

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ ОТВЕРСТИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. В. Заруцкий

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

The fatigue life prediction method is proposed for aircraft structural elements with material pre-compression in the area near the hole. The experimental verification of the proposed method is performed. A satisfactory matching between the calculated and experimental data is ensured. The analysis of the compression parameters effect on the structural elements fatigue life is provided.

Одним из основных критериев безопасной эксплуатации и экономической эффективности самолетов и вертолетов различного назначения является надежность и долговечность элементов конструкции планера летательного аппарата. Поэтому любые усовершенствования планера, которые повышают его долговечность при неизменном весе конструкции, положительно влияют на эксплуатационные показатели воздушного судна и делают его конкурентоспособным на мировом рынке.

С точки зрения повышения характеристик сопротивления усталости эффективными являются методы, основанные на местном пластическом деформировании материала (МПД). В результате образуются остаточные напряжения сжатия, которые увеличивают долговечность элемента конструкции. Особо актуальным является использование МПД в зонах повышенной концентрации напряжений. С этой целью выполняют предварительное обжатие материала в зоне отверстий для перетекания топлива [1] и отверстий под высоконагруженные болтовые соединения [2].

Основной проблемой использования такого метода увеличения выносливости на практике является определение влияния параметров обжатия на долговечность в условиях эксплуатации. Актуальной является разработка метода прогнозирования усталостной долговечности элементов конструкций с учетом предварительного обжатия материала в зоне отверстия при условии ограниченного объема экспериментальных исследований.

Учет остаточных напряжений. В результате пластического деформирования материала в окрестности отверстия реализуется сложное напряженно-деформированное состояние и возникают остаточные напряжения сжатия.

Расчет напряженно-деформированного состояния выполнен по методу конечных элементов. Решена задача контактного взаимодействия рабочей части обжимки с соответствующими участками полосы в физически нелинейной постановке.

Остаточные напряжения, образующиеся в результате обжатия материала в зоне отверстия, предложено учитывать путем изменения асимметрии цикла действующих номинальных напряжений [3].

Для определения новых параметров цикла нагружения введено понятие дополнительных фиктивных напряжений сжатия σ_n^ϕ . Это напряжения, при действии которых в точке максимальной концентрации образуются локальные напряжения, равные остаточным при обжатии.

Параметры нового цикла нагружения с учетом дополнительных фиктивных номинальных напряжений могут быть определены по зависимостям

$$\begin{aligned}\sigma_n^{max} &= \sigma_{но}^{max} - \sigma_n^\phi, \\ \sigma_n^{min} &= \sigma_{но}^{min} - \sigma_n^\phi;\end{aligned}$$

где $\sigma_{но}^{max}$, $\sigma_{но}^{min}$ – максимальное и минимальное номинальные напряжения начального цикла нагрузки; σ_n^{max} , σ_n^{min} – максимальное и минимальное номинальные напряжения скорректированного цикла нагрузки.

Величину фиктивных номинальных напряжений сжатия можно определить в результате решения задачи о деформированном состоянии в координатах разгрузки. В широком диапазоне практически важных случаев обжатия материала в зоне отверстия допустимо использовать зависимость

$$\sigma_n^{\phi} = \frac{\sigma_{ост}}{K_T},$$

где K_T – теоретический коэффициент концентрации напряжений элемента конструкции без предварительного обжатия материала; $\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения в точке максимальной концентрации.

Такой подход позволяет дальнейший расчет долговечности проводить для элементов конструкций с концентратором напряжений типа «свободное отверстие».

Прогнозирование долговечности. В работах Фомичева П. А. показано, что долговечность до возникновения трещины в числе циклов нагрузок при регулярном нагружении или числе блоков при программном нагружении может быть определено [4,5] по следующим зависимостям:

– при регулярном нагружении

$$N = \frac{1}{R \cdot W_r^{\alpha} \cdot f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)};$$

– при программном нагружении

$$\lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^k R \cdot W_{ri}^{\alpha} \cdot n_i \cdot f_i\left(\frac{\sigma_{m_i}}{\sigma_b}\right)}.$$

Здесь $f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)$ – функция, учитывающая средние напряжения [5]; R , α – параметры материала, определяемые при симметричном нагружении; i – номер ступени в блоке программы нагружения; n_i – количество циклов на ступени нагружения; W_r – удельная энергия, рассеиваемая за цикл нагружения в концентраторе напряжений

$$W_r = K_{\phi} \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_{ar}^k,$$

где K_{ϕ} – коэффициент формы петли гистерезиса; ε_{ar}^k – амплитуда остаточной деформации в концентраторе напряжений; σ_a – амплитуда напряжений.

Экспериментальная проверка. Для экспериментальной проверки предложенного метода прогнозирования долговечности выполнена серия усталостных испытаний образцов с предварительным обжатием материала в зоне отверстий. Эксперименты проведены на образцах из двух алюминиевых сплавов – Д16АТ и В95пчТ2.

При регулярном нагружении нагрузка прикладывалась по отнулевому циклу. Сопоставление результатов расчетов с данными экспериментальных исследований показано на рис. 1-2.

Последовательность нагрузок при нерегулярном нагружении задана в виде ступенчатой программы, эквивалентной по повреждению комбинированной эксплуатации самолета Бе-200 ЧС. Распределение амплитуд номинальных напряжений – экспоненциальное. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных приведено на рис. 3-4.

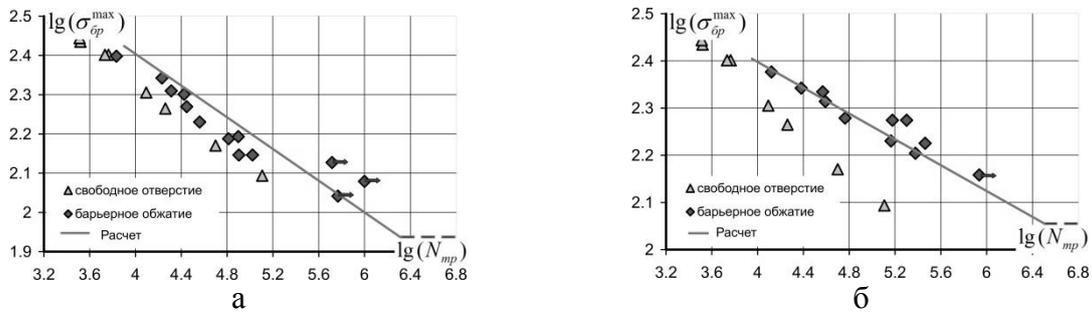


Рис. 1. Долговечность образцов из сплава Д16АТ с предварительным обжатием материала в зоне отверстий при регулярном нагружении: а – глубина обжатия 0,1 мм; б – глубина обжатия 0,2 мм;

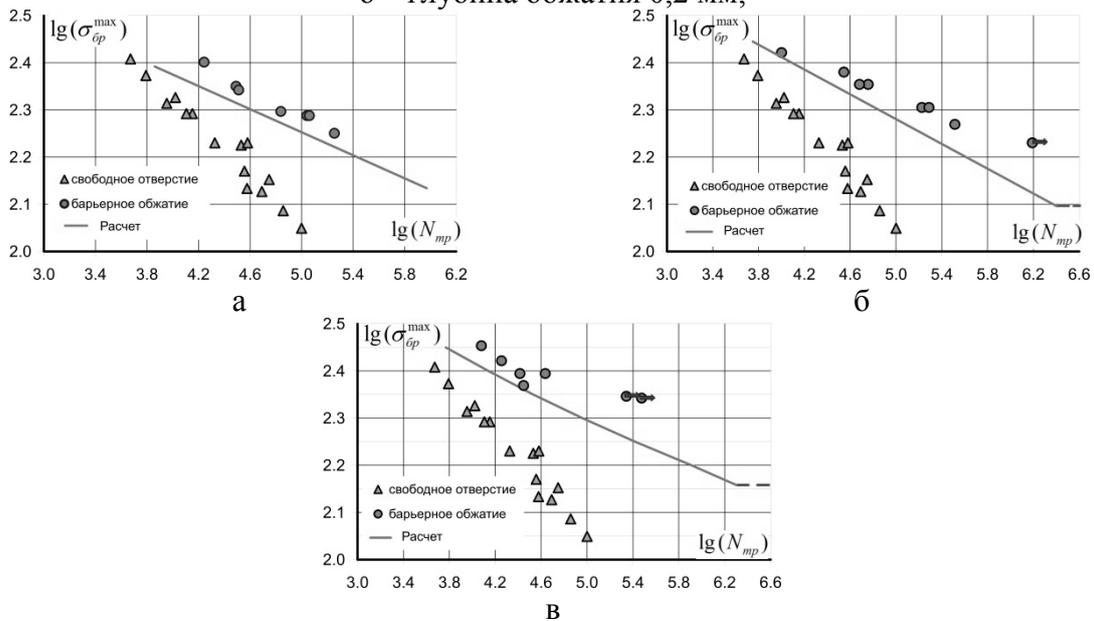


Рис. 2. Долговечность образцов из сплава В95пчТ2 с предварительным обжатием материала в зоне отверстий при регулярном нагружении: а – глубина обжатия 0,07 мм; б – глубина обжатия 0,1 мм; в – глубина обжатия 0,18мм

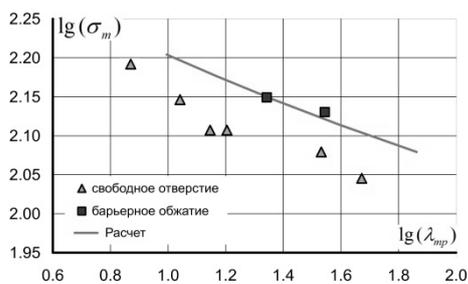


Рис. 3. Долговечность образцов из сплава В95пчТ2 при программном нагружении (глубина обжатия 0,07 мм)

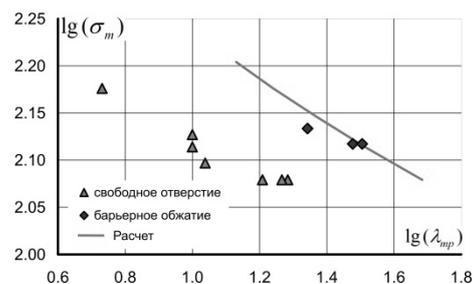


Рис. 4. Долговечность образцов из сплава Д16АТ при программном нагружении (глубина обжатия 0,2 мм)

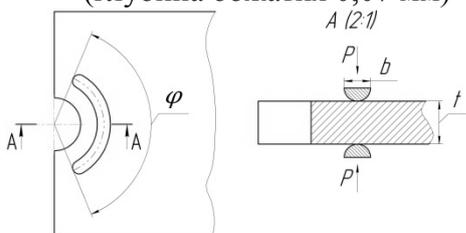


Рис. 5. Геометрические параметры, рассматриваемые при анализе

Анализ влияния параметров обжатия. Так как прирост долговечности зависит от остаточных напряжений, то на основе их величины могут быть сформированы рекомендации по выбору рациональных параметров обжатия с целью достижения максимального ресурса.

Варьируемыми параметрами являлись: ширина b и угол захвата φ рабочей части обжимки, толщина элемента конструкции t , глубина внедрения обжимки Δ (см. рис. 5).

На рис. 6-9 показаны зависимости остаточных напряжений от исследуемых параметров.

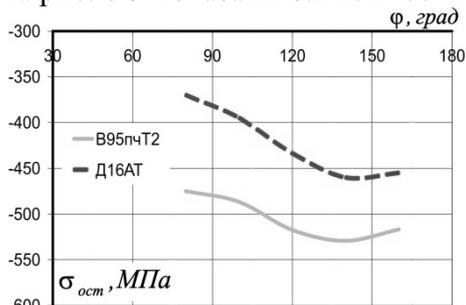


Рис. 6. Влияние угла захвата

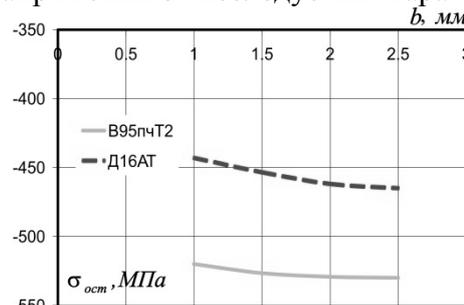


Рис. 7. Влияние ширины рабочей части обжимки

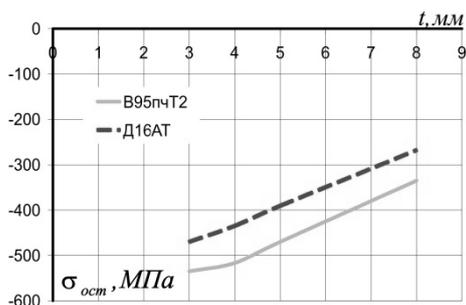


Рис. 8. Влияние толщины элемента конструкции

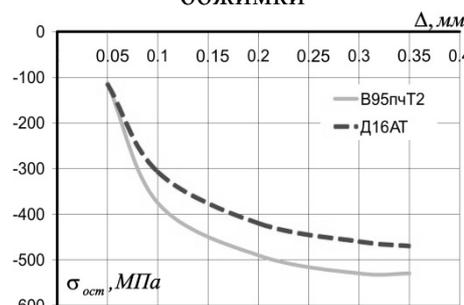


Рис. 9. Влияние глубины внедрения обжимки

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

- прогнозирование долговечности по предложенному методу обеспечивает удовлетворительное согласование с результатами испытаний во всей совокупности экспериментальных исследований;
- глубина внедрения обжимки наиболее существенно влияет на величину остаточных напряжений и долговечность элемента конструкции;
- выбор параметров обжатия для достижения требуемой долговечности должен быть основан на анализе напряженного состояния с учетом геометрических размеров (толщина, расположение отверстия и т. д.) и свойств материала элемента конструкции.

Литература

1. Исследование выносливости нижних панелей крыла с отверстиями для перетекания топлива / В. П. Рычик, А. Е. Литвиненко, Н. Т. Остапенко, Е. Т. Василевский // Тр. науч.-техн. конф. по выносливости и ресурсу авиационных конструкций (ноябрь 1976); под ред. А. З. Воробьева и Н. Г. Белого. - С. 100-103.
2. Гребеников В. А. Экспериментальное исследование влияния способов обработки полосы в зоне цилиндрикоконического отверстия на характеристики ее усталостной долговечности // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Вып. 47. – 2010. – С. 62 – 68.
3. Фомичев, П. А., Заруцкий А. В. Долговечность образцов с упрочненными отверстиями при регулярном нагружении // Механика разрушения материалов и прочность конструкций: матер V Междунар. науч. конф., Львов, 24 – 27 июня 2014 г. – С. 278 – 282.
4. Fomichev, P. Substantiation of the predicted fatigue curve for structural elements of aluminium alloy // The international journal “Strength of materials”. – 2011. – №4(43).– P. 363 – 373.
5. Фомичев П. А. Учет средних напряжений в методе расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию // Механика разрушения материалов и прочность конструкций: матер V Междунар. науч. конф., Львов, 24 – 27 июня 2014 г. – С. 731 – 736.