингера, обработанного в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжата



Рис. 15. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобного образца стрингера (материал Д16Т), обработанного в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжата на уровне нагружения:

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

ментной конфигурации, последовательным применением дорнования и барьерного обжата, на эксплуатационном уровне нагружения $\sigma_{\text{бр min}} = -30 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{бр max}} = 100 \text{ МПа}$ превышает 10^6 циклов нагружения.

Ресурс стрингера с отверстиями для перетекания топлива в рассматриваемом сечении получаем делением долговечности на коэффициент надежности, определенный в соответствии с Нормами летной годности [6]:

$$T = N/\eta,$$

где η – коэффициент надежности, значение которого на стадии рабочего проектирования принимают равным 6.

Тогда ресурс стрингера

$$T = N/\eta = 10^6 / 6 = 165\,000 \text{ эквивалентных полетов.}$$

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

Выводы

Разработанные конструктивно-технологические методы обработки конструктивных элементов панелей крыла в зоне системы отверстий для перетекания топлива дорнованием стенок отверстий барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации, последовательным применением дорнования стенок отверстий и барьерного обжата позволяют обеспечить заданные ресурсные характеристики панелей крыла в зоне системы отверстий для перетекания топлива.

В качестве критерия оценки влияния конструктивно-технологических параметров конструктивных элементов целесообразно использовать величину удельной энергии деформирования. Применение этого критерия позволяет спрогнозировать зоны вероятного усталостного разрушения и усталостную долговечность конструктивно-силовых элементов планера самолета.

Результаты испытаний усталостной долговечности образцов подтвердили правильность выбранного критерия оценки эффективности и возможность прогнозирования влияния конструктивно-технологических факторов на усталостную долговечность конструктивных элементов в зонах функциональных отверстий.

Для обеспечения надежного достижения заданных ресурсных характеристик целесообразно использовать комбинированный метод обработки конструктивных элементов в зоне системы отверстий: последовательное применение дорнования стенок отверстий и барьерного обжата в виде лунок сегментной конфигурации.

Список литературы

1. 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.
2. Гребеников А.Г. Метод анализа влияния упрочнения на характеристики локального напряженно-деформированного состояния и долговечность панели крыла в зоне отверстий для перетекания топлива / А.Г. Гребеников, А.М. Гуменный, Ю.А. Мовчан // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 36(1). – Х., 2004. – С. 67 – 80.
3. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования сборных самолетных конструкций регламентируемой долговечности / А.Г. Гребеников // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 23. – Х., 2004. – С. 191 – 200.
4. Исследование выносливости нижних панелей крыла с отверстиями для перетекания топлива / В.П. Рычик, Е.А. Литвиненко, Н.Т. Остапенко, Е.Т. Василевский // Труды научно-техн. конф. по выносливости и ресурсу авиационных конструкций, ноябрь 1976, под ред. А.З. Воробьева и Н. Г. Белого. – С. 100-103.
5. Метод анализа характеристик локального НДС при растяжении пластин с отверстиями / Е.Т. Василевский, В.А. Гребеников, А.М. Гуменный, С.П. Светличный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 35. – Х., 2007. – С. 13 – 29.
6. Нормы летной годности самолетов транспортной категории (АП-25). – М.: МАК, 1994 – 322 с.
7. Обеспечение ресурса высоконагруженных элементов конструкции планера самолета с функциональными отверстиями / Г.А. Кривов, В.А. Матвиенко, Р.И. Гирш и др. // Технологические системы. – К.: УкрНИИАТ. – 2009. – Вып. 5(49). – С. 94 – 100.
8. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / А.И. Пекарш, Ю.М. Тарасов, Г. А. Кривов и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.
9. Соппротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
10. Технология выполнения высокоресурсных соединений / В.Ф. Пширков, Я.Н. Робаковский, А.С. Тарасов и др. – М.: ЦАГИ, 1980. – 171 с.
11. Экспериментальные исследования влияния конструктивных и технологических факторов на выносливость типовых элементов авиационных конструкций / Б.И. Олькин, Н.И. Гильванова, Т.С. Родченко и др. // Труды ЦАГИ. – 1980. – 86 с.

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

Поступила в редакцию 13.12.09.

Конструктивно-технологічні методи забезпечення високоресурсних характеристик стрингерів баків-кесонів крила в зоні отворів для перетікання палива

Розроблено конструктивно-технологічні методи оброблення конструктивних елементів панелей крила в зоні системи отворів для перетікання палива дорнуванням стінок отворів, бар'єрним обтисненням у вигляді лунок сегментної конфігурації, послідовним застосуванням дорнування стінок отворів та бар'єрного обтиснення, які дозволяють забезпечити задані ресурсні характеристики панелей крила в зоні системи отворів для перетікання палива.

Ключові слова: втомна довговічність, стрингер, отвір для перетікання палива, дорнування, бар'єрне обтиснення.

Design-technological Methods Allowing to Ensure Durable Characteristics of Wing Integral Tank Stringers in Area of Fuel Flow Holes

The developed design-technological methods of wing panel structural components hardening in the area of the fuel flow holes using mandrelling of the hole side, barrier compression in the form of segmented configuration holes as well as serial application of the hole side mandrelling and barrier compression allow to ensure assigned life characteristics of the wing panels in the area of the fuel flow holes.

Keywords: fatigue life, stringer, fuel flow hole, stringer, burnishing, barrier compression.