

## **Экспериментальные исследования характеристик усталостной долговечности типовых моделей конструктивных элементов планера самолета в зоне разъемных болтовых соединений**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»*

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик усталостной долговечности типовых моделей конструктивных элементов планера самолета в зоне разъемных болтовых соединений. Установлено, что усталостная долговечность моделей, обработанных в зоне отверстий дорнованием стенок цилиндрического отверстия и совместным локальным обжатием переходных зон цилиндроконического отверстия и барьерным круговым обжатием, приводит к повышению усталостной долговечности более чем в 8 раз по сравнению с долговечностью полосы с цилиндрическим отверстием.

**Ключевые слова:** усталостная долговечность, разъемное болтовое соединение, локальное и барьерное обжатие, дорнование, отверстие.

Важным показателем конкурентоспособности самолетов одного класса наряду с минимальным значением их взлетной массы является ресурс планера самолета. Современные самолеты транспортной категории проектируют и изготавливают с учетом заданного ресурса и срока службы, величина которых находится в диапазоне от 10 тысяч полетов (50 тысяч летных часов) для дальних магистральных самолетов до 50 тысяч полетов (80 тысяч летных часов) для самолетов местных воздушных линий при сроке их эксплуатации 25 – 30 лет [1, 2, 3, 4, 5].

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований по определению характеристик усталостной долговечности типовых моделей конструктивных элементов планера самолета в зоне разъемных болтовых соединений.

Исследования были проведены для следующих вариантов образцов:

- соединения полосы с цилиндрическим отверстием и анкерной гайки;
- соединения полосы с цилиндрическим отверстием, обработанной дорнованием стенок отверстия, и анкерной гайки;
- не нагруженное на срез продольное разъемное болтовое соединение;
- не нагруженное на срез продольное разъемное болтовое соединение, конструктивные элементы которого обработаны в зоне цилиндрического отверстия дорнованием стенок отверстия, а в зоне цилиндроконического отверстия – обжатием переходных зон и барьерным круговым обжатием.

Материал полос – Д16АТ л.5. Геометрические размеры заготовки для изготовления образцов для проведения усталостных испытаний представлены на рис. 1. Форма и размеры образцов 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 (рис. 2) изготавливались из листа путем фрезерования по контуру.

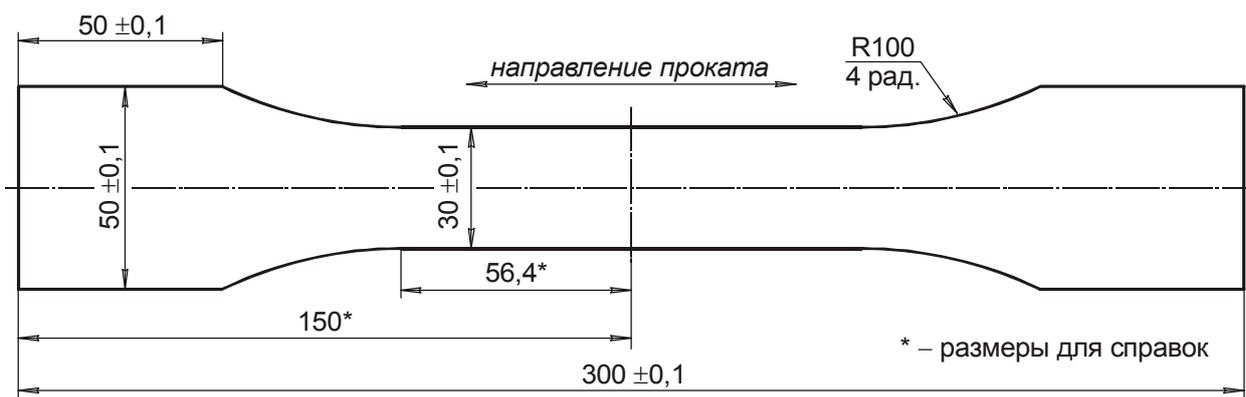


Рис. 1. Геометрические размеры заготовки для изготовления образцов полос



Рис. 2. Заготовка для изготовления образцов типовых моделей конструктивных элементов планера самолета в зоне разъемных болтовых соединений

### 1. Исследование характеристик усталостной долговечности соединения полосы с цилиндрическим отверстием и анкерной гайки

Для определения характеристик сопротивления усталости образцов соединения полосы с цилиндрическим отверстием и анкерной гайки 5-Кд-ОСТ1 33264-89 были проведены усталостные испытания на уровне нагружения  $\sigma_{\bar{b}p \min} = 0$  МПа,  $\sigma_{\bar{b}p \max} = 130$  МПа. Трехмерная модель соединения полосы с цилиндрическим отверстием диаметром 5 мм ( $B/d = 6$ ) и анкерной гайки представлена на рис. 3.

Испытания образцов проведены на гидравлической установке для усталостных и статических испытаний ЦДМ-10ПУ (рис. 4) в Проблемной научно-исследовательской лаборатории ресурса самолетных конструкций Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». В испытательной установке ЦДМ-10ПУ образцы нагружали одноосными переменными циклическими нагрузками. Частота нагружения составляла 11 Гц.

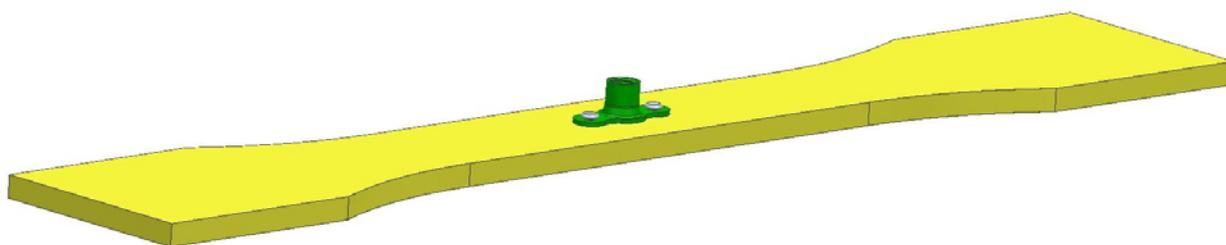


Рис. 3. Трехмерная модель соединения полосы с цилиндрическим отверстием и анкерной гайки

На заданном уровне нагружения было испытано пять образцов. Усталостное разрушение образцов соединения полосы с цилиндрическим отверстием и анкерной гайки происходило в сечении по оси отверстия, и оно возникало в зоне перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия.

Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 1.

Зоны и характер усталостного разрушения образцов показаны на рис. 5.



Рис. 4. Установка образца на испытательной машине ЦДМ-10ПУ

Таблица 1

Результаты усталостных испытаний соединения полосы с цилиндрическим отверстием и анкерной гайки на уровне нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 130$  МПа

Номер образца	$F_{\text{бр}}$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{бр}}$ , МПа		$P_{\text{бр}}$ , кг		Количество циклов нагружения до разрушения ( $N$ )
		min	max	min	max	
5.0.1	146,8	0	130	0	1950	196 500
5.0.2	145,6	0	130	0	1950	192 200
5.0.3	147,6	0	130	0	1950	197 800
5.0.4	148,2	0	130	0	1950	195 200
5.0.5	148,2	0	130	0	1950	196 000
Среднее значение						<b>195 500</b>



Рис. 5. Характер усталостного разрушения образцов соединения полосы с цилиндрическим отверстием и анкерной гайки

В результате проведения усталостных испытаний установлено, что усталостная долговечность соединения полосы с цилиндрическим отверстием и анкерной гайки больше усталостной долговечности полосы с цилиндрическим отвер-

стием в 1,6 раза, полосы с цилиндроконическим отверстием – в 3,1 раза.

## **2. Исследование характеристик усталостной долговечности соединения полосы с цилиндрическим отверстием, обработанной дорнованием стенок отверстия, и анкерной гайки**

Для определения характеристик сопротивления усталости образцов соединения полосы с цилиндрическим отверстием, обработанной в зоне отверстия дорнованием стенок отверстия с относительным натягом 4%, и анкерной гайки 5-Кд-ОСТ1 33264-89 были проведены усталостные испытания на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа.

Испытания образцов проведены на гидравлической установке для усталостных и статических испытаний ЦДМ-10ПУ (см. рис. 4).

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

На данном уровне нагружения было испытано пять образцов. Ни один из образцов при достижении  $N = 1\ 000\ 000$  циклов нагружения не разрушился и был снят с испытаний.

Для определения зон и характера разрушения образцов их испытания продолжили на более высоком уровне нагружения:  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа.

## **3. Исследование характеристик усталостной долговечности не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения**

В качестве базового образца было принято не нагруженное на срез разъемное болтовое соединение. Трехмерная модель соединения представлена на рис. 6.

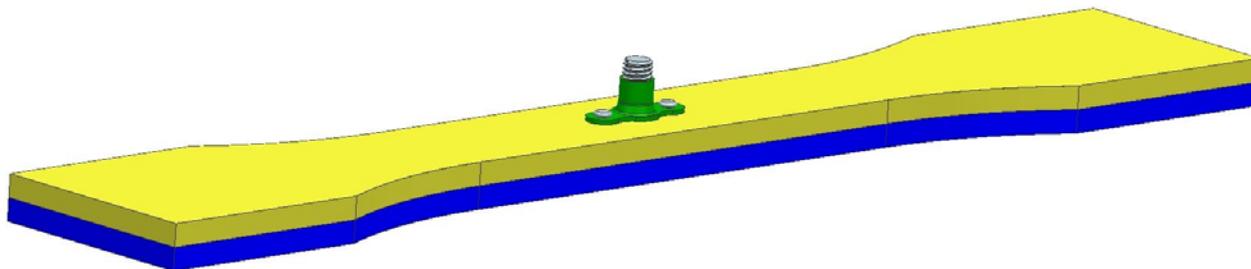


Рис. 6. Трехмерная модель не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения

Полоса с цилиндрическим отверстием не подвергалась дорнованию стенок отверстия. Обжатие круговых зон цилиндроконического отверстия и круговое барьерное обжатие не выполнялись.

Усталостные испытания проведены при уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа на гидравлической установке для усталостных и статических испытаний ЦДМ-10ПУ (см. рис. 4).

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

На заданном уровне нагружения было испытано пять образцов не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения. Усталостное разрушение образцов 11.0.3, 11.0.4 произошло в полосе с цилиндрическим отверстием в сечении по оси заклепки. Усталостное разрушение образцов 11.0.1, 11.0.2, 11.0.5 происходило в сечении по оси цилиндрического отверстия, и оно возникало в зоне перехода конической в цилиндрическую часть.

Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 2. Зоны и характер усталостного разрушения образцов показаны на рис. 7.

Таблица 2

Результаты усталостных испытаний моделей не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения на уровне нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 130$  МПа

Номер образца	$F_{\text{бр}}$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{бр}}$ , МПа		$P_{\text{бр}}$ , кг		Количество циклов нагружения до разрушения ( $N$ )
		min	max	min	max	
11.0.1	298,4	0	130	0	3 900	82 900
11.0.2	302,8	0	130	0	3 900	136 800
11.0.3	286,2	0	130	0	3 900	89 900
11.0.4	294,8	0	130	0	3 900	97 400
11.0.5	294,2	0	130	0	3 900	109 000
Среднее значение						<b>103 200</b>

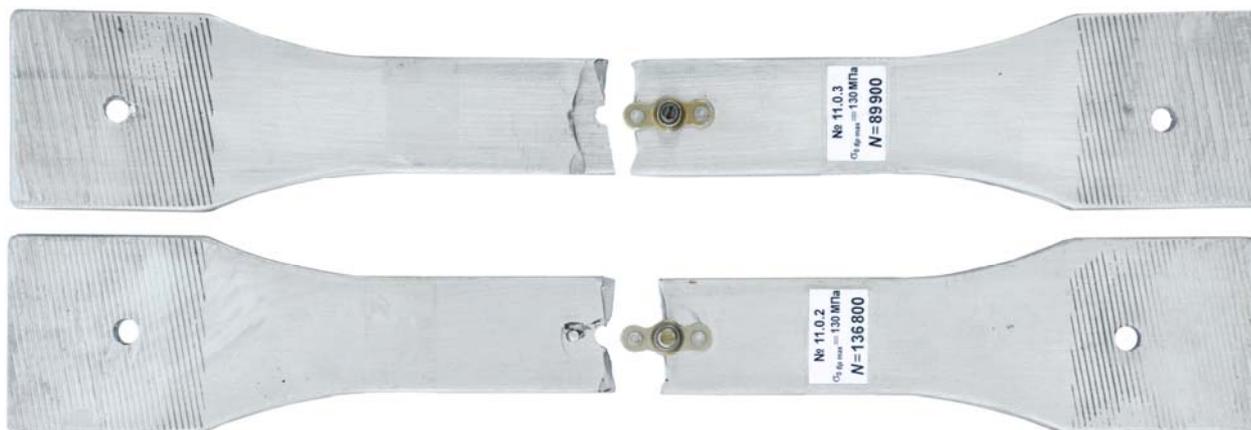


Рис. 7. Характер усталостного разрушения не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения

В результате проведения усталостных испытаний установлено, что усталостная долговечность не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения составляет 0,8 усталостной долговечности полосы с цилиндрическим отверстием и больше в 1,7 раза усталостной долговечности полосы с цилиндрическим отверстием.

#### **4. Влияние методов обработки в зоне отверстий на характеристики усталостной долговечности типовых моделей конструктивных элементов планера самолета в зоне не нагруженных на срез разъемных болтовых соединений**

Для исследования влияния методов обработки в зоне отверстий на характеристики усталостной долговечности типовых моделей конструктивных элементов планера самолета в зоне не нагруженных на срез разъемных болтовых соединений экспериментальные исследования были проведены для следующих вариантов соединений:

- полоса с цилиндрическим отверстием не обработана в зоне отверстия дорнованием стенок отверстий, полоса с цилиндроконическим отверстием обработана в зоне отверстия совместным обжатием переходных зон и круговым барьерным обжатием;
- полоса с цилиндрическим отверстием обработана в зоне отверстия дорнованием стенок отверстий, полоса с цилиндроконическим отверстием обработана в зоне отверстия совместным обжатием переходных зон и круговым барьерным обжатием.

Трехмерная модель не нагруженного на срез разъемного болтового соединения представлена на рис. 6.

Усталостные испытания не нагруженных на срез разъемных болтовых соединений проведены при уровне нагружения  $\sigma_{\bar{p} \min} = 0$  МПа,  $\sigma_{\bar{p} \max} = 130$  МПа на гидравлической установке для усталостных и статических испытаний ЦДМ-10ПУ (см. рис. 4).

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

На заданном уровне нагружения было испытано пять образцов не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения в котором полоса с цилиндрическим отверстием не обрабатывалась в зоне отверстия дорнованием стенок отверстий, а полоса с цилиндроконическим отверстием обработана в зоне отверстия совместным обжатием переходных зон и круговым барьерным обжатием.

Усталостное разрушение образцов 6.0.2, 6.0.4, 6.0.5 происходило в сечении по оси цилиндрического отверстия, и оно возникало в зоне перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия.

Усталостное разрушение образцов 6.0.1, 6.0.3 произошло в полосе с цилиндрическим отверстием в сечении по оси заклепки.

Результаты усталостных испытаний моделей не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения (полоса с цилиндрическим отверстием без дорнования стенок отверстия, полоса с цилиндроконическим отверстием, обработанная в зоне отверстия обжатием переходных зон и круговым барьерным обжатием) представлены в табл. 3.

Зоны и характер усталостного разрушения образцов показаны на рис. 8.

При обработке элементов соединения в зоне цилиндрического и цилиндроконического отверстия (полоса с цилиндрическим отверстием обработана в зоне отверстия дорнованием стенок отверстий, полоса с цилиндроконическим отверстием обработана в зоне отверстия совместным обжатием переходных зон и круговым барьерным обжатием) на заданном уровне нагружения было испытано пять образцов.

Таблица 3

Результаты усталостных испытаний моделей не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения (полоса с цилиндрическим отверстием без дорнования стенок отверстия, полоса с цилиндроконическим отверстием, обработанная в зоне отверстия обжатием переходных зон и круговым барьерным обжатием) на уровне нагружения  $\sigma_{\bar{b}p \min} = 0$  МПа,  $\sigma_{\bar{b}p \max} = 130$  МПа

Номер образца	$F_{\bar{b}p}$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_{\bar{b}p}$ , МПа		$P_{\bar{b}p}$ , кг		Количество циклов нагружения до разрушения ( $N$ )
		min	max	min	max	
6.0.1	296,4	0	130	0	3 900	240 300
6.0.2	288,8	0	130	0	3 900	250 400
6.0.3	288,2	0	130	0	3 900	199 800
6.0.4	292,8	0	130	0	3 900	235 100
6.0.5	294,6	0	130	0	3 900	224 500
Среднее значение						<b>230 000</b>

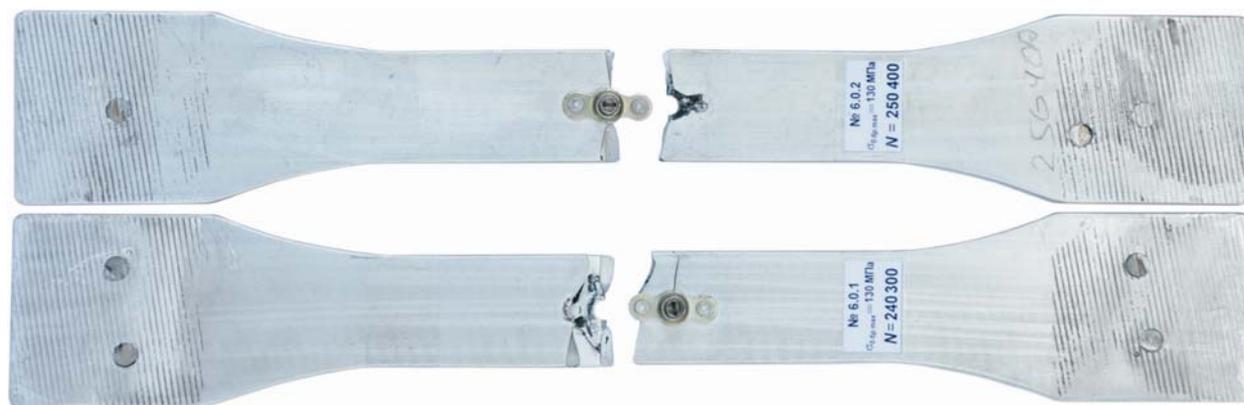


Рис. 8. Зоны и характер усталостного разрушения модели не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения, элементы которого в зоне цилиндрического отверстия не обработаны дорнованием, а в зоне цилиндроконического отверстия обработаны совместным обжатием переходных зон и круговым барьерным обжатием

Ни один из образцов на уровне нагружения  $\sigma_{\bar{b}p \min} = 0$  МПа,  $\sigma_{\bar{b}p \max} = 130$  МПа при достижении  $N = 1\,000\,000$  циклов нагружения не разрушился. Образцы были сняты с испытаний.

Для определения зон и характера усталостного разрушения испытания части образцов были продолжены на более высоком уровне нагружения:  $\sigma_{\bar{b}p \min} = 0$  МПа,  $\sigma_{\bar{b}p \max} = 150$  МПа.

При таком цикле образцы дополнительно простояли на более высоком уровне нагружения:

- образец 12.0.1 – 20 400 циклов нагружения;
- образец 12.0.2 – 57 600 циклов нагружения.

Усталостное разрушение образцов происходило в полосе с цилиндрическим отверстием, и оно возникало в сечении по оси заклепки.

Результаты усталостных испытаний моделей не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения (полоса с цилиндрическим отверстием обработана в зоне отверстия дорнованием стенок отверстия, полоса с цилиндрическим отверстием обработана в зоне отверстия обжатию переходных зон и круговым барьерным обжатию) представлены в табл. 4.

Зоны и характер усталостного разрушения образцов показаны на рис. 9.

Таблица 4.4

Результаты усталостных испытаний моделей не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения (полоса с цилиндрическим отверстием обработана дорнованием стенок отверстия, полоса с цилиндрическим отверстием обработана в зоне отверстия обжатию переходных зон и круговым барьерным обжатию)

Номер образца	$F_{\bar{\sigma}_{\text{пр}}}$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_{\bar{\sigma}_{\text{пр}}}$ , МПа		$P_{\bar{\sigma}_{\text{пр}}}$ , кг		Количество циклов нагружения ( $N$ )
		min	max	min	max	
12.0.1	292,8	0	130	0	3 900	1 000 000↑
дополнительное нагружение		0	150	0	4 500	20 400
12.0.2	294,2	0	130	0	3 900	1 000 000↑
дополнительное нагружение		0	150	0	4 500	57 600
12.0.3	292,4	0	130	0	3 900	1 000 000↑
12.0.4	288,2	0	130	0	3 900	1 000 000↑
12.0.5	300,4	0	130	0	3 900	1 000 000↑
Среднее значение при $\sigma_{\bar{\sigma}_{\text{пр}} \text{ min}} = 0$ МПа, $\sigma_{\bar{\sigma}_{\text{пр}} \text{ max}} = 130$						<b>1 000 000↑</b>



Рис. 9. Зоны и характер усталостного разрушения модели не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения, элементы которого в зоне цилиндрического отверстия обработаны дорнованием стенок отверстия, а в зоне цилиндрического отверстия обработаны совместным обжатию переходных зон и круговым барьерным обжатию

В результате проведения усталостных испытаний установлено, что усталостная долговечность модели не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения, не обработанного в зоне цилиндрического отверстия дорнованием стенок и обработанного в зоне цилиндрического отверстия совместным обжатию переходных зон и круговым барьерным обжатию выше усталостной долговечности не нагруженного на срез разъемного болтового соединения в 2,2 раза.

Усталостная долговечность модели не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения, обработанного в зоне цилиндрического отверстия дорнованием стенок отверстия, в зоне цилиндрического отверстия совместным обжатию переходных зон и круговым барьерным обжатию выше усталостной долговечности не нагруженного на срез разъемного болтового соединения более чем в 9,7 раза.

Результаты усталостных испытаний, проведенных в данной работе, показаны в виде номограммы на рис. 10.

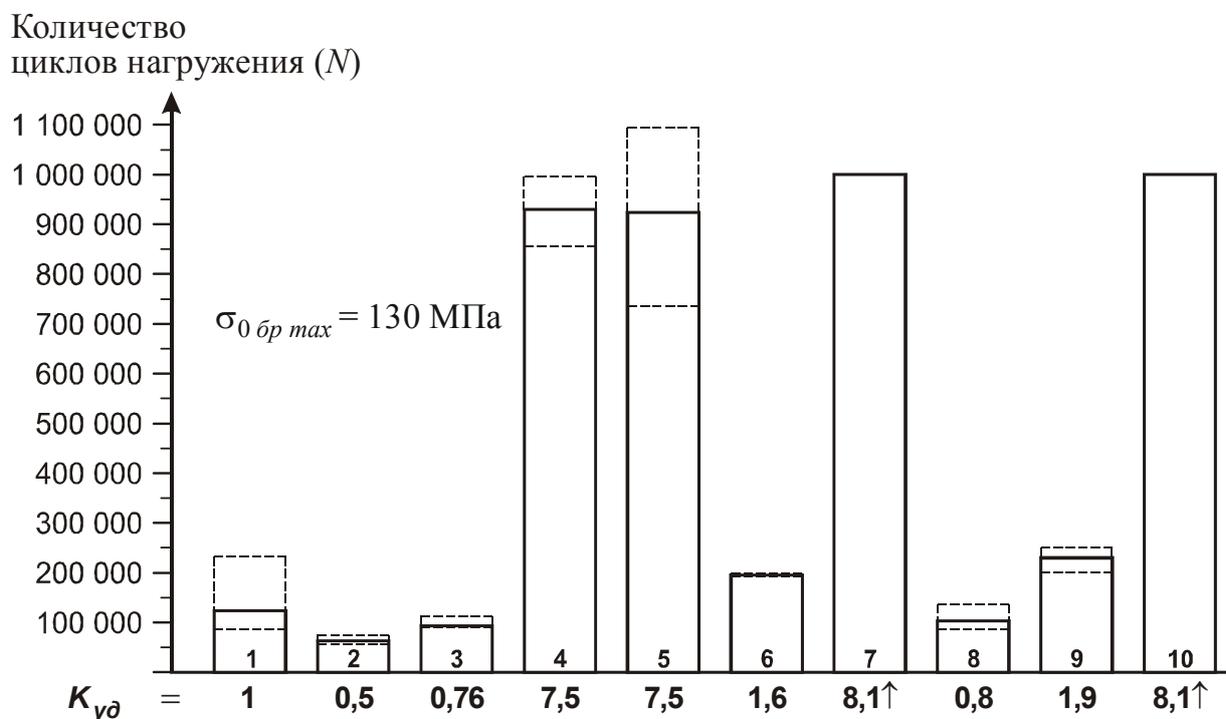


Рис. 10. Влияние способов обработки конструктивных элементов в зоне разъемных болтовых соединений на характеристики усталостной долговечности образцов на эксплуатационном уровне нагружения  $\sigma_{0 \text{ бр max}} = 130 \text{ МПа}$

На рис. 10 цифрами обозначены столбцы номограммы, обозначающие усталостную долговечность: 1 – полосы с цилиндрическим отверстием; 2 – полосы с цилиндрическим отверстием; 3 – полосы с цилиндрическим отверстием, обработанной в зоне отверстия обжатию переходных зон цилиндрического отверстия; 4 – полосы с цилиндрическим отверстием, обработанной в зоне отверстия круговым барьерным обжатию; 5 – полосы с цилиндрическим отверстием, обработанной в зоне отверстия совместным обжатию переходных зон

и круговым барьерным обжатием; 6 – полосы с цилиндрическим отверстием и приклепанной анкерной гайкой; 7 – полосы с цилиндрическим отверстием, обработанной дорнованием стенок отверстий с относительным натягом  $\delta = 4\%$  и приклепанной анкерной гайкой; 8 – не нагруженного на срез разъемного болтового соединения; 9 – не нагруженного на срез разъемного болтового соединения (полоса с цилиндрическим отверстием без дорнования стенок отверстия, полоса с цилиндроконическим отверстием, обработанная обжатием переходных зон отверстия и круговым барьерным обжатием); 10 – не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения, конструктивные элементы которого обработаны в зоне цилиндрического отверстия дорнованием стенок отверстия, а в зоне цилиндроконического отверстия – обжатием переходных зон и барьерным круговым обжатием.

На номограмме также представлен коэффициент увеличения усталостной долговечности образцов:  $K_{y\delta} = N_{эл} / N_{нл с отв}$ , где  $N_{эл}$  – усталостная долговечность конструктивно-технологических вариантов образцов;  $N_{нл с отв}$  – усталостная долговечность полосы с цилиндрическим отверстием.

### Выводы

В результате проведения экспериментальных исследований на эксплуатационном уровне нагружения  $\sigma_{бр min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр max} = 130$  МПа моделей не нагруженных на срез разъемных болтовых соединений установлено следующее:

1. Усталостная долговечность соединения полосы с цилиндрическим отверстием и анкерной гайки выше усталостной долговечности полосы с цилиндрическим отверстием в 1,6 раза, полосы с цилиндроконическим отверстием – в 3,1 раза.

2. Усталостная долговечность соединения полосы с цилиндрическим отверстием, обработанной в зоне отверстия дорнованием стенок отверстия с относительным натягом 4%, и анкерной гайки выше усталостной долговечности полосы с цилиндрическим отверстием более чем в 8,1 раза, полосы с цилиндроконическим отверстием – более чем в 16 раз.

3. Усталостная долговечность модели не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения, не обработанного в зоне цилиндрического отверстия дорнованием стенок, и обработанного в зоне цилиндроконического отверстия совместным обжатием переходных зон и круговым барьерным обжатием? выше усталостной долговечности полосы с цилиндрическим отверстием в 1,9 раза, полосы с цилиндроконическим отверстием – в 3,7 раза, не нагруженного на срез разъемного болтового соединения – в 2,2 раза.

4. Усталостная долговечность модели не нагруженного на срез продольного разъемного болтового соединения, обработанного в зоне цилиндрического отверстия дорнованием стенок отверстия, в зоне цилиндроконического отверстия совместным обжатием переходных зон и круговым барьерным обжатием выше, усталостной долговечности полосы с цилиндрическим отверстием более чем в 8,1 раза, полосы с цилиндроконическим отверстием – более чем в 16 раз, не нагруженного на срез разъемного болтового соединения – более чем в 9,7 раза.

### Список литературы

1. Нормы летной годности самолетов транспортной категории (АП-25). – М.: МАК, 1994. – 322 с.
2. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / А.И. Пекарш, Ю.М. Тарасов, Г. А. Кривов и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.
3. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
4. Технология выполнения высокоресурсных соединений / В.Ф. Пширков, Я.Н. Робаковский, А.С. Тарасов и др. – М.: ЦАГИ, 1980. – 171 с.
5. 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.

**Рецензент:** канд. техн. наук, А.П. Еретин,  
Государственное предприятие «АНТОНОВ», Киев.

Поступила в редакцию 22.12.10.

### **Експериментальні дослідження характеристик втомної довговічності типових моделей конструктивних елементів планера літака в зоні рознімних болтових з'єднань**

Подано результати експериментальних досліджень характеристик втомної довговічності типових моделей конструктивних елементів планера літака в зоні рознімних болтових з'єднань. Встановлено, що втомна довговічність моделей, оброблених в зоні отворів дорнуванням стінок циліндричного отвору та сумісним локальним обтисненням перехідних зон циліндроконічного отвору та бар'єрним круговим обтисненням, приводить до підвищення втомної довговічності більш ніж в 8 раз порівнянно з довговічністю смуги з циліндричним отвором.

**Ключові слова:** втомна довговічність, рознімне болтове з'єднання, локальне та бар'єрне обтиснення, дорнування, отвір.

### **Experimental investigations of fatigue life characteristics of aircraft airframe structural member standard components in the zone of detachable bolted joints**

The results of experimental investigations have been presented to show fatigue life characteristics of airframe structural member standard components in the zone of detachable bolted joints. It has been found that the fatigue life of the components processed by burnishing walls of parallel hole in the zone of holes and combined local compression of cylinder-conic hole transitional area and barrier circular compression result in eight times increase of fatigue life when compared with the working life of strap with a parallel hole.

**Keywords:** fatigue life, detachable bolted joint, local and barrier compression, burnishing, hole.