

Прогнозирование долговечности элементов конструкций с упрочненными отверстиями при регулярном нагружении

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Предложен расчетный метод, позволяющий определять долговечность элементов конструкций с упрочненными отверстиями при регулярном нагружении. Метод является дальнейшим развитием подхода к прогнозированию долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию с использованием энергетического критерия усталостного разрушения. Приведено сопоставление расчетов по предложенному методу с результатами проведенных экспериментальных исследований долговечности лабораторных образцов из алюминиевых сплавов Д16аТ и В95пчТ2 с отверстиями, упрочненными барьерным обжатием

Ключевые слова: упрочнение, остаточные напряжения, долговечность элементов конструкций, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Одним из основных критериев конкурентоспособности авиационных изделий является проектный ресурс при минимальных затратах массы воздушного судна. Удовлетворение требованиям минимума массы и большого ресурса приводит к необходимости применять новые материалы, разрабатывать способы повышения долговечности как регулярных зон, так и зон конструктивной нерегулярности.

Для уменьшения невырабатываемого и несливаемого топлива в ребрах нижних панелей крыльев современных самолетов выполняют отверстия для перетекания топлива. Эксплуатация и наземные испытания самолётов показывают, что такие отверстия являются очагами возникновения усталостных трещин и могут привести к преждевременному разрушению конструкции крыла.

С целью снижения негативного влияния таких отверстий на долговечность применяют различные конструктивно-технологические методы упрочнения [1–6]. Наиболее эффективными с точки зрения повышения ресурса являются методы, основанные на местном глубоком пластическом деформировании материала (предварительное обжатие отверстий, дорнование и др.). Общим для указанных методов является нелинейное деформирование материала и создание остаточных сжимающих напряжений в зоне повышенной концентрации.

Следует отметить, что экспериментальные исследования в направлении повышения ресурса конструкции носят фрагментарный характер [2–5], отсутствует теоретическое обоснование выбираемых параметров технологических процессов в зависимости от свойств материала и спектра нагрузок, действующих в эксплуатации, игнорируется статистический аспект задачи.

В данной статье предложен метод расчета долговечности элементов конструкций с предварительно упрочненными отверстиями методами местного глубокого пластического деформирования (МГПД) [6] при регулярном нагружении. Разработанный метод является дальнейшим развитием подхода к расчету долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию (НДС). В качестве исходных данных о свойствах материала используются циклические деформационные и усталостные характеристики, полученные по результатам испытаний гладких образцов.

1. Определение остаточных напряжений в отверстии

В качестве метода упрочнения рассмотрено барьерное обжатие, которое заключается в двустороннем вдавливании пуансонов заданного профиля на некотором удалении от отверстия.

Определение остаточных напряжений, возникающих в результате упрочнения барьерным обжатием, выполнено в конечно-элементном (КЭ) пакете. Решена задача контактного взаимодействия рабочей части обжимки с соответствующими участками полосы в физически нелинейной постановке.

В качестве объекта упрочнения выбрана полоса с центральным отверстием диаметром 8 мм, имитирующая рабочую часть экспериментального образца. Толщина полосы с отверстием – 4 мм, материалы – алюминиевые сплавы В95пчТ2 и Д16аТ.

При моделировании процесса упрочнения отверстия в КЭ пакете рассмотрена половина модели с учетом симметрии по соответствующим плоскостям. Конечно-элементная модель создана с помощью двадцатиузловых элементов типа Solid (рис. 1). Размер конечных элементов в зоне отверстия подобран таким образом, что двукратное увеличение количества элементов приводит к изменению напряжений не более чем на 3 %.

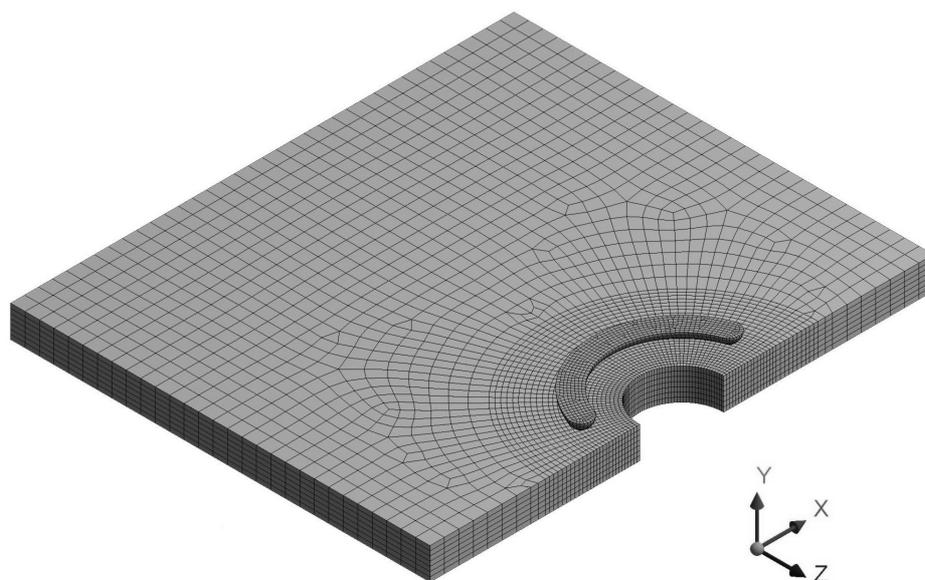


Рис. 1. Конечно-элементные модели полосы с отверстием и части обжимки, внедряемой в материал

Контактная задача решена с учетом трения. Коэффициент трения для пары «алюминий - сталь» со смазкой принят равным 0,6 [7].

В результате барьерного обжатия в окрестности отверстия происходит пластическое деформирование материала и реализуется сложное напряженно-деформированное состояние. На рис. 2 показано распределение напряжений по Мизесу в полосе с отверстием из алюминиевого сплава В95пчТ2 после барьерного обжатия на глубину 0,3 мм.

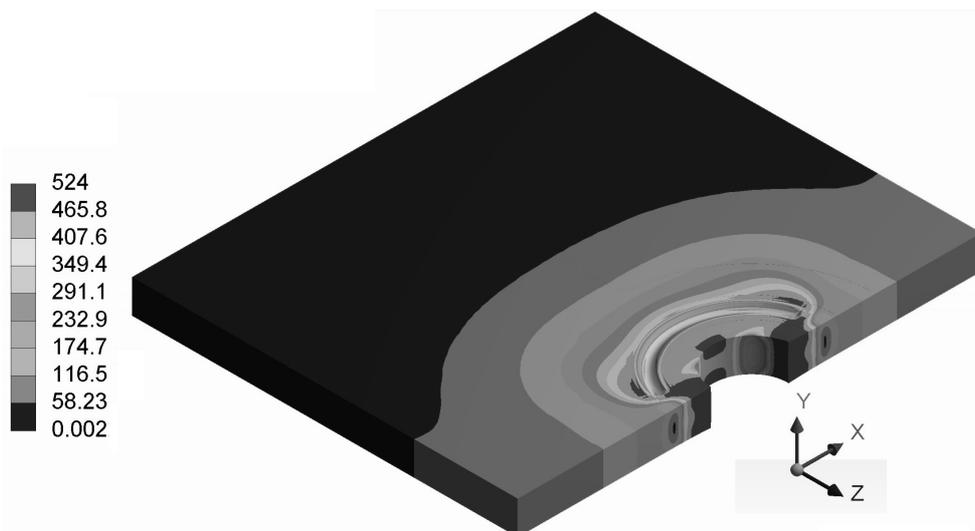


Рис. 2. Эквивалентные напряжения по Мизесу после упрочнения полосы с отверстием (сплав В95пчТ2, глубина вдавливания – 0,3 мм)

В качестве остаточных напряжений анализировались напряжения, вычисленные по формуле Мизеса, с учетом знака наибольших по модулю главных напряжений [8].

Следует отметить, что величина остаточных напряжений существенно зависит от геометрических параметров и глубины внедрения обжимки [9].

2. Понятие фиктивных номинальных напряжений

После упрочнения отверстия образец подвергается циклическому нагружению растяжением-сжатием по оси z (см. рис. 1). На рис. 3 схематически показаны зависимости локальных напряжений в вершине концентратора напряжений от номинальных для полосы со свободным и упрочненным отверстиями. Зависимости получены в результате упругопластического расчета по методу конечных элементов.

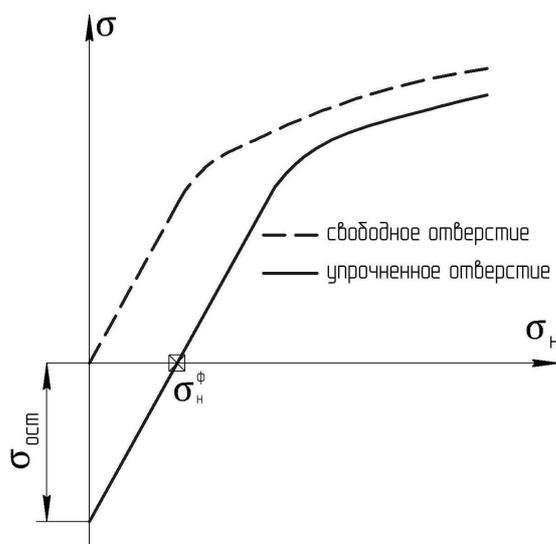


Рис. 3. Зависимость локальных напряжений в отверстии от номинальных

номинальных для полосы со свободным и упрочненным отверстиями. Зависимости получены в результате упругопластического расчета по методу конечных элементов.

При равных номинальных напряжениях в вершине концентратора для свободного и упрочненного отверстий реализуются разные по величине локальные напряжения.

Для учета остаточных напряжений в расчетах долговечности элементов конструкций введено понятие фиктивных номинальных напряжений σ_n^ϕ .

При приложении этих напряжений на удалении от отверстия реализуются

локальные напряжения, равные остаточным при упрочнении. Фиктивные номинальные напряжения могут быть найдены путем использования формулы Нейбера

$$\sigma_H^\phi = \sqrt{\frac{\sigma \cdot \varepsilon}{K_m^2} \cdot E},$$

где σ , ε – локальное напряжение и деформация, равные остаточным при упрочнении; K_T – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Схематически номинальные фиктивные напряжения показаны на рис. 4.

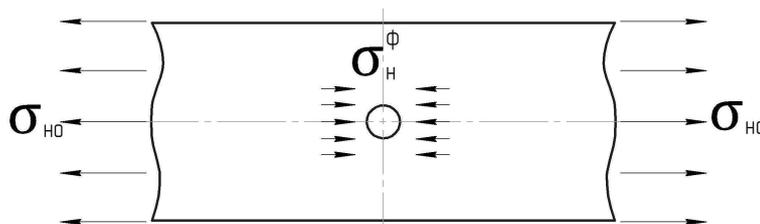


Рис. 4. Фиктивные номинальные напряжения

Наличие напряжений σ_H^ϕ приводит к изменению цикла номинальных напряжений (рис. 5)

$$\sigma_H^{max} = \sigma_{HO}^{max} - \sigma_H^\phi,$$

$$\sigma_H^{min} = \sigma_{HO}^{min} - \sigma_H^\phi;$$

где σ_H^{max} , σ_H^{min} – максимальное и минимальное номинальные напряжения скорректированного цикла; σ_{HO}^{max} , σ_{HO}^{min} – максимальное и минимальное номинальные напряжения внешнего цикла нагрузки.

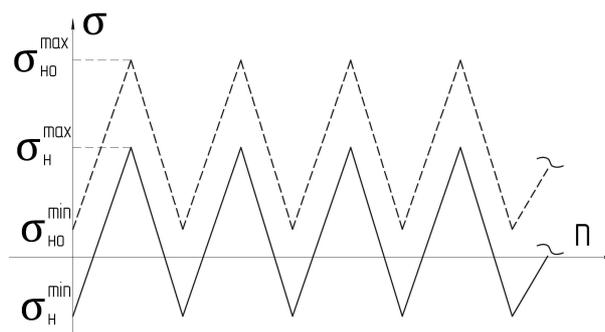


Рис. 5. Изменение цикла номинальных напряжений

Введение фиктивных номинальных напряжений и корректировка цикла номинальных напряжений позволяет дальнейший расчет долговечности проводить для элемента конструкции со свободным отверстием.

3. Расчет долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию

Согласно энергетическому критерию усталостного разрушения число циклов нагружения до образования макротрещины может быть найдено [10]:

$$N_f = \frac{1}{R \cdot W_d^\alpha \cdot f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)},$$

где R , α – параметры материала, определяемые при симметричном нагружении;

$f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)$ – функция, учитывающая влияние средних напряжений.

Величину рассеянной за цикл симметричного нагружения энергии можно определить как половину площади петли гистерезиса [11]:

$$W_d = K_\phi \cdot \sigma_{ad} \cdot \varepsilon_{ard}^k,$$

где K_ϕ – коэффициент формы петли гистерезиса, который для алюминиевых сплавов изменяется незначительно и может быть принят постоянным $K_\phi = 3$.

Амплитуда напряжений на расстоянии d от вершины концентратора определяется по зависимости [12]

$$\sigma_{ad} = \sigma_a - G_\sigma \cdot d,$$

где σ_a – амплитуда локальных напряжений в вершине концентратора; d – размер начальной макротрещины, который для сплава Д16 равен 0,12 мм, а для В95 – 0,08 мм.

Градиент напряжений в вершине надреза может быть найден по зависимостям [13]

$$G_\sigma = \frac{2 \cdot P}{P'} \cdot \overline{G}_y,$$

$$P = \frac{(K_m \cdot \sigma_n^{max})^2}{E}, \quad P' = \frac{2 \cdot y_{max}}{E} + \frac{1+m_c}{m_c} \cdot \left(\frac{y_{max}}{K_c}\right)^{\frac{1}{m_c}},$$

где y_{max} – локальное напряжение в концентраторе при максимальном номинальном напряжении σ_n^{max} ; K_c , m_c – параметры степенного уравнения, получаемые из диаграммы монотонного деформирования.

Относительный градиент упругих напряжений применительно для полосы с отверстием можно определить по формуле [14]

$$\overline{G}_y = \frac{2,3}{r},$$

где r – радиус отверстия.

Амплитуду остаточной деформации на расстоянии d от вершины концентратора напряжений найдем в соответствии с теоремой Ильюшина об упругой разгрузке:

$$\varepsilon_{ard}^k = \varepsilon_{atd} - \frac{K_m \cdot \sigma_{an}}{E},$$

где ε_{atd} – амплитуда полной деформации, определяемая по диаграмме циклического деформирования:

$$\varepsilon_{atd} = \frac{\sigma_{ad}}{E} + \left(\frac{\sigma_{ad}}{K} \right)^{\frac{1}{m}}.$$

Здесь K , m – параметры материала при симметричном цикле нагрузки.

4. Экспериментальная проверка предложенного метода

Выполнена серия усталостных испытаний образцов из алюминиевых сплавов В95пчТ2 и Д16аТ с упрочненными отверстиями при отнулевом регулярном нагружении [15].

Расчетные кривые и результаты испытаний показаны на рис. 7, 8 в виде зависимостей «максимальное номинальное напряжение σ_H^{max} – долговечность до возникновения макротрещины N_f » в двойных логарифмических координатах.

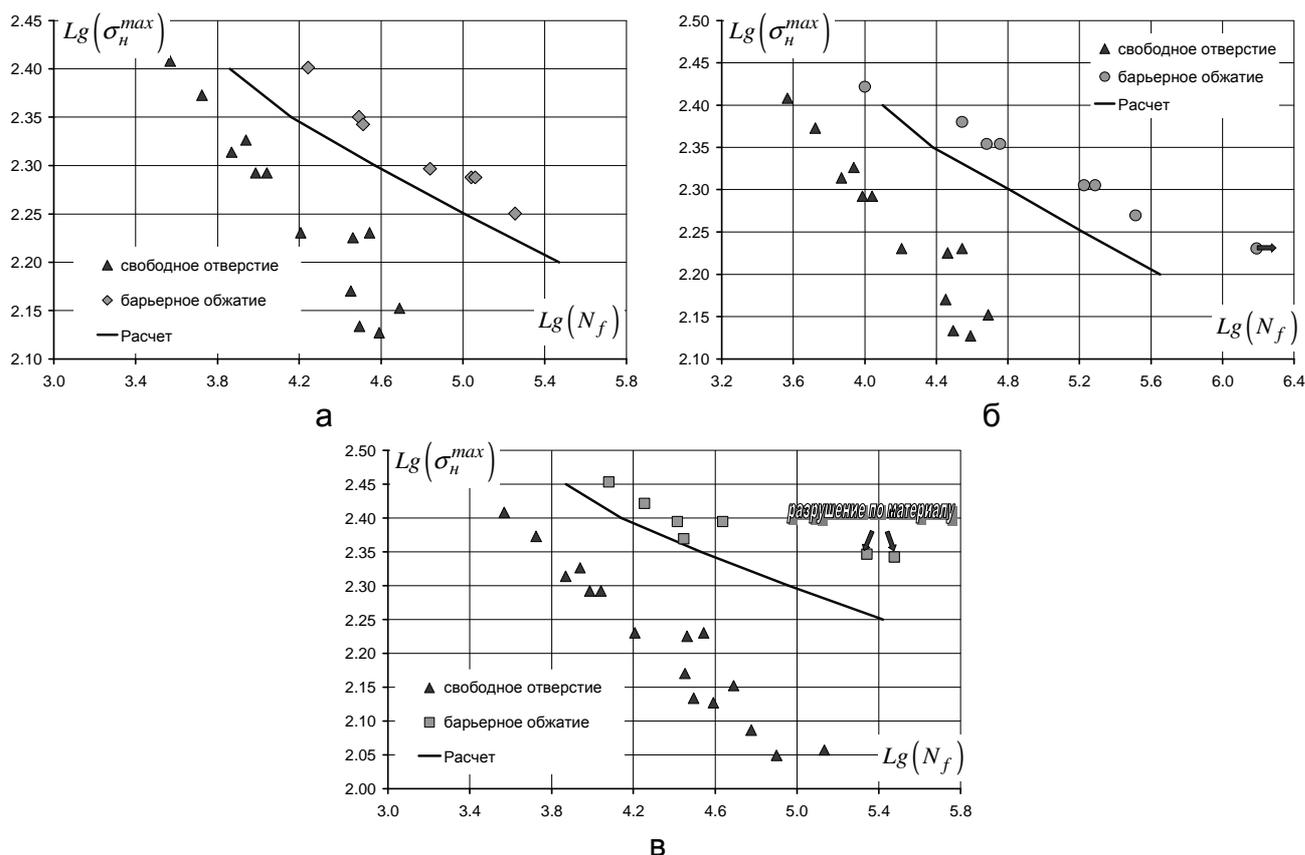


Рис. 7. Долговечность образцов из сплава В95пчТ2 с отверстиями, упрочненными барьерным обжатием:

а – глубина обжатия 0,07 мм; б – глубина обжатия 0,1 мм;
в – глубина обжатия 0,18 мм

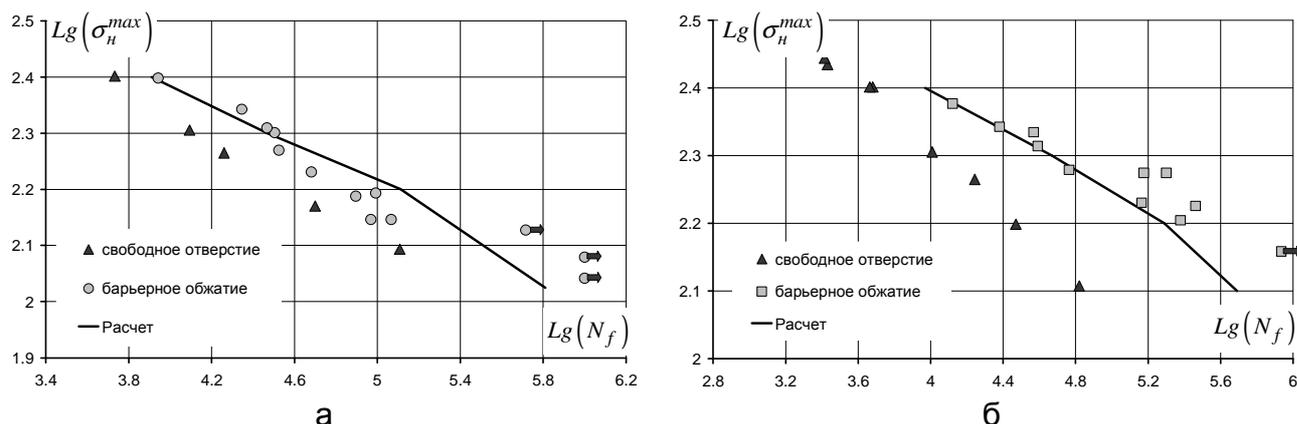


Рис. 8. Долговечность образцов из сплава Д16АТ с отверстиями, упрочненными барьерным обжатием:
а – глубина обжатия 0,1 мм; б – глубина обжатия 0,2 мм

Выводы

Предложен метод расчета долговечности элементов конструкций с отверстиями, упрочненными барьерным обжатием при регулярном нагружении.

Выполнена экспериментальная проверка предложенного метода. По всей совокупности данных, приведенных на рис. 7, 8, можно отметить удовлетворительное согласование расчетных кривых усталости и результатов испытаний.

Важно отметить, что все расчеты проведены только с использованием теоретических моделей с параметрами, полученными по результатам испытаний гладких образцов.

Упрочнение отверстий барьерным обжатием приводит к увеличению периода роста усталостной трещины.

Список литературы

1. Сопротивление усталости элементов конструкций [Текст] / А. З. Воробьев, Б. И. Олькин, В. Н. Стебнев, Т. С. Родченко. – М. : Машиностроение, 1990. – 240 с.
2. Исследование выносливости нижних панелей крыла с отверстиями для перетекания топлива [Текст] / 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.
3. Шахатуни, Е. А. Увеличение выносливости самолетных конструкций путем обжатия вокруг отверстий цилиндрических поясов [Текст] / Е. А. Шахатуни, Ф. М. Любарец // Авиационная промышленность – 1977. – № 9. – С.12–13.
4. Экспериментальное исследование влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия 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. – Х., 2009. – С. 54 – 64.

5. 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 и др. // 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.

6. Технологические способы упрочнения отверстий местным глубоким пластическим деформированием [Текст] / А. А. Сердюк, С. П. Крапивин, А. О. Рейдман и др. // Авиационная промышленность. – 1983. – № 8. – С.8–11.

7. Эксплуатация, обслуживание, ремонт, надежность [Текст]: авиац. техн. справочник / под общ. ред. В. Г. Александрова. – М. : Транспорт, 1969. – 412 с.

8. Стрижиус, В. Е. Методы расчета на усталость элементов авиационных конструкций при многоосном нагружении [Текст] / В. Е. Стрижиус // Науч. вестн. МГТУ ГА. Аэромеханика, прочность, поддержание летной прочности ВС. – 2012. – № 187. - С. 65 – 74.

9. Заруцкий, А. В. Анализ остаточных напряжений после упрочнения отверстия методом барьерного обжатия [Текст] / А. В. Заруцкий // Открытые информационные и компьютерные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского "ХАИ". – Вып. 60. – Х., 2013. – С. 85 – 93.

10. Фомичев, П. А. Учет средних напряжений в методе расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию [Текст] / П. А. Фомичев // Механика разрушения материалов и прочность конструкций: матер. V Междунар. науч. конф., Львов, 24 – 27 июня 2014 г. – С. 731 – 736.

11. Трощенко, В. Т. Энергетический критерий усталостного разрушения [Текст] / В. Т. Трощенко, П. А. Фомичев // Проблемы прочности. – 1993. – № 1. – С. 3 – 10.

12. Фомичев, П. А. Обоснование расчетной кривой усталости элементов конструкций из алюминиевых сплавов [Текст] / П. А. Фомичев // Проблемы прочности. – 2011. – № 4 (412). – С. 5 – 18.

13. Фомичев, П. А. Расчет градиентов напряжений и деформаций в зоне концентрации при циклическом упругопластическом деформировании. Сообщение 1. [Текст] / П. А. Фомичев // Пробл. прочности. – 1989. – № 9. – С. 98 – 100.

14. Когаев, В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени [Текст] / В. П. Когаев. – М. : Машиностроение, 1977. – 232 с.

15. Заруцкий, А. В. Экспериментальное исследование долговечности образцов с упрочненными отверстиями. Сообщение 1. Регулярное нагружение [Текст] / А. В. Заруцкий // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1 (77). – Х., 2014. – С. 29 – 35.

Рецензент: д. т. н., проф. А. И. Рыженко, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

Поступила в редакцию 30.05.2014

Прогнозування довговічності елементів конструкцій зі зміцненими отворами при регулярному навантаженні

Запропоновано розрахунковий метод, що дозволяє визначати довговічність елементів конструкцій з зміцненими отворами при регулярному навантаженні. Метод є подальшим розвитком підходу до прогнозування довговічності за локальним напружено-деформованим станом з використанням енергетичного критерію втомного руйнування. Наведено зіставлення розрахунків за запропонованим методом з результатами проведених експериментальних досліджень довговічності лабораторних зразків з алюмінієвих сплавів Д16ат і В95пчТ2 з отворами, зміцненими бар'єрним обтисненням.

Ключові слова: зміцнення, залишкові напруження, довговічність елементів конструкцій, напружено-деформований стан.

Durability prediction of structural elements with hardened holes under regular loading

The calculation method is proposed to determine the durability structural elements with hardened holes under regular loading. The method is a further development of the approach to the prediction of durability on the local stress-strain state using the energy criterion of fatigue failure. The comparison is given between the test results for specimens of aluminum alloys D16AT and V95pchT2 with holes hardened by barrier compression and the durability calculations made with help of the proposed method.

Keywords: hardening, residual stresses, durability of structural elements, the stress-strain state.