

УДК 629.7.01

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

Экспериментальное исследование влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжата на усталостную долговечность стрингеров 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»*

Проведено экспериментальное исследование влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжата на усталостную долговечность конструктивно-подобных образцов стрингеров с системой отверстий для перетекания топлива. Разработанный способ обработки стрингеров последовательным применением дорнования и барьерного обжата позволяет гарантированно достигать заданных ресурсных характеристик панелей крыла в зоне отверстий для перетекания топлива.

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

Одним из приоритетных направлений развития промышленности Украины является создание авиационной техники. Для обеспечения конкурентоспособности на мировых рынках новой авиационной техники необходимо вести новые научные разработки и создавать методы обеспечения высокоресурсных характеристик элементов конструкции планера самолета.

При разработке и создании нового самолета обеспечение ресурса по условиям выносливости является одной из важнейших задач. Как показывают практика эксплуатации самолетов и проведенные ресурсные испытания натурных конструкций, ресурс конструкции в целом определяется ресурсом отдельных типовых нерегулярностей. При проектировании и конструировании нерегулярных зон конструкции их долговечность должна быть равна долговечности регулярной зоны или превышать её.

Современные самолеты транспортной категории проектируют и изготавливают с учетом заданного ресурса, который составляет 60 тысяч полетов (80 тысяч летных часов) или 25 – 30 лет эксплуатации.

Крылья современных самолетов транспортной категории (рис. 1), как правило, имеют кессонную конструкцию. Кессон крыла одновременно является емкостью для размещения топлива – баком-кессоном. Для уменьшения невырабатываемого и несливаемого остатков топлива в баках-кессонах в вертикальных полках стрингерного набора нижних панелей выполняют отверстия для перетекания топлива [7].

Элементы нижней растянутой в полете панели (стрингеры и обшивка) являются силовыми элементами конструкции планера самолета, определяющими его ресурс, поэтому одной из основных 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.

Практика ресурсных испытаний панелей крыла самолета показала то, что отверстия для перетекания топлива являются очагами усталостных трещин и во многих случаях ограничивают ресурс конструкции крыла. Характер усталостного разрушения конструкции с отверстиями для перетекания топлива носит многоочаговый характер с частичным или полным разрушением многих вертикальных полок стрингеров, часто без выхода усталостных трещин на внешнюю поверхность обшивки крыла. Поэтому задача гарантированного достижения выносливости зон конструкции с нерегулярностями типа отверстий для перетекания топлива до уровня, равного уровню выносливости регулярной зоны растянутой панели крыла или превышающего его, приобрела большую актуальность [2, 7, 10].

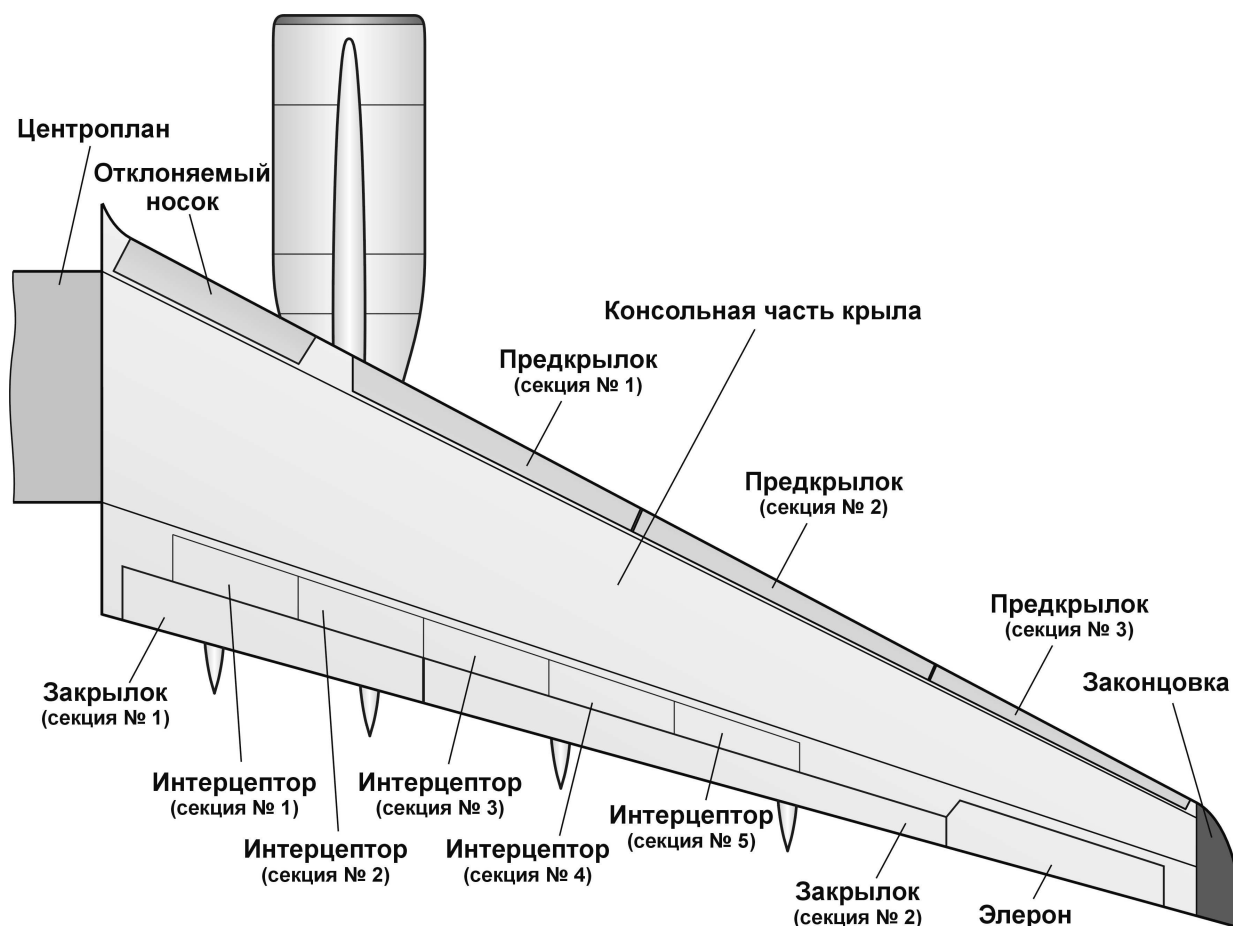


Рис. 1. Схема крыла современного транспортного самолета

В работах [6, 8] приведены методы повышения долговечности конструктивных элементов с одним отверстием – раскаткой, дорнованием и глубоким пластическим деформированием, однако в элементах конструкций самолетов применяют и групповые отверстия. В работе [2] приведена схема выполнения отверстий для перетекания топлива в виде группы отверстий с центральным отверстием большего диаметра и двумя отверстиями меньшего диаметра по краям, перемычка между отверстиями – 1 мм. На рис. 2 показана схема участка панели крыла с группой отверстий для перетекания топлива.

Выполнение таких отверстий является сложной технологической операцией, при проведении которой возможны технологические отклонения, вызывающие снижение усталостной долговечности панели. Для гарантированного достижения заданных ресурсных характеристик целесообразно применить комбинированный метод обработки конструктивных элементов в зоне системы отверстий. Однако при такой схеме (рис. 2) обработка стенок отверстий дорнованием или раскаткой невозможна, так как для выполнения таких технологических операций необходимо, чтобы перемычка между отверстиями была $t \geq 0,5d$.

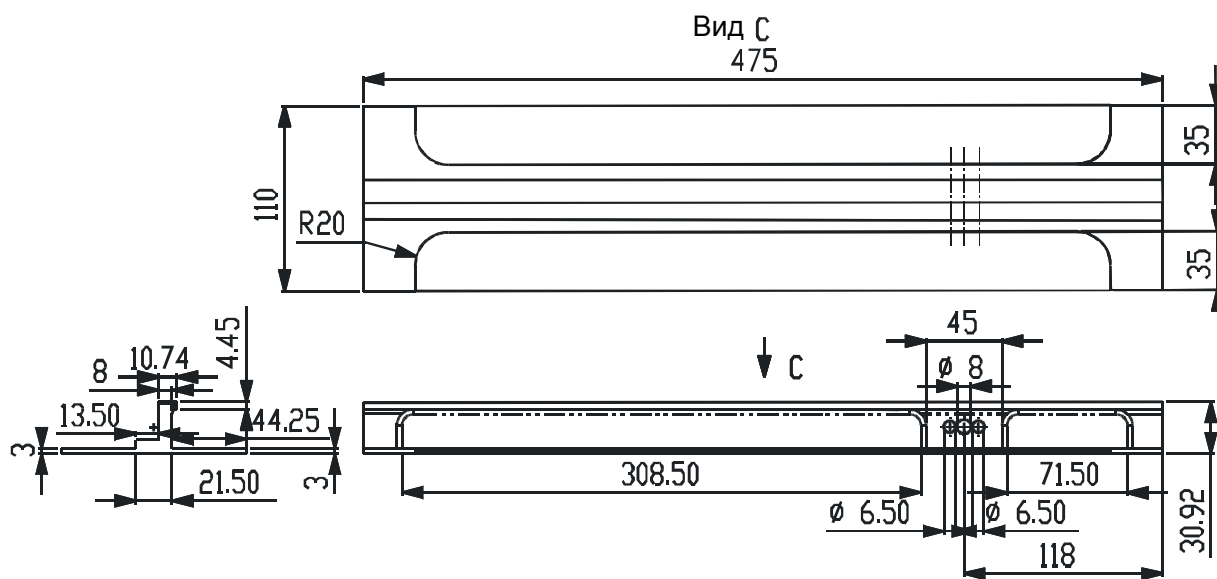


Рис. 2. Геометрические параметры участка панели крыла с системой отверстий

Для достижения заданного ресурса панелей крыла авторами предложен и исследован комбинированный способ повышения усталостной долговечности конструктивных элементов панелей крыла в зоне системы из трех отверстий для перетекания топлива (расстояние между центрами отверстий $t \geq 1,5d$, перемычка между стенками отверстий – $0,5d$) последовательным применением дорнования и барьерного обжатия. Для комбинированного варианта обработки конструктивных элементов в зоне отверстий были проведены численные исследования характеристик локального НДС [1, 3, 4, 5], отработана технология выполнения комбинированной обработки в зоне отверстий для перетекания топлива и выполнены экспериментальные исследования усталостной долговечности пластин, обработанных в зоне отверстий предложенным способом [9].

Целью данной работы является экспериментальные исследования усталостной долговечности конструктивно-подобных образцов стрингеров с тремя отверстиями диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм, в зоне отверстий выполнено усиление вертикальной полки стрингера для обеспечения статической прочности), обработанных в зоне отверстий последовательным применением дорнования стенок отверстий и барьерное обжатие в виде лунок сегментной конфигурации.

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

Трехмерная модель конструктивно-подобных образцов стрингеров с ОПТ показана на рис. 3.

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.

Конструктивно-подобные образцы стрингеров (рис. 4) были изготовлены из плиты Д16Т толщиной 55 мм путем механического фрезерования на вертикально- и горизонтально-фрезерных станках в ХАИ.

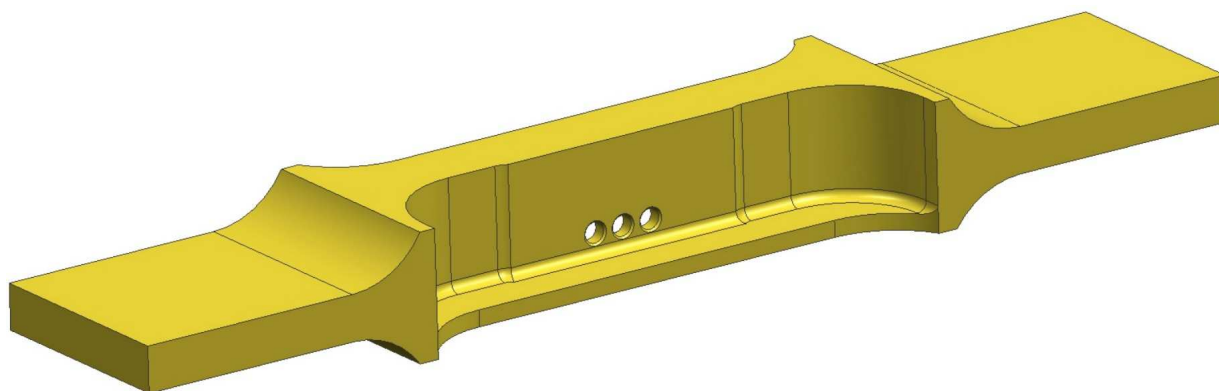


Рис. 3. Трехмерная модель конструктивно-подобного образца стрингера для проведения усталостных испытаний



Рис. 4. Конструктивно-подобные образцы стрингеров

Отверстия, обработка стенок отверстий дорнованием, барьерное обжатие в зоне отверстий в виде лунок сегментной конфигурации выполнены в ОАО УкрНИИАТ. Трехмерная модель дорна представлена на рис 5, трехмерные модели обжимок – на рис. 6.

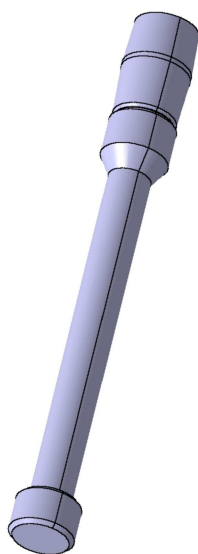


Рис. 5. Трехмерная модель дорна

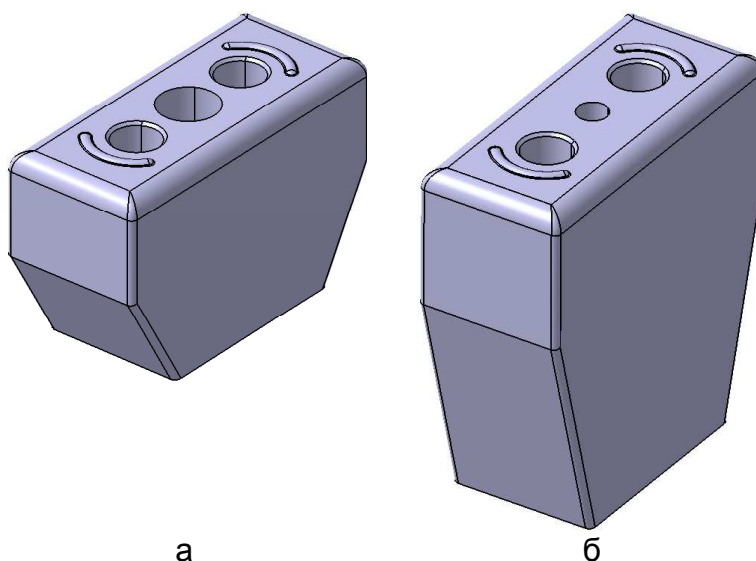


Рис. 6. Трехмерные модели:
а – верхней обжимки; б – нижней обжимки

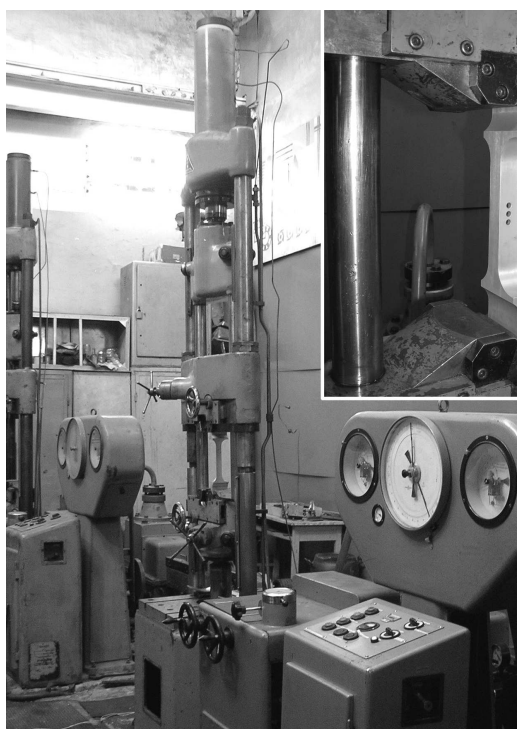


Рис. 7. Установка для проведения испытаний образцов стрингеров

После выполнения отверстий и обработки стрингеров в зоне ОПТ на всех образцах была проведена дробеструйная обработка вертикальной полки стрингера (с двух сторон) в зоне отверстий по 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 (рис. 7) 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 (0.1, 0.2, 0.3, 0.4) и стрингеры с тремя отверстиями, обработанные в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжатия (3.1, 3.2, 3.3, 3.4), испытывали на двух уровнях нагружения:

$$- \sigma_{\bar{\sigma}p \min} = -30 \text{ МПа}, \sigma_{\bar{\sigma}p \max} = 100 \text{ МПа}; - \sigma_{\bar{\sigma}p \min} = 0 \text{ МПа}, \sigma_{\bar{\sigma}p \max} = 150 \text{ МПа}.$$

На уровне нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}p \min} = -30 \text{ МПа}$, $\sigma_{\bar{\sigma}p \max} = 100 \text{ МПа}$ были испытаны образцы 0.3, 0.4, 3.3, 3.4. На уровне нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}p \min} = 0 \text{ МПа}$, $\sigma_{\bar{\sigma}p \max} = 150 \text{ МПа}$ были испытаны образцы 0.1, 0.2, 3.1, 3.2.

Усталостное разрушение конструктивно-подобных образцов стрингеров с тремя отверстиями 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 происходило в сечении по оси крайнего отверстия. Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 1 и 2. Характер усталостного разрушения образцов показан на рис. 8.

Таблица 1

Результаты усталостных испытаний конструктивно подобных образцов стрингеров на уровне нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}p \min} = 0 \text{ МПа}$, $\sigma_{\bar{\sigma}p \max} = 150 \text{ МПа}$

| Номер образ-ца | $F_{\bar{\sigma}p}$, мм ² | $\sigma_{\bar{\sigma}p}$, МПа | | $P_{\bar{\sigma}p}$, кг | | N , количество циклов нагружения | Зона разрушения |
|------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-----|--------------------------|------|---|-------------------------------------|
| | | min | max | min | max | | |
| 0.1 | 502,3 | 0 | 150 | 0 | 7530 | 73 300 | в сечении по оси крайнего отверстия |
| 0.2 | 512,1 | 0 | 150 | 0 | 7680 | 84 300 | в сечении по оси крайнего отверстия |
| Среднее значение | | | | | | 78 800 | |

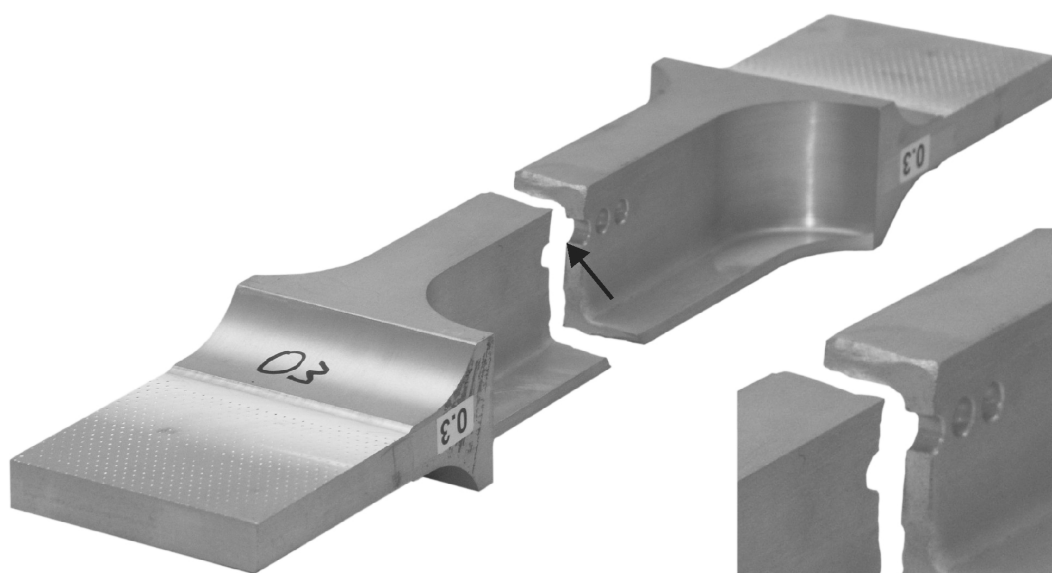
Таблица 2

Результаты усталостных испытаний конструктивно-подобных образцов стрингеров на уровне нагружения $\sigma_{\bar{\sigma}p \min} = -30 \text{ МПа}$, $\sigma_{\bar{\sigma}p \max} = 100 \text{ МПа}$

| Номер образ-ца | $F_{\bar{\sigma}p}$, мм ² | $\sigma_{\bar{\sigma}p}$, МПа | | $P_{\bar{\sigma}p}$, кг | | N , количество циклов нагружения | Зона разрушения |
|------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-----|--------------------------|-------|---|-------------------------------------|
| | | min | max | min | max | | |
| 0.3 | 514,5 | -30 | 100 | -1540 | 5140 | 69 000 | в сечении по оси крайнего отверстия |
| 0.4 | 499,6 | -30 | 100 | - 1500 | 5 000 | 131 200 | в сечении по оси крайнего отверстия |
| Среднее значение | | | | | | 100 100 | |



а



б

Рис. 8. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобного образца стрингера с тремя отверстиями (материал Д16Т) на уровне нагружения:

а – $\sigma_{\text{бр min}} = 0$ МПа, $\sigma_{\text{бр max}} = 150$ МПа; б – $\sigma_{\text{бр min}} = -30$ МПа, $\sigma_{\text{бр max}} = 100$ МПа

На уровне нагружения $\sigma_{\text{бр min}} = 0$ МПа, $\sigma_{\text{бр max}} = 150$ МПа при обработке конструктивно-подобных образцов стрингеров в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжатия было испытано два образца. Усталостное разрушение образцов происходило в центральной зоне стенки стрингера, т.е. вне зоны отверстий для перетекания топлива. Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 3. Зоны и характер усталостного разрушения образцов показаны на рис. 9.

Таблица 3

Результаты усталостных испытаний конструктивно-подобных образцов стрингеров, обработанных в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжатия на уровне нагружения $\sigma_{\bar{b}p \min} = 0$ МПа,

$$\sigma_{\bar{b}p \max} = 150 \text{ МПа}$$

| Номер образца | $F_{\bar{b}p}$, мм ² | $\sigma_{\bar{b}p}$, МПа | | $P_{\bar{b}p}$, кг | | N , количество циклов нагружения | Зона разрушения |
|------------------|----------------------------------|---------------------------|-----|---------------------|-------|------------------------------------|-------------------------------------|
| | | min | max | min | max | | |
| 3.1 | 503,4 | 0 | 150 | 0 | 7 550 | 341 000↑ | в центральной зоне стенки стрингера |
| 3.2 | 511,5 | 0 | 150 | 0 | 7 670 | 190 000↑ | в центральной зоне стенки стрингера |
| Среднее значение | | | | | | 265 500↑ | |



Рис. 9. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобного образца стрингера (материал Д16Т), обработанного в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжатия на уровне нагружения

$$\sigma_{\bar{b}p \min} = 0 \text{ МПа}, \sigma_{\bar{b}p \max} = 150 \text{ МПа}$$

На уровне нагружения $\sigma_{\bar{b}p \min} = -30$ МПа, $\sigma_{\bar{b}p \max} = 100$ МПа при обработке конструктивно-подобных образцов стрингеров в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжатия было испытано два образца. При достижении $N = 10^6$ циклов нагружения образцы стрингеров не разрушились. После этого испытания образцов 3.3 и 3.4 продолжились на уровне нагружения $\sigma_{\bar{b}p \min} = 0$ МПа, $\sigma_{\bar{b}p \max} = 150$ МПа. При такой нагрузке образец 3.3 дополнительно выдержал 329 000 циклов нагружения, а образец 3.4 – 282 000 циклов нагружения. Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 4. Зоны и характер усталостного разрушения образцов показаны на рис. 10.

Таблица 4

Результаты усталостных испытаний конструктивно-подобных образцов стрингеров, обработанных в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжатия на уровне нагружения

$$\sigma_{\bar{b}p \min} = -30 \text{ МПа}, \sigma_{\bar{b}p \max} = 100 \text{ МПа}$$

| Номер образца | $F_{\bar{b}p}$, мм ² | $\sigma_{\bar{b}p}$, МПа | | $P_{\bar{b}p}$, кг | | N , количество циклов нагружения | Зона разрушения |
|---------------|----------------------------------|---------------------------|-----|---------------------|-------|------------------------------------|-------------------------------------|
| | | min | max | min | max | | |
| 3.3 | 510,2 | -30 | 100 | -1530 | 5 100 | 1 000 000 [↑] | не разрушился |
| | | 0 | 150 | 0 | 7 650 | 329 000 | по радиусному переходу |
| 3.4 | 513,8 | -30 | 100 | -1540 | 5 130 | 1 000 000 [↑] | не разрушился |
| | | 0 | 150 | 0 | 7 710 | 282 000 | в сечении по оси крайнего отверстия |

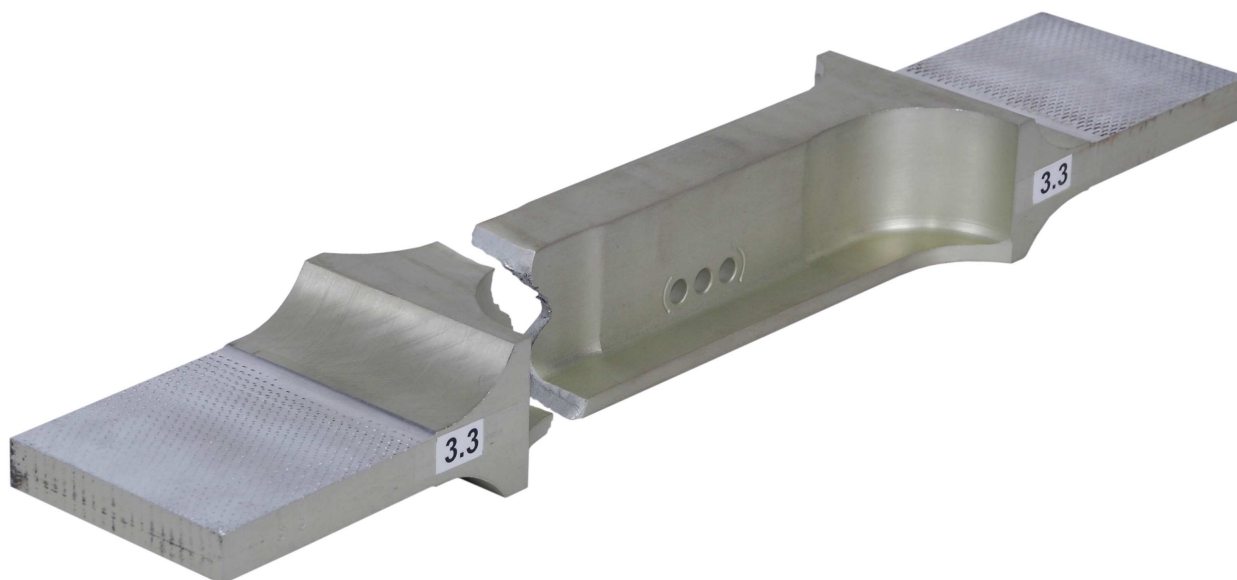


Рис. 10. Характер усталостного разрушения конструктивно-подобного образца стрингера (материал Д16Т), обработанного в зоне отверстий последовательным применением дорнования и барьерного обжатия на уровне нагружения

$$\sigma_{\bar{b}p \min} = -30 \text{ МПа}, \sigma_{\bar{b}p \max} = 100 \text{ МПа}$$

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

При типовом полетном цикле нагружения крыла («земля – воздух – земля»), который приведен к эквивалентному по повреждаемости циклу нагружения ($\sigma_{бр \min} = -30$ МПа, $\sigma_{бр \max} = 100$ МПа), усталостная долговечность стрингера в зоне отверстий для перетекания топлива превышает 10^6 циклов нагружения.

Тогда ресурс стрингера в зоне отверстий для перетекания топлива при коэффициенте надежности η , равном 6, составит

$$T \geq N/\eta = 10^6 / 6 = 165\,000 \text{ циклов нагружения (типовых полетов).}$$

Таким образом, разработанный способ обработки стрингеров последовательным применением дорнования и барьерного обжатия позволяет гарантированно достигать заданных ресурсных характеристик панелей крыла в зоне отверстий для перетекания топлива. Способ рекомендуется для внедрения в практику проектирования и производства растянутых панелей крыла с отверстиями для перетекания топлива.

Список литературы

1. Влияние последовательного применения дорнования и барьерного обжатия на характеристики локального НДС стрингера с отверстиями для перетекания топлива / А.Г. Гребеников, А.М. Гуменный, С.П. Светличный, В.А. Матвиенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 40. – Х., 2007. – С. 54 – 69.
2. Исследование выносливости нижних панелей крыла с отверстиями для перетекания топлива / В.П. Рычик, Е.А. Литвиненко, Н.Т. Остапенко, Е.Т. Василевский // Труды науч.-техн. конф. по выносливости и ресурсу авиационных конструкций, ноябрь 1976, под ред. А.З. Воробьева и Н. Г. Белого.– С. 100-103.
3. Метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС при растяжении / А.Г. Гребеников, С.П. Светличный, В.А. Матвиенко, А. М. Гуменный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 37. – Х., 2007. – С. 5 – 17.
4. Метод анализа влияния последовательного применения раскатки и барьерного обжатия 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.
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. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / А.И. Пекарш, Ю.М. Тарасов, Г. А. Кривов и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.

7. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
8. Технология выполнения высокоресурсных соединений / В.Ф. Пширков, Я.Н. Робаковский, А.С. Тарасов и др. – М.: ЦАГИ, 1980. – 171 с.
9. Экспериментальное исследование влияния последовательного упрочнения пластин в зоне отверстий раскаткой и барьерным обжатием, дорнованием и барьерным обжатием на их усталостную долговечность / А.Г. Гребеников, В.А. Матвиенко, А.М. Гуменный, А.С. Третьяков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 37. – Х., 2007. – С. 44 – 52.
10. 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 02.09.09.

Експериментальне дослідження впливу послідовного застосування дорнування та бар'єрного обтиснення на втомну довговічність стрингерів у зоні отворів для перетікання палива

Проведено експериментальне дослідження впливу послідовного застосування дорнування та бар'єрного обтиснення на втомну довговічність конструктивно-подібних зразків стрингерів із системою отворів для перетікання палива. Розроблений спосіб обробки стрингерів послідовним застосуванням дорнування та бар'єрного обтиснення дозволяє гарантовано досягати заданих ресурсних характеристик панелей крила в зоні отворів для перетікання палива.

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

Experimental research of impact of consecutive burnishing and barrier compression on fatigue life of stringers in the area of fuel flow holes

The experimental research of impact of consecutive usage of burnishing and barrier compression on fatigue life of constructively similar models of stringers with the system of fuel flow holes was conducted. The developed method of stringer processing by consecutive usage of burnishing and barrier compression ensures the achievement of specified resource characteristics of wing panels in the area of fuel flow holes.

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