

Прогнозирование влияния конструктивно-технологических параметров на усталостную долговечность конструктивных элементов с концентраторами напряжений при их циклическом растяжении

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

Разработана методика прогнозирования усталостной долговечности 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 с отверстием, отверстие, раскатка, дорнование, барьерное обжатие.

Создание современной конкурентоспособной авиационной техники является одним из приоритетных направлений развития промышленности Украины. В последние десятилетия отмечается увеличение роста конкуренции на мировых рынках авиационных транспортных услуг, где наряду с известными мировыми производителями, появляются новые авиационные компании, проектирующие авиационную технику. Для сохранения конкурентоспособности проектируемой и создаваемой в Украине новой авиационной техники необходимо вести новые научные разработки в области проектирования и производства самолетов.

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.

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 многочисленны концентраторы в виде отверстий.

Одним из направлений повышения ресурса планера самолета являются конструктивно-технологические методы повышения усталостной долговечности, которые позволяют достичь заданного ресурса без увеличения массы конструкции.

Проведенные исследования показали, что раскатка, дорнование и обжатие в виде лунок сегментной конфигурации приводят к изменению характеристик ло-

кального 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 – 15].

Целью данной работы является разработка методики прогнозирования влияния конструктивно-технологических параметров на усталостную долговечность конструктивных элементов с концентраторами напряжений в виде отверстий ($B/d = 6$) (рис. 1).

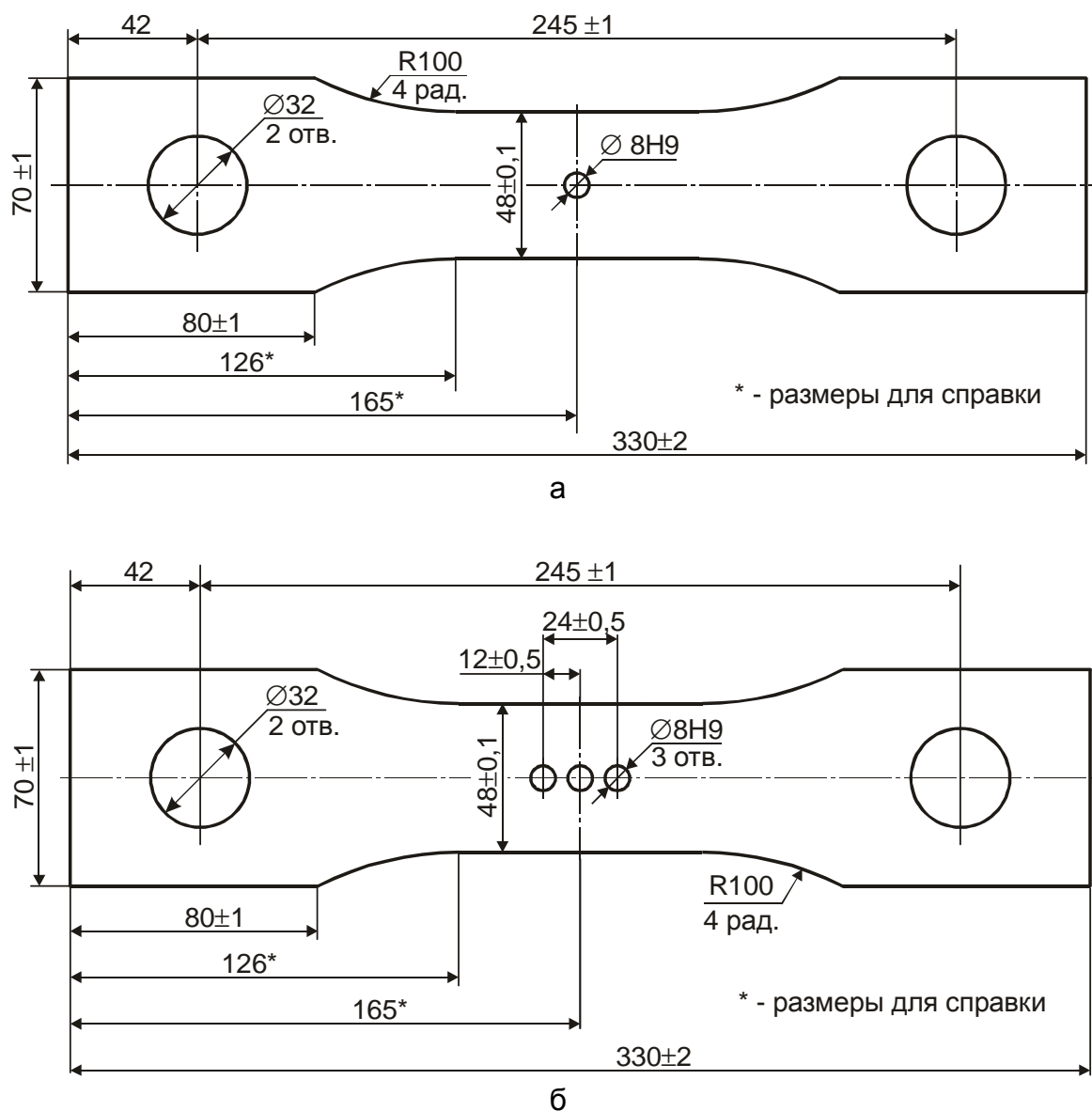


Рис. 1. Полоса: а – с одним отверстием; б – с тремя отверстиями

Объектом исследования являются:

- полоса с одним отверстием ($B/d = 6$) диаметром 8 мм из материала Д16Т;

- полоса с тремя отверстиями ($B/d = 6$) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), не упрочненная в зоне отверстий;
- полоса с тремя отверстиями ($B/d = 6$) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), обработанная в зоне отверстий раскаткой с относительным натягом 0,2%;
- полоса с тремя отверстиями ($B/d = 6$) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), обработанная в зоне отверстий раскаткой стенок отверстий с относительным натягом 0,6%;
- полоса с тремя отверстиями ($B/d = 6$) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), обработанная в зоне отверстий дорнованием стенок отверстий с относительным натягом 2%;
- полоса с тремя отверстиями ($B/d = 6$) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), обработанная в зоне отверстий обжати-ем в виде лунок сегментной конфигурации глубиной 0,3 мм.

Для прогнозирования усталостной долговечности конструктивных элементов в зоне отверстий запишем уравнение усталостной долговечности на основе характеристик локального напряженно-деформированного состояния – упругой составляющей удельной энергии деформирования ($W = (\sigma \cdot \varepsilon)/2$) [8] в локальной зоне ее концентрации (зоне вероятного усталостного разрушения).

Результаты расчета характеристик локального НДС и экспериментальные исследования характеристик усталостной долговечности данных образцов представлены в работах [1, 3 – 8, 10, 13, 14].

В общем виде аналитическое выражение для усталостной долговечности запишем как

$$\left(\frac{W_{0a_l}}{W_{0b_p}} \right)^m \cdot N = C,$$

где $W_{0a_l} = \frac{\sigma_{0a_l} \cdot \varepsilon_{0a_l}}{4}$ – амплитудное отнулевое значение упругой составляющей удельной энергии деформирования в локальной зоне концентрации напряжений; $W_{0b_p} = \frac{\sigma_{0a_{b_p}} \cdot \varepsilon_{0a_{b_p}}}{4}$ – амплитудное отнулевое значение удельной энергии деформирования в сечении брутто.

$$\left(\frac{\sigma_{0a_l} \cdot \varepsilon_{0a_l}}{\sigma_{0a_{b_p}} \cdot \varepsilon_{0a_{b_p}}} \right)^m \cdot N = C.$$

Запишем аналитические выражения для усталостной долговечности базо-

вого и модифицированного образцов:

– базовый образец

$$\left(W_{0a_l} / W_{0a_{\bar{b}p}} \right)_{\bar{b}}^{m_{\bar{b}}} \cdot N_{\bar{b}} = C_{\bar{b}};$$

– модифицированный образец, подвергнутый технологической обработке

$$\left(W_{0a_l} / W_{0a_{\bar{b}p}} \right)_M^{m_M} \cdot N_M = C_M.$$

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

$$N_M = N_{\bar{b}} \cdot \frac{C_M}{C_{\bar{b}}} \cdot \frac{\left(W_{0a_l} / W_{0a_{\bar{b}p}} \right)_{\bar{b}}^m}{\left(W_{0a_l} / W_{0a_{\bar{b}p}} \right)_M^k}.$$

Результаты расчета по предложенной методике представлены в табл. 1.

Анализ результатов расчетов по предложенной методике подтверждает сходимость и достоверность предложенного метода прогнозирования и показал, что прогнозируемые значения долговечности образцов находятся в диапазоне границ рассеивания усталостных характеристик, полученных экспериментально.

Выводы

В результате проведенных исследований разработаны аналитические выражения для прогнозирования усталостной долговечности 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.

Таблица 1

Результаты расчета влияния вида обработки полос в зоне отверстий на их усталостную долговечность

Тип образца	Уровни нагружения $\sigma_{0\text{бр max}}$, МПа	$W_{0\text{ал}}$	$W_{0\text{обр}}$	$\frac{W_{0\text{ал}}}{W_{0\text{обр}}}$	m_{wi}	C_{Wi}	$N_{расч}$	$C = \frac{C_{\text{М}}}{C_{\text{б}}}$	$N_{\text{ср эксп}}$	N_{max} N_{min}	$N_{\text{М}}$
Полоса с отверстием	114	0,79	0,045	17,56			190 800		195 000	234 000 173 000	190 800
	130	0,89	0,058	15,34	-3,21	19,3	123 600	1	117 000	173 000 91 000	123 600
	150	0,91	0,078	11,67			51 400		52 000	69 000 40 000	51 400
Полоса с тремя отверстиями	114	0,77	0,045	17,11			354 100		387 000	529 000 264 000	355 400
	130	0,86	0,058	14,83	-3,79	7,5	205 900	0,39	140 500	141 000 140 000	206 600
	150	0,89	0,078	11,41			76 200		101 000	118 700 80 000	113 500
Полоса с тремя отверстиями, обработанная раскаткой с относительным натягом 0,2%	130	0,85	0,058	14,66			327 200		324 000	558 000 178 000	327 200
	150	0,88	0,078	11,28	-2,02	1442,8	192 700	74,76	191 000	203 000 183 000	192 800
Полоса с тремя отверстиями, обработанная раскаткой с относительным натягом 0,6%	130	0,74	0,058	12,76			329 200		328 000	351 000 305 000	331 500
	150	0,86	0,078	11,03	-4,39	4,6	173 600	0,24	173 000	204 000 155 000	174 900
Полоса с тремя отверстиями, обработанная дорнованием с относительным натягом 2%	130	0,24	0,058	4,14	7,98	$3,2 \cdot 10^{10}$	381 500	$1,7 \cdot 10^9$	379 000	473 000 268 000	391 100
	150	0,36	0,078	4,62			159 000		158 000	217 000 119 000	163 000
Полоса с тремя отверстиями, лунки сегментной конфигурации глубиной 0,3 мм	130	0,64	0,058	11,03			706 900		700 000	788 000 [↑] 612 000	706 700
	150	0,68	0,078	8,72	-3,14	376,4	338 000	19,5	335 000	421 000 231 000	338 000

Список литературы

1. Влияние последовательного применения дорнования и барьерного обжатия на характеристики локального НДС стрингера с отверстиями для перетекания топлива [Текст] / 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 [Текст] // 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, В.А. Конструктивно-технологический метод повышения усталостной долговечности разъемных болтовых соединений элементов планера самолета: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02 / Гребеников Вадим Александрович. – Х., 2010. – 187 с.
4. Гуменный, А.М. Интегрированное проектирование высокоресурсных растянутых панелей крыла транспортного самолета: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02 / Гуменный Андрей Михайлович. – Х., 2009. – 203 с.
5. Конструктивно-технологические методы обеспечения высокоресурсных характеристик стрингеров баков-кессонов крыла в зоне отверстий для перетекания топлива [Текст] / 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.
6. Метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС при растяжении [Текст] / 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.
7. Метод анализа влияния последовательного применения раскатки и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС при растяжении [Текст] / 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.
8. Метод анализа характеристик локального НДС при растяжении пластин с отверстиями [Текст] / 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. – X., 2007. – С. 13 – 29.

9. Обеспечение ресурса высоконагруженных элементов конструкции планера самолета с функциональными отверстиями [Текст] / Г.А. Кривов, В.А. Матвиенко, Р.И. Гирш и др. // Технологические системы. – К.: УкрНИИАТ. – 2009. – Вып. 5 (49). – С. 94 – 100.

10. Прогнозирование и расчет усталостной долговечности моделей силовых конструктивных элементов с отверстиями на этапах эскизного и рабочего проектирования [Текст] / Г.А. Кривов, С.А. Бычков, Е.Т. Василевский и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 45. – X., 2010. – С. 51 – 61.

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

12. Технология выполнения высокоресурсных соединений [Текст] / 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 обжата на усталостную долговечность стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива [Текст] / А.Г. Гребеников, Г.А. Кривов, Е.Т. Василевский и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 43. – X., 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 [Текст] / 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. – X., 2007. – С. 44 – 52.

15. Экспериментальные исследования влияния конструктивных и технологических факторов на выносливость типовых элементов авиационных конструкций [Текст] / Б.И. Олькин, Н.И. Гильванова, Т.С. Родченко и др. // Труды ЦАГИ. – 1980. – 86 с.

Рецензент: кан-т техн. наук, доцент, начальник конструкторского отдела Е.Т. Василевский, Государственное предприятие «АНТОНОВ», г. Киев.

Поступила в редакцию 10.05.11.

Прогнозування впливу конструктивно-технологічних параметрів на втомну довговічність конструктивних елементів з концентраторами напружень при їх циклічному розтягуванні

Розроблено методику прогнозування втомної довговічності моделей силових конструктивних елементів з отворами, оброблених у зоні отворів розкочуванням, дорнуванням стінок отворів, бар'єрним обтисненням у вигляді лунок сегментної конфігурації.

Ключові слова: втомна довговічність, смуга з отвором, отвір, розкочування, дорнування, бар'єрне обтиснення.

Prognostication of effect produced by design-manufacturing factors on fatigue life of structural members with stress concentrators under tension

Fatigue life prognostication procedure of structural member models with holes processed in the hole zones by rolling, burnishing of hole walls and barrier compression in the form of segment configuration craters has been developed.

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