

## **Экспериментальное исследование влияния последовательного упрочнения пластин в зоне отверстий раскаткой и барьерным обжатием, дорнованием и барьерным обжатием на их усталостную долговечность**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,  
ОАО Украинский научно-исследовательский институт  
авиационных технологий*

Крылья современных самолетов транспортной категории, как правило, имеют кессонную конструкцию. Внутри кессона размещают топливные баки-кессоны. Для уменьшения невырабатываемого и несливаемого остатков топлива в баках-кессонах в вертикальных полках стрингерного набора нижних панелей выполняют отверстия для перетекания топлива [1].

Как показывает практика ресурсных испытаний, эти отверстия являются очагами усталостных трещин и во многих случаях ограничивают ресурс конструкции крыла. Вид таких разрушений носит многоочаговый характер с частичным или полным разрушением многих ребер, часто без выхода усталостных трещин на внешнюю поверхность обшивки крыла. Поэтому задача разработки надежного способа повышения выносливости зон конструкции с нерегулярностями типа отверстий для перетекания топлива и дренажа до уровня выносливости регулярных зон нижних панелей крыла приобрела большую актуальность [1, 2, 3].

В работах [4, 5] приведены методы упрочнения пластин с одним отверстием – раскаткой, дорнованием и глубоким пластическим деформированием, однако в элементах конструкций самолетов применяют и групповые отверстия. Поэтому вопрос влияния различных методов упрочнения и их комбинаций на долговечность пластин с группой отверстий требует проведения численных и экспериментальных исследований.

В данной работе предложены два комбинированных метода повышения усталостной долговечности пластин с отверстиями:

- последовательное применение раскатки и барьерного обжатия;
- последовательное применение дорнования и барьерного обжатия.

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований, связанных с определением влияния последовательного упрочнения пластины с тремя отверстиями диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм) в зоне отверстий раскаткой и барьерным обжатием, дорнованием и барьерным обжатием на характеристики их усталостной долговечности.

В рамках решения данной задачи, а также получения коэффициентов увеличения долговечности необходимо было провести также экспериментальные исследования характеристик усталостной долговечности базовых образцов – пластины с одним отверстием и пластины с тремя неупрочненными отверстиями.

Для экспериментальных исследований по определению характеристик усталостной долговечности разработаны стандартные образцы: пластина с одним отверстием ( $B/d = 6$ ) (рис. 1), пластина с тремя отверстиями диаметром 8 мм

(расстояние между центрами отверстий – 12 мм), неупрочненная (рис. 2) и упрочненная (рис. 3) в зоне отверстий. Для устранения заусенцев, получаемых после сверления отверстий, на всех отверстиях снята фаска размером  $0,5 \times 45^\circ$ . Толщина образца пластины – 4,5 мм.

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».

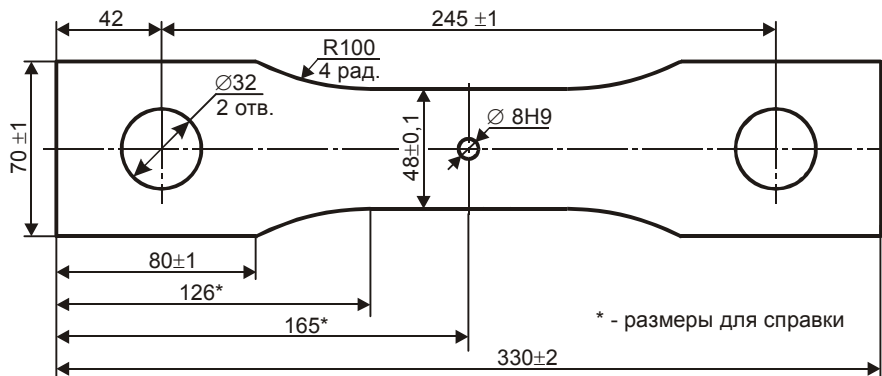


Рис. 1. Пластина с одним отверстием  $\varnothing 8$  мм

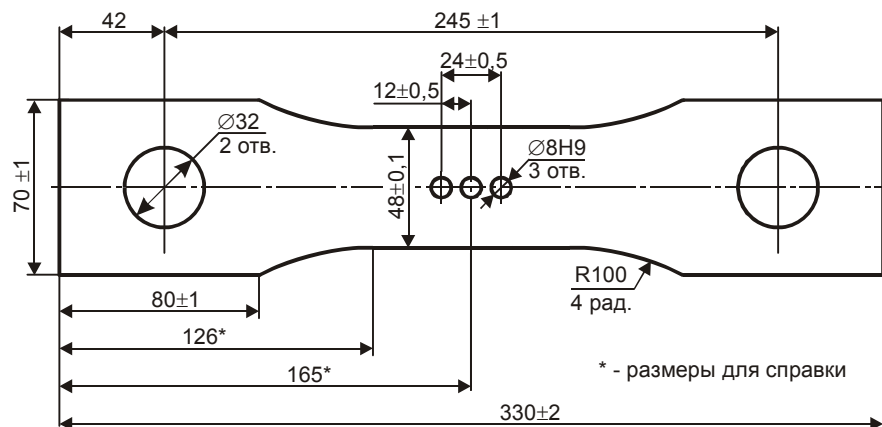


Рис. 2. Пластина с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм

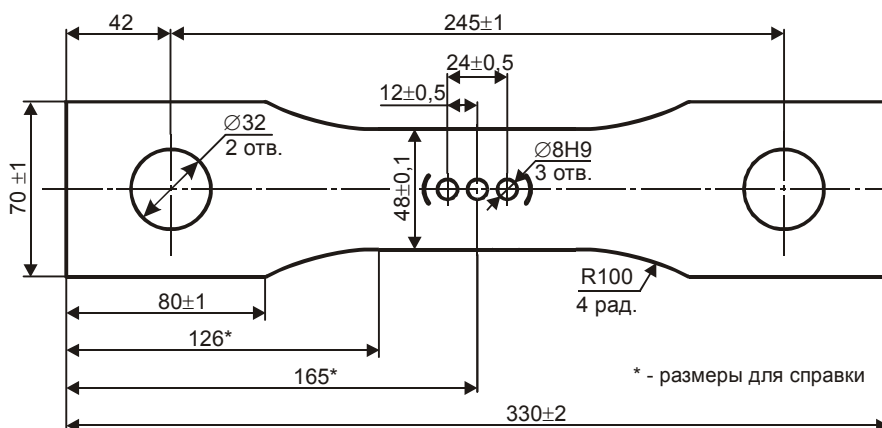


Рис. 3. Пластина с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм, упрочненная в зоне отверстий

Заготовки образцов для проведения усталостных испытаний пластин с отверстиями были изготовлены в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» из прессованного швеллера (материал Д16Т) путем механического фрезерования по контуру.

Отверстия в неупрочненных пластинах выполнялись в ХАИ. Отверстия, упрочнение стенок отверстий раскаткой и дорнованием, барьерное обжатие пластин в зоне отверстий в виде лунок сегментной конфигурации выполнялись в ОАО УкрНИИАТ.

Для проведения усталостных испытаний были подготовлены следующие образцы:

- пластина с одним отверстием, не упрочненная в зоне отверстия (рис. 4);
- пластина с тремя отверстиями, не упрочненная в зоне отверстий (рис. 5);
- пластина с тремя отверстиями, упрочненная в зоне отверстий последовательным применением раскатки с относительным натягом 0,4% и барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации;
- пластина с тремя отверстиями, упрочненная в зоне отверстий последовательным применением дорнования с относительным натягом 2% и барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации (рис. 6).



Рис. 4. Пластина с одним неупрочненным отверстием

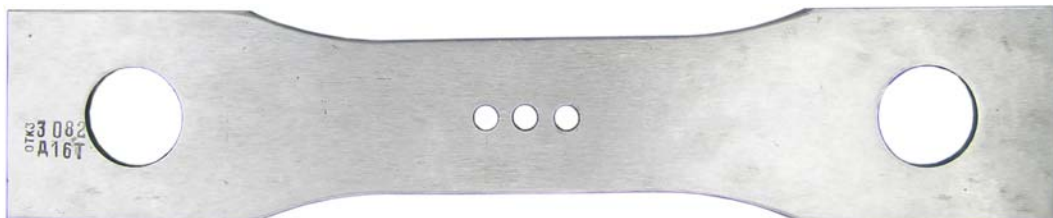


Рис. 5. Пластина с тремя неупрочненными отверстиями



Рис. 6. Пластина с тремя отверстиями, упрочненная в зоне отверстий

Испытания образцов пластин с отверстиями проведены на электромеханической машине УММ-02 (рис. 7) в проблемной научно-исследовательской лаборатории «Прочность» Национального аэрокосмического университета

им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». В испытательной машине УММ-02 образцы пластин нагружали одноосными переменными циклическими нагрузками. Частота нагружения составляла 12 Гц.



Рис. 7. Машина для проведения усталостных испытаний УММ-02

Образцы пластин испытывали на уровне циклического нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа.

На данном уровне нагружения было испытано три образца пластин с одним отверстием. Усталостное разрушение происходило в сечении по оси отверстия, и оно возникало в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия. Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 1. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рис. 8.

Таблица 1

Результаты усталостных испытаний пластин с одним отверстием при

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

Номер образца	Марка сплава	Истинные размеры пластины, мм		$\sigma_{бр\ max}^0$ , МПа	N, кол. циклов
		B	$\delta$		
1-1	Д16Т	47,8	4,55	150	40 000
1-2		47,6	4,54	150	48 000
1-3		48,2	4,55	150	69 000
Среднее значение					<b>52 000</b>

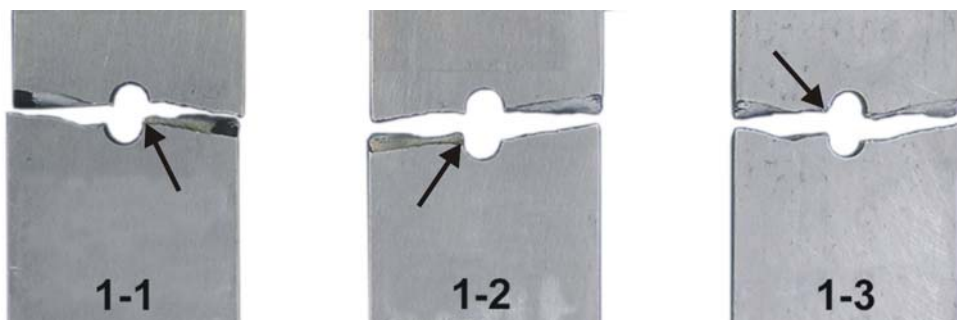


Рис. 8. Характер усталостного разрушения образцов пластин с одним отверстием ( $B/d = 48/8 = 6$ ) из прессованного профиля (материал Д16Т) на уровне нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа:  $\longrightarrow$  – зона начала усталостного разрушения

На данном уровне нагружения было испытано три образца пластин с тремя отверстиями, не упрочненных в зоне отверстий. Усталостное разрушение происходило в сечении по оси крайнего отверстия, и оно возникало в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия. Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 2. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рис. 9.

Таблица 2

Результаты усталостных испытаний пластин с тремя неупрочненными отверстиями при  $\sigma_{\text{бр max}}^0 = 150$  МПа ( $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа)

Номер образца	Марка сплава	Истинные размеры пластины, мм		$\sigma_{\text{бр max}}^0$ , МПа	N, кол. циклов
		B	$\delta$		
2-1	Д16Т	48,2	4,5	150	80 000
2-2		47,3	4,56	150	104 000
2-3		46,9	4,47	150	118 700
Среднее значение					<b>101 000</b>

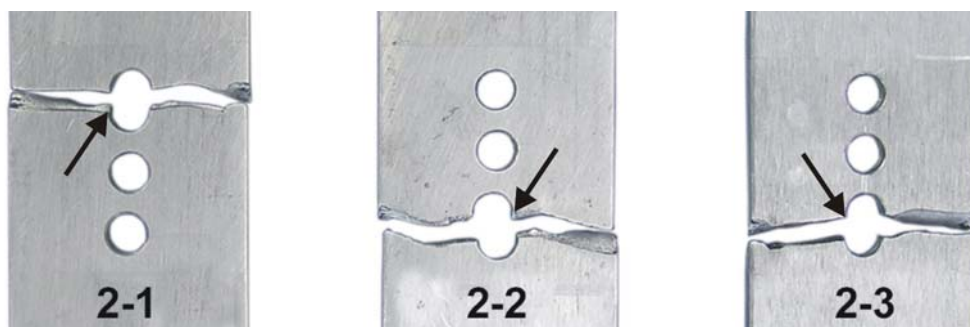


Рис. 9. Характер усталостного разрушения образцов пластин с тремя неупрочненными отверстиями ( $B/d = 48/8 = 6$ ) из прессованного профиля (материал Д16Т) на уровне нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа:  $\longrightarrow$  – зона начала усталостного разрушения

При упрочнении пластины в зоне отверстий последовательным применением раскатки с относительным натягом 0,4% и барьерного обжатия было испытано три образца: разрушение образца №3-1 происходило от поверхности образца в зоне крайнего отверстия, разрушение образца №3-2 – от поверхности образца в зоне крайнего отверстия и лунки сегментной конфигурации, разрушение образца №3-3 – от фреттинг-коррозии по захватам. Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 3. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рис. 10.

Таблица 3

Результаты усталостных испытаний пластин с тремя отверстиями, упрочненных в зоне отверстий последовательным применением раскатки с относительным натягом 0,4% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации при  $\sigma_{\text{бр max}}^0 = 150$  МПа ( $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа)

Номер образца	Истинные размеры пластины, мм		Глубина лунки при барьерном обжатии, мм	$\sigma_{\text{бр max}}^0$ , МПа	N, кол. циклов
	B	$\delta$			
3-1	48,2	4,54	0,34	150	670 000
3-2	47,5	4,54	0,32	150	449 000
3-3	48,1	4,37	0,32	150	763 000↑
Среднее значение					<b>627 000</b>

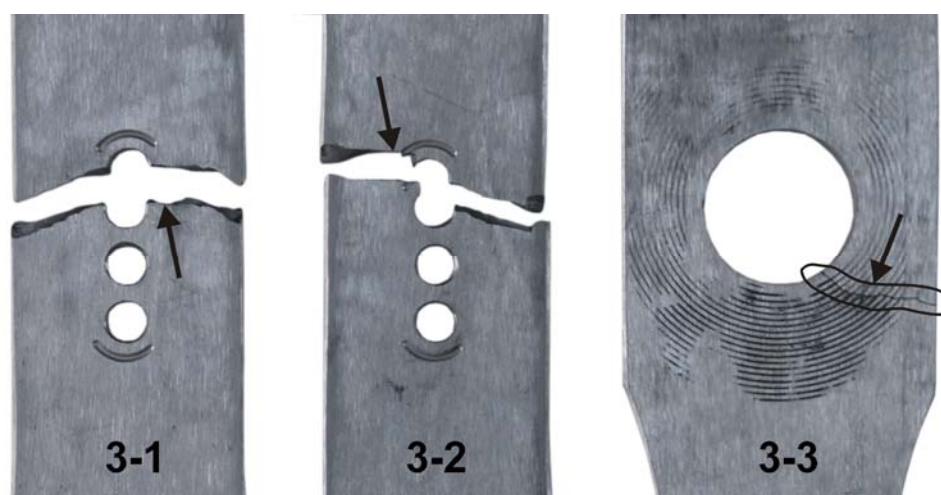


Рис. 10. Характер усталостного разрушения образцов пластин с тремя отверстиями, упрочнённых в зоне отверстий последовательным применением раскатки с относительным натягом 0,4% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации из прессованного профиля (материал Д16Т)

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

→ – зона начала усталостного разрушения

При упрочнении пластины в зоне отверстий последовательным применением дорнования с относительным натягом 2% и барьерного обжатия было испытано три образца: разрушение образца №4-1 произошло от фреттинг-коррозии по захватам, разрушение образца №4-2 – от поверхности образца в зоне радиусного перехода, разрушение образца №4-3 – в сечении по оси крайнего отверстия, и оно возникло в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия. Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 4. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рис. 11.

Таблица 4

Результаты усталостных испытаний пластин с тремя отверстиями, упрочненных в зоне отверстий последовательным применением дорнования с относительным натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации при  $\sigma_{бр\ max}^0 = 150$  МПа ( $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа)

Номер образца	Истинные размеры пластины, мм		Глубина лунки при барьерном обжатии, мм	$\sigma_{бр\ max}^0$ , МПа	N, кол. циклов
	B	$\delta$			
4-1	47,6	4,39	0,29	150	1 539 000↑
4-2	47,8	4,36	0,31	150	753 000↑
4-3	48,0	4,40	0,32	150	1 115 000
Среднее значение					<b>1 136 000</b>



Рис. 11. Характер усталостного разрушения образцов пластин с тремя отверстиями, упрочнённых в зоне отверстий последовательным применением дорнования с относительным натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации из прессованного профиля (материал Д16Т)

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

→ – зона начала усталостного разрушения

На рис. 12. показаны номограммы влияния методов упрочнения на усталостную долговечность пластин с отверстиями.

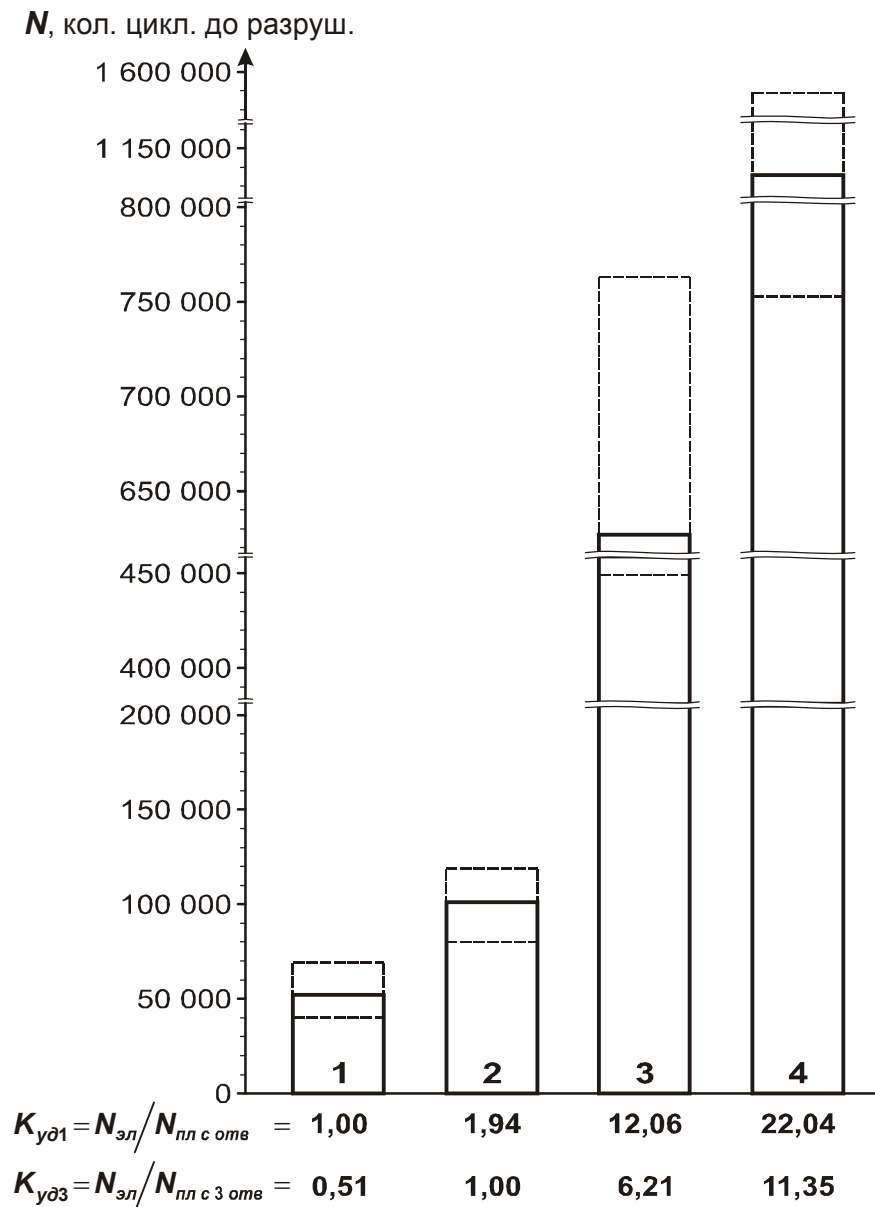


Рис. 12. Влияние количества отверстий, последовательного применения раскатки и барьерного обжатия, дорнования и барьерного обжатия на долговечность пластин с отверстиями при  $\sigma_{бр max}^0 = 150$  МПа:

- 1 - пластина с одним отверстием ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм из материала Д16Т;
- 2 - пластина с тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), не упрочнённая в зоне отверстий;
- 3 - пластина с тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), упрочнённая в зоне отверстий последовательным применением раскатки стенок отверстий с относительным натягом 0,4% и методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации;
- 4 - пластина с тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), упрочнённая в зоне отверстий последовательным применением дорнования стенок отверстий с относительным натягом 2% и методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации



В результате усталостных испытаний установлено:

- усталостная долговечность пластины с тремя отверстиями, упрочнённой в зоне отверстий последовательным применением раскатки стенок отверстий с относительным натягом 0,4% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, выше усталостной долговечности пластины с одним отверстием в 12,06 раза;
- усталостная долговечность пластины с тремя отверстиями, упрочнённой в зоне отверстий последовательным применением раскатки стенок отверстий с относительным натягом 0,4% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, выше усталостной долговечности пластины с тремя неупрочненными отверстиями в 6,21 раза;
- усталостная долговечность пластины с тремя отверстиями, упрочнённой в зоне отверстий последовательным применением дорнования стенок отверстий с относительным натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, выше усталостной долговечности пластины с одним отверстием в 22,04 раза;
- усталостная долговечность пластины с тремя отверстиями, упрочнённой в зоне отверстий последовательным применением дорнования стенок отверстий с относительным натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, выше усталостной долговечности пластины с тремя неупрочненными отверстиями в 11,35 раза.

Полученные результаты целесообразно применять при выборе методов упрочнения реальных конструкций планера самолета, при этом необходимо также проводить дальнейшие испытания на образцах, моделирующих участки панелей крыла.

### Список литературы

1. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
2. Экспериментальные исследования влияния конструктивных и технологических факторов на выносливость типовых элементов авиационных конструкций / Олькин Б.И., Гиванова Н.И., Родченко Т.С., Масюк А.М., Щеглова Н.И., Бартьенева Г.Ф. //Труды ЦАГИ. - 1980. - 86 с.
3. Исследование выносливости нижних панелей крыла с отверстиями для перетекания топлива / В.П.Рычик, Е.А.Литвиненко, Н.Т.Остапенко, Е.Т.Василевский // Труды научно-технической конференции по выносливости и ресурсу авиационных конструкций (ноябрь 1976). Под ред. А.З. Воробьева и Н. Г. Белого.– С. 100-103.
4. Технология выполнения высокоресурсных соединений / Пширков В.Ф., Робаковский Я.Н., Тарасов А.С., Вильский В.А., Бурау И.В. – М.: ЦАГИ, 1980. – 171 с.
5. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / А.И. Пекарш, Ю.М. Тарасов, Г. А. Кривов и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.