

УДК 629.7.01

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

## **Прогнозирование и расчет усталостной долговечности моделей силовых конструктивных элементов с отверстиями на этапах эскизного и рабочего проектирования**

*ОАО Украинский научно-исследовательский институт  
авиационной технологии,  
Государственное предприятие «АНТОНОВ»,  
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Разработаны аналитические выражения для прогнозирования усталостной долговечности на этапах эскизного и рабочего проектирования моделей силовых конструктивных элементов с отверстиями обработанных в зоне отверстий раскаткой, дорнованием стенок отверстий, барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации.

**Ключевые слова:** усталостная долговечность, полоса, отверстие, раскатка, дорнование, барьерное обжатие.

Современные самолеты транспортной категории проектируют и изготавливают с учетом заданного ресурса, величина которого находится в диапазоне от 20 тысяч полетов, 60 тысяч летных часов для тяжелых самолетов до 60 тысяч полетов и 80 тысяч летных часов для средних и легких самолетов при сроке эксплуатации 25 – 30 лет.

Авиационными правилами (АП-25) предъявляются требования к обеспечению безопасности полета по условиям усталостной прочности конструкции. Конструкция самолета должна быть такой, чтобы под воздействием повторяющихся в эксплуатации нагрузок и температур в течение определенной наработки (назначенного ресурса) ее повреждения, которые могут непосредственно привести к катастрофической ситуации, были практически невероятными ( $P < 10^{-9}$ ) [8].

Ресурс планера самолета определяется ресурсом его основных силовых элементов. Известно, что ресурсные характеристики элементов продольного набора крыла, для многих самолетов определяют ресурс планера в целом. К элементам продольного набора крыла относятся стрингерный набор и полотна верхних и нижних панелей, пояса и стенки лонжеронов. Ресурс этих элементов определяется зонами с концентраторами напряжений в виде различного рода функциональных отверстий, вырезов, радиусных переходов в зонах местных усилений и др.

Наиболее многочисленными являются концентраторы в виде отверстий. По своему функциональному назначению их можно разделить на следующие группы.

К первой отнесем наиболее многочисленную группу отверстий под крепежные элементы продольных швов (крепление стрингерного набора к полотну панелей (рис. 1) и панелей между собой (рис. 2) верхней и нижней поверхностями кессона крыла), которых насчитывается от нескольких тысяч до сотен тысяч.

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

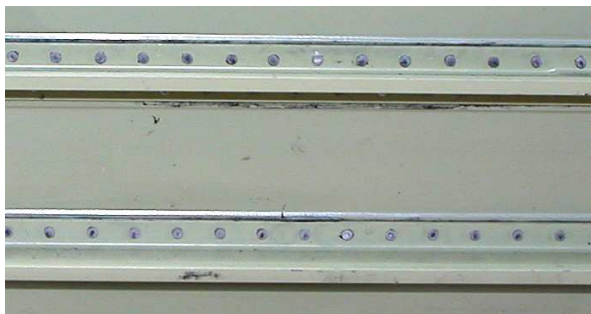


Рис. 1. Фрагмент продольного шва соединения обшивки и стрингера

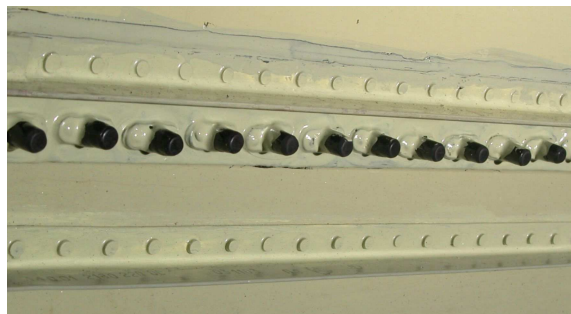


Рис. 2. Фрагмент продольного стыка съемной панели крыла

Третья группа – отверстия под крепежные элементы поперечных стыков силовых элементов продольного набора кессона крыла (рис. 3). Их насчитывается от нескольких сотен до нескольких тысяч.

К четвертой группе концентраторов напряжений отнесем отверстия для перетекания топлива (рис. 4), которые выполняются в вертикальных стенках стрингеров продольного набора крыла и обеспечивают достижение минимального количества невырабатываемого и несливаемого остатков топлива в баках кессонах, что улучшает эксплуатационные возможности самолета.

Таких концентраторов насчитывается от нескольких десятков до нескольких сотен.

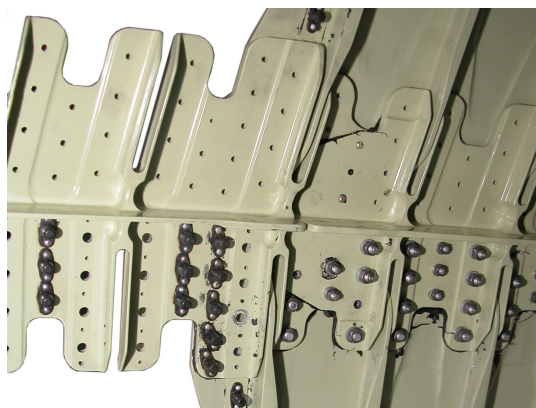


Рис. 3. Фрагмент поперечного стыка панелей крыла

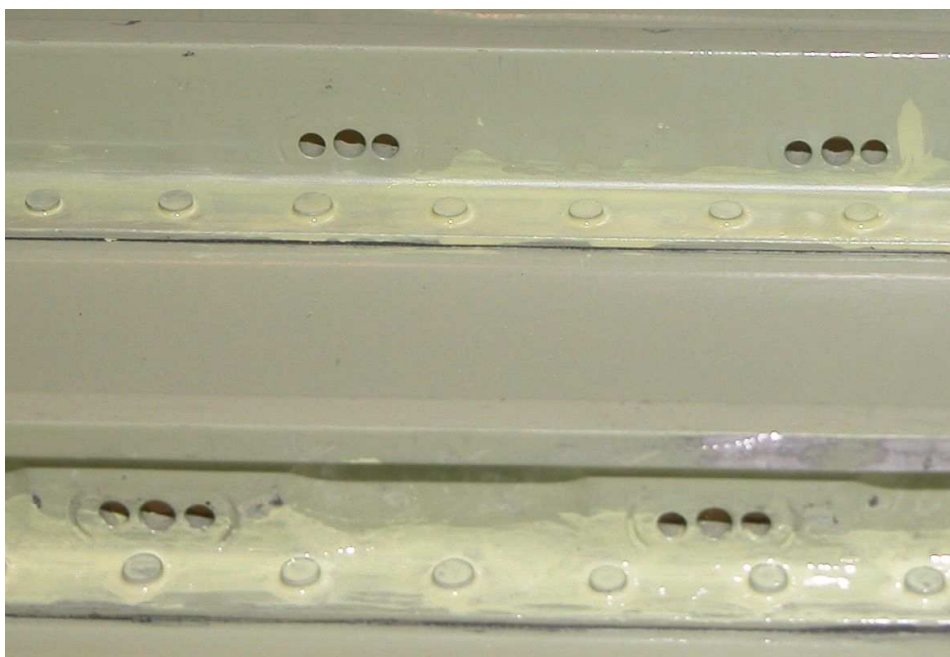


Рис. 4. Фрагмент растянутой панели крыла с отверстиями для перетекания топлива

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

Отдельной группой следует представить концентраторы в виде больших люков, вырезов (рис. 5) для различных систем самолета, обеспечения сборки, осмотров изнутри и ремонтов в эксплуатации силовых элементов конструкции кессона крыла и систем, расположенных внутри кессона. Их насчитывается от нескольких единиц до нескольких десятков. Как правило, зоны конструкции с такими концентраторами требуют тщательного проектирования и экспериментальной отработки.



Рис. 5. Фрагмент растянутой панели крыла с вырезом под установку блока топливных насосов и отверстиями для перетекания топлива

Для силовых элементов с концентраторами первой, второй и третьей групп разработан ряд конструктивно-технологических методов повышения их усталостной долговечности. Это методы постановки крепежных элементов с напряженными посадками, методы дорнования, методы раскатки и др.

Как показывает опыт ресурсных испытаний и эксплуатации самолетов концентраторы четвертой группы, отверстия для перетекания топлива, являлись источником появления усталостных трещин, что значительно снижало ресурсные характеристики нижних панелей крыльев.

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

Для снижения отрицательного влияния функциональных отверстий на усталостную долговечность силовых элементов планера самолета применяют ряд известных конструктивных и технологических решений.

Например, к конструктивным способам повышения усталостной долговечности стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива относятся: выбор рациональной формы отверстий, их взаимного расположения; выбор параметров местного утолщения вертикальной полки стрингера; рациональное расположение отверстий по размаху крыла [2, 3, 7, 11].

Анализ литературных источников показал [9, 10, 12, 15], что в ряде случаев существующие технологические методы обработки являются эффективным сред-

ством повышения усталостной долговечности конструктивных элементов с одиночными отверстиями. Большинство из них заключается в обработке элементов конструкции в зоне отверстий путем пластического деформирования металла.

Целью данной работы является разработка аналитических выражений для прогнозирования усталостной долговечности на этапах эскизного и рабочего проектирования полос с функциональными отверстиями (рис. 6, рис. 7) обработанных в зоне отверстий раскаткой, дорнованием стенок отверстий, барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации.

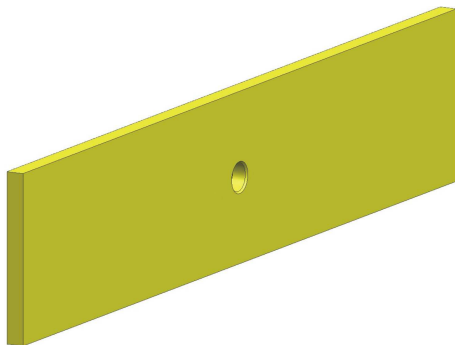


Рис. 6. Трехмерная модель полосы с одним отверстием ( $B/d = 6$ ,  $d_{отв} = 8$  мм)

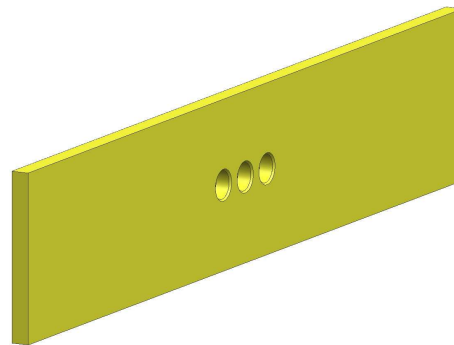


Рис. 7. Трехмерная модель полосы с тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ,  $d_{отв} = 8$  мм, расстояние между центрами отверстий 12 мм)

Проведенные исследования показали, что раскатка, дорнование и обжатие в виде лунок сегментной конфигурации приводят к изменению характеристик локального напряженно-деформированного состояния (удельной энергии деформирования  $W$ ) в зонах вероятного усталостного разрушения, а также к изменению качества внешней поверхности в зоне обработки стенок отверстий, существенно влияющего на характеристики сопротивления усталости [1, 4, 5, 6, 7, 9, 13, 14].

На стадии эскизного проектирования для прогнозирования влияния методов обработки конструктивных элементов в зоне функциональных отверстий на долговечность полос в качестве базовой кривой усталости принимаем кривую усталости полосы с одним отверстием, аналитическое выражение которой описывается уравнением вида

$$\sigma_{0\max}^m \cdot N = C.$$

На основе результатов проведенных экспериментальных исследований получены аналитические выражения кривых усталости полосы с отверстием, полосы с тремя отверстиями, полос с тремя отверстиями, обработанных в зоне отверстий раскаткой, дорнованием стенок отверстий, барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации [4].

Для прогнозирования усталостной долговечности моделей конструктивных элементов с отверстиями на стадии эскизного проектирования запишем выражения кривой усталости базового и модифицированного образцов:

$$\sigma_{0\bar{\sigma}p}^{m_{\bar{\sigma}}} \cdot N_{\bar{\sigma}} = C_{\bar{\sigma}}; \quad \sigma_{0\bar{\sigma}p}^{m_M} \cdot N_M = C_M.$$

Тогда аналитические выражения для прогнозирования усталостной долговечности модифицированных образцов запишем следующем образом:

$$\frac{N_M}{N_{\sigma}} = \frac{C_M}{C_{\sigma}} \cdot \frac{\sigma_{0\sigma}^{m_{\sigma}}}{\sigma_{0\sigma}^{m_M}} = \frac{C_M}{C_{\sigma}} \cdot \sigma_{0\sigma}^{m_{\sigma} - m_M} = C_{\sigma} \cdot \sigma_{0\sigma}^{m_{\sigma}},$$

откуда получаем

$$N_M = C_{\sigma} \cdot N_{\sigma} \cdot \sigma_{0\sigma}^{m_{\sigma}},$$

где  $m_i$ ,  $C_i$  – коэффициенты для аналитических кривых  $\sigma^m \cdot N = C$ , полученные в результате обработки результатов усталостных испытаний;  $N_{\sigma}$  – базовые значения усталостной долговечности полосы с отверстием на заданном уровне нагружения ( $N_{cp \text{ экcn}}$ ), полученные в результате усталостных испытаний.

Результаты расчета по предложенной методике числа циклов до разрушения пластин с отверстиями с учетом влияния обработки пластин в зоне отверстий для стадии эскизного проектирования даны в табл. 1. Анализ результатов расчетов подтверждает сходимость и достоверность предложенного метода прогнозирования.

На стадии рабочего проектирования для прогнозирования усталостной долговечности конструктивных элементов в зоне отверстий запишем уравнение усталостной долговечности на основе характеристик локального НДС – удельной энергии деформирования ( $W = \sigma \cdot \varepsilon$ ) [7] в локальной зоне ее концентрации (зоне вероятного усталостного разрушения).

В общем виде аналитическое выражение для усталостной долговечности запишем в виде

$$W_0^{m_w} \cdot N = C_W.$$

Для прогнозирования усталостной долговечности модифицированных полос с отверстиями на стадии рабочего проектирования запишем выражения кривой усталости модифицированного образца, взяв за базовое выражение уравнение кривой усталости полосы с одним отверстием

$$N_{MW} = \frac{C_{WM}}{C_{W\sigma}} \cdot N_{\sigma} \cdot \frac{W_{\sigma}^{m_{w\sigma}}}{W_M^{m_{wM}}} = C_W \cdot N_{\sigma} \cdot \frac{W_{\sigma}^{m_{w\sigma}}}{W_M^{m_{wM}}},$$

где  $m_{wi}$ ,  $C_{wi}$  – коэффициенты для аналитических кривых  $W^{m_w} \cdot N = C_W$ , полученные в результате обработки результатов усталостных испытаний.

Результаты расчета по предложенной методике для стадии рабочего проектирования даны в табл. 2. Анализ результатов расчетов по предложенной методике для стадии рабочего проектирования подтверждает сходимость и достоверность предложенного метода прогнозирования, и показал, что прогнозируемые значения долговечности образцов находятся в диапазоне границ рассеивания усталостных характеристик, полученных экспериментально.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований и расчета (на этапе эскизного проектирования) влияния вида обработки полос в зоне отверстий на их усталостную долговечность

Тип образца	Уровни нагружения $\sigma_{0\text{бр max}}$ , МПа	$m_{\sigma i}$	$C_{\sigma i}$	$N_{\text{расч}}$	$m_{\sigma} = m_{\sigma \delta} - m_{\sigma M}$	$C_{\sigma} = \frac{C_{\sigma M}}{C_{\sigma \delta}}$	$N_{\text{ср экв}}$	$N_{\text{max}}$ $N_{\text{min}}$	$N_{M \sigma}$
Полоса с отверстием	114	4,88317	$2,26879 \cdot 10^{15}$	204 900	0	1	195 000	234 000 173 000	195 000
	130			107 900			117 000	173 000 91 000	117 000
	150			53 700			52 000	69 000 40 000	52 000
Полоса с тремя отверстиями	114	5,35564	$3,77761 \cdot 10^{16}$	364 000	-0,47	16,65	387 000	529 000 264 000	350 500
	130			161 100			140 500	141 000 140 000	197 700
	150			74 900			101 000	118 700 80 000	82 200
Полоса с тремя отверстиями, обработанная раскаткой с относительным натягом 0,2%	130	3,69299	$2,07643 \cdot 10^{13}$	324 000	1,19	0,01	324 000	558 000 178 000	383 500
	150			191 000			191 000	203 000 183 000	202 100
	130			328 000			328 000	351 000 305 000	352 900
Полоса с тремя отверстиями, обработанная дорнованием с относительным натягом 0,6%	150	4,47043	$9,24922 \cdot 10^{14}$	173 000	0,41	0,41	173 000	204 000 155 000	166 300
	130			379 000			379 000	473 000 268 000	412 900
	150			158 000			158 000	217 000 119 000	153 900
Полоса с тремя отверстиями, обработанная дорнованием с относительным натягом 2%	114	6,11416	$3,18877 \cdot 10^{18}$	1 090 400	-1,23	1405,49	846 500↑	1 113 000↑ 580 000	1 029 200
	130			535 000			716 000	880 000 478 000	575 300
	150			246 300			237 000	259 000 189 000	236 700
Полоса с тремя отверстиями, лунки сегментной конфигурации глубиной 0,3 мм	130	5,14986	$5,39036 \cdot 10^{16}$	700 000	-0,27	23,76	700 000↑	788 000↑ 612 000	746 900
	150			335 000			335 000	421 000 231 000	319 400

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований и расчета (на этапе рабочего проектирования) влияния вида обработки полос в зоне отверстий на их усталостную долговечность

Тип образца	Уровни нагружения $\sigma_{0\text{бр max}}$ , МПа	$W_{10\text{max}}$	$m_{wi}$	$C_{Wi}$	$N_{расч}$	$C_W = \frac{C_{W\text{м}}}{C_{W\text{б}}}$	$N_{ср эксп}$		$N_{MW}$	
							$N_{max}$	$N_{min}$		
Полоса с отверстием	114	1,58	10,4223	$2,96199 \cdot 10^7$	204 900	1	195 000	234 000	195 000	
	130	1,77			107 900		173 000	173 000	117 000	173 000
	150	1,81			53 700		69 000	40 000	52 000	69 000
Полоса с тремя отверстиями	114	1,54	9,65647	$2,50219 \cdot 10^7$	364 000	0,85	387 000	529 000	387 000	
	130	1,71			161 100		141 000	140 000	140 500	141 000
	150	1,77			74 900		118 700	80 000	101 000	118 700
Полоса с тремя отверстиями, обработанная раскаткой с относительным натягом 0,2%	130	1,70	15,236	$1,05117 \cdot 10^8$	324 000	35,49	324 000	558 000	324 000	
	150	1,76			191 000		203 000	183 000	191 000	203 000
Полоса с тремя отверстиями, обработанная раскаткой с относительным натягом 0,6%	130	1,48	4,2568	$1,74038 \cdot 10^6$	328 000	0,06	328 000	351 000	328 000	
	150	1,72			173 000		204 000	155 000	173 000	204 000
Полоса с тремя отверстиями, обработанная дорнованием с относительным натягом 2%	130	0,47	2,05136	$8,0537 \cdot 10^4$	379 000	0,003	379 000	473 000	379 000	
	150	0,72			158 000		217 000	119 000	158 000	217 000
Полоса с тремя отверстиями, лунки сегментной конфигурации глубиной 0,3 мм	130	1,28	12,1559	$1,40714 \cdot 10^7$	700 000	0,47	700 000	788 000 <sup>†</sup>	700 000	
	150	1,36			335 000		421 000	231 000	335 000	421 000

## Выводы

В результате проведенных исследований разработаны аналитические выражения для прогнозирования усталостной долговечности на этапах эскизного и рабочего проектирования моделей конструктивных элементов с отверстиями обработанных в зоне отверстий раскаткой, дорнованием стенок отверстий, барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации.

Расчет усталостной долговечности полос с функциональными отверстиями по разработанным аналитическим зависимостям показал, что прогнозируемые значения долговечности образцов находятся в диапазоне границ рассеивания усталостных характеристик, полученных экспериментально.

Предложенный метод прогнозирования усталостной долговечности конструктивных элементов с отверстиями позволяет прогнозировать влияние технологии обработки конструктивных элементов в зоне функциональных отверстий на их усталостную долговечность.

## 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, В.А. Матвиенко, С.П. Светличный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 40. – Х., 2008. – С. 54 – 69.

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. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 36(1). – Х., 2004. – С. 67 – 80.

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-техн. конф. по выносливости и ресурсу авиационных конструкций, ноябрь 1976, под ред. А.З. Воробьева и Н. Г. Белого.– С. 100 – 103.

4. Конструктивно-технологические методы обеспечения высокоресурсных характеристик стрингеров баков-кессонов крыла в зоне отверстий для перетекания топлива / Г.А. Кривов, А.Г. Гребеников, Е.Т. Василевский и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 44. – Х., 2009. – С. 51 – 66.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Нормы летной годности самолетов транспортной категории (АП-25). – М.: МАК, 1994 – 322 с.

9. 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.

10. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / А.И. Пекарш, Ю.М. Тарасов, Г. А. Кривов и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.

11. Соппротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.

12. Технология выполнения высокоресурсных соединений / В.Ф. Пширков, Я.Н. Робаковский, А.С. Тарасов и др. – М.: ЦАГИ, 1980. – 171 с.

13. Экспериментальное исследование влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия на усталостную долговечность стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива / А.Г. Гребеников, Г.А. Кривов, Е.Т. Василевский, В.А. Матвиенко, В.А. Резник, А.М. Гуменный, С.П. Светличный, И.П. Змиевской // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 43. – Х., 2009. – С. 54 – 64.

14. 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.

15. 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. А.Г. Гребеников, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.

Поступила в редакцию 01.03.10.

## **Прогнозування та розрахунків втомної довговічності моделей силових конструктивних елементів з отворами на етапах ескізного та робочого проектування**

Розроблено аналітичні вирази для прогнозування втомної довговічності на етапах ескізного та робочого проектування моделей силових конструктивних елементів з отворами, оброблених в зоні отворів розкатуванням, дорнуванням стінок отворів, бар'єрним обтисненням у вигляді лунок сегментної конфігурації.

**Ключові слова:** втомна довговічність, смуга, отвір, розкатування, дорнування, бар'єрне обтиснення.

## **Forecasting and Estimation of Fatigue Life of Load-Carrying Structure Components Models with Holes During Preliminary and Production Design**

Formulas for forecasting of fatigue life at stages of preliminary and production design have been developed for the models of the load-carrying structure components with holes. Components are machined in the hole zones by rolling, burnishing of the hole walls, barrier compression in form of segmented configuration hole.

**Keywords:** fatigue life, strip, hole, rolling, burnishing, barrier compression.