

УДК 539.43:629.7.018.

В.М.Дуплякин, А.Г.Прохор

ИССЛЕДОВАНИЕ СООТНОШЕНИЙ ПРЕДЕЛОВ УСТАЛОСТИ ПРИ ИЗГИБЕ  
И РАСТЯЖЕНИИ-СЖАТИИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ  
"СЛАБОГО" ЗВЕНА

Расчеты усталостной прочности часто вызывают вопросы связанные с определением соотношений пределов усталости при различных видах напряженного состояния. Рекомендации, которыми пользуются в таких случаях, основаны на сопоставлении результатов экспериментальных исследований. Однако зачастую при реализации различных видов напряженного состояния используются различные конструктивному оформлению образцы. Это связано с особенностями испытательного оборудования и нагружающих устройств. При анализе полученных таким образом данных следует учитывать различие формы и размера образцов. Используя теоретическое прогнозирование соотношений пределов усталости, можно в значительной мере расширить применение имеющихся экспериментальных материалов.

Рассмотрим теоретические основы интерпретации результатов усталостных испытаний с учетом изменения напряженного состояния формы образцов на примере прогнозирования соотношений пределов усталости круглых гладких образцов и плоских образцов отверстием, работающих при симметричном знакопеременном изгибе растяжении-сжатии.

Воспользуемся статистической теорией "слабого" звена, соответствии с которой зависимость вероятности появления первой макротрещины  $P$  от действующих в поперечном сечении напряжений  $\sigma$  описывается известным уравнением Вейбулла [7]:

$$P(\sigma) = 1 - \exp\left[-\int_f \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0}\right)^m df\right].$$

Здесь  $F$  - часть поперечного сечения, удовлетворяющая условию  $\sigma > U$ ;  $U$ ,  $m$ ,  $\sigma_0$  - параметры распределения прочности отдельных микроэлементов сечения.

Для рассматриваемых типов образцов уравнение (1) интегрируется следующим образом:

- плоский изгиб круглых гладких образцов [1]

$$-\ln[1 - P(\sigma_{\max})] = d^2 \int_{U/\sigma_{\max}}^1 \left( \frac{U \cdot z}{\sigma_{\max}} - 1 \right)^m \sqrt{1 - z^2} dz, \quad (2)$$

- изгиб плоского образца с отверстием [2]

$$-\ln[1 - P(\sigma_{\max})] = \frac{2h(\sigma_{\max} - U)^{m+2}}{\bar{\sigma} \sigma_0^m (m+1)(m+2) \sigma_{\max}^2}, \quad (3)$$

- растяжение-сжатие круглых гладких образцов

$$-\ln[1 - P(\sigma)] = \frac{\pi d^2}{4} \left( \frac{\sigma - U}{\sigma_0} \right)^m, \quad (4)$$

- растяжение-сжатие плоских образцов с отверстием [1]

$$-\ln[1 - P(\sigma_{\max})] = \frac{2h}{\bar{\sigma}} \frac{1}{m+1} \frac{(\sigma_{\max} - U)^{m+1}}{\sigma_0^m \sigma_{\max}}. \quad (5)$$

В уравнениях (2)-(5)  $d$  - диаметр круглого гладкого образца,  $h$  - толщина плоского образца с отверстием,  $\bar{\sigma}$  - относительный градиент первого главного напряжения. Следует заметить, что здесь под напряжениями подразумеваются фиктивные напряжения, равные произведению номинальных напряжений и теоретических коэффициентов концентрации напряжений.

Уравнения (2)-(5) позволяют прогнозировать соотношения пределов усталости рассматриваемых типов образцов. При проведении конкретных расчетов зададим следующие размеры: диаметр круглого гладкого образца - 10 мм, для плоского образца - ширина 14 мм, высота 4 мм, диаметр отверстия 3 мм. Полагаем, что используются материалы АМГ6М и 30ХГСА.

В случае изгиба рассматриваемого плоского образца с отверстием прием коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_{\sigma} = 1,97$ , а при растяжении-сжатии того же образца  $\alpha_{\sigma} = 2,47$ , в остальных случаях  $\alpha_{\sigma} = 1$ .

Параметры  $U$ ,  $m$ ,  $\sigma_0$ , необходимые для расчетов по уравнениям (2)-(5), определены по результатам испытаний плоских образцов с отверстием при изгибе и растяжении-сжатии для материала АМГ6М, а для 30ХГСА по результатам испытаний плоских образцов с отверстием и круглых гладких образцов при изгибе, заимствованных

в работах [3,4,5]. Оценка значений параметров  $\sigma$ ,  $m$ ,  $\sigma_0$  сводится к решению методом последовательных приближений системы нелинейных уравнений [2,6], которая для плоских образцов с отверстием записывается в виде

$$m = \left[ \ln \frac{J_1 \sigma_{\max 1}^2}{J_2 \sigma_{\max 2}^2} / \ln \frac{\sigma_{\max 1} - \sigma}{\sigma_{\max 2} - \sigma} \right] - 2$$

$$\sigma_0 = \left[ \frac{2h}{G} \frac{(\sigma_{\max 1} - \sigma)^{m+2}}{\sigma_{\max 1}^2 (m+1)(m+2)} \right]^{1/m}, \quad (6)$$

$$\sigma = \left[ 81,17 \int_0^1 (2z-1)^m \sqrt{1-z^2} dz \right]^{-1/m} \sigma_0.$$

В этих уравнениях  $J_i = -\ln[1 - P(\sigma_{\max i})]$ , а  $P(\sigma_{\max 1})$  и  $P(\sigma_{\max 2})$  различные вероятности, имеющие произвольные значения в диапазоне 0,1-0,9.

Определение параметров  $\sigma$ ,  $m$ ,  $\sigma_0$ , для различных типов образцов и последующий расчет распределения пределов усталости, соответствующих другим типоразмерам, проведен с использованием специально разработанного комплекса программ, написанных на языке ФОРТРАН-4. Результаты расчетов пределов усталости, обеспечивающих появление первых макротрещин с вероятностью  $P = 0,5$ , представлены графически на рис. 1 (а, б, в, г) для материала АМГ6М и на рис. 2 (а, б, в, г) для ЗОХТСА. На этих рисунках использованы следующие обозначения:

- - расчет по испытаниям плоских образцов с отверстием при изгибе;
- × - расчет по испытаниям плоских образцов с отверстием при растяжении-сжатии;
- △ - расчет по испытаниям круглых гладких образцов при плоском изгибе;
- - эксперимент для соответствующего типа образцов.

По графикам на рис. 1, 2 видно, что расчеты по результатам испытаний различных типов образцов взаимно дополняют друг друга и находятся в убедительном соответствии с представленными экспериментальными данными. Расчетные кривые усталости, изображенные на рис. 1 (г), 2 (в, г), не совпадают с экспериментом, т.е. соответствующие данные отсутствуют. Эти кривые построены для выяснения отношений пределов усталости одноосевых образцов при изгибе и растяжении-сжатии.

На рис. 3 представлены соотношения пределов усталости

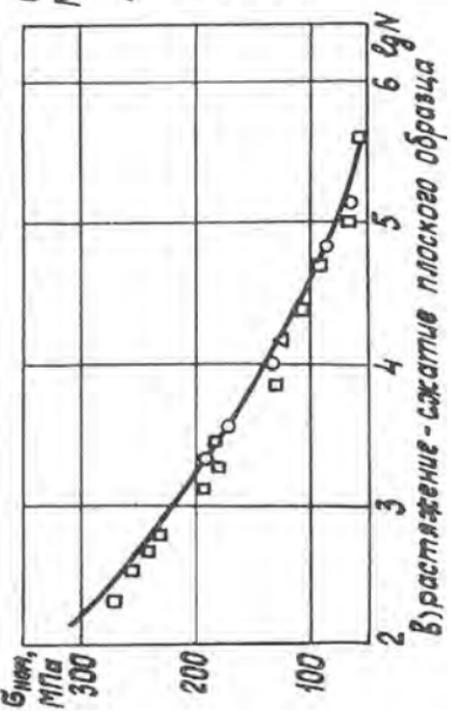
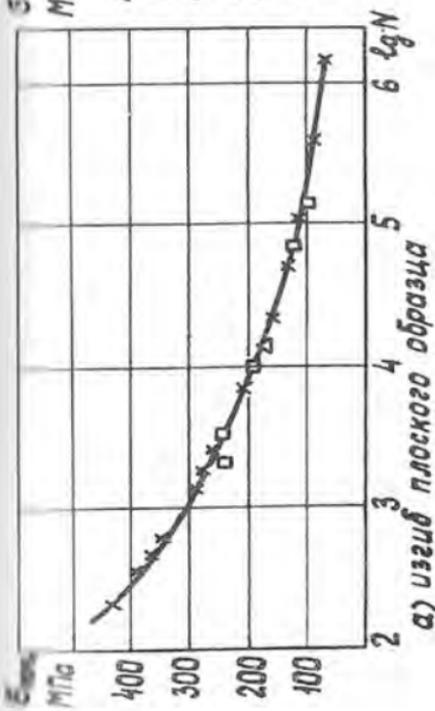
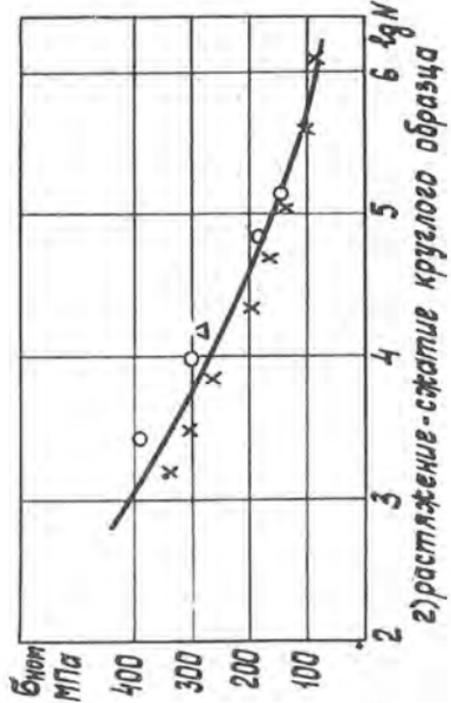
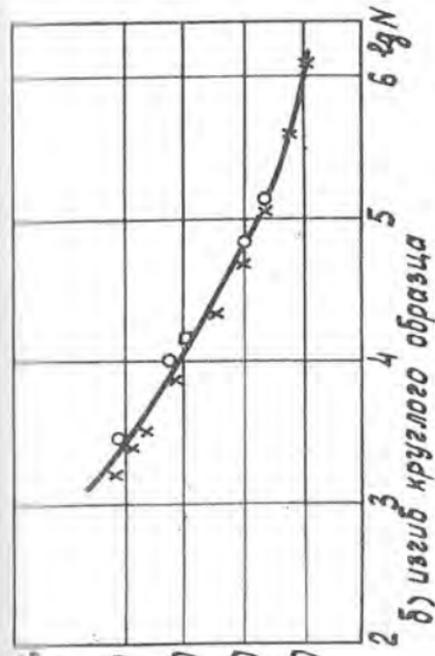
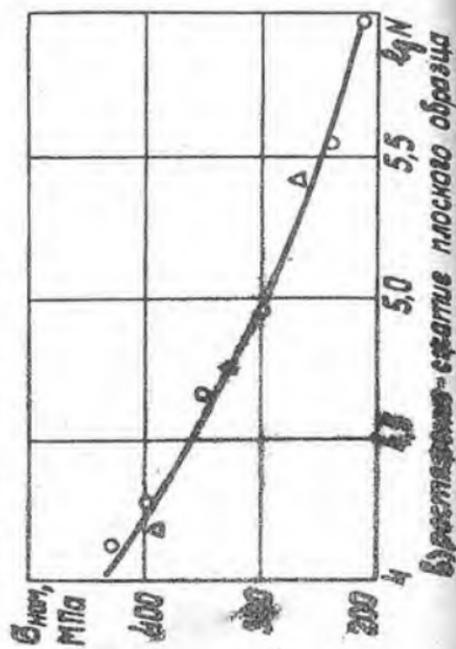
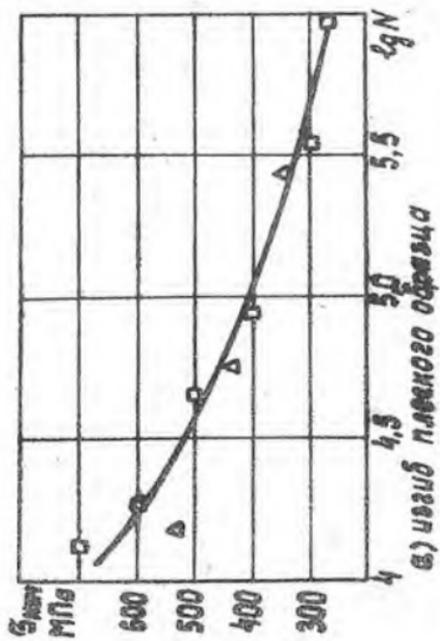
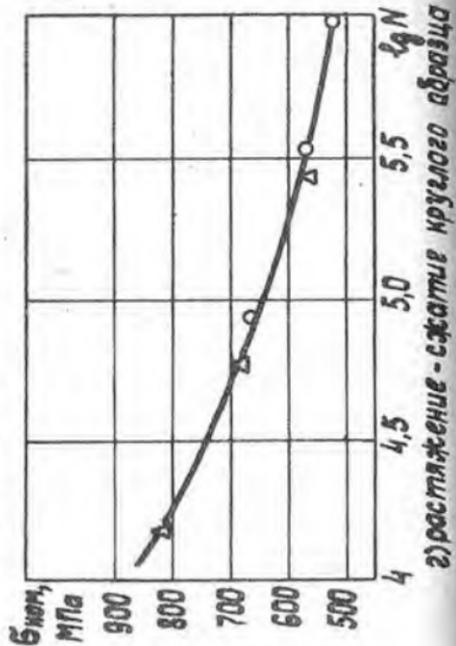
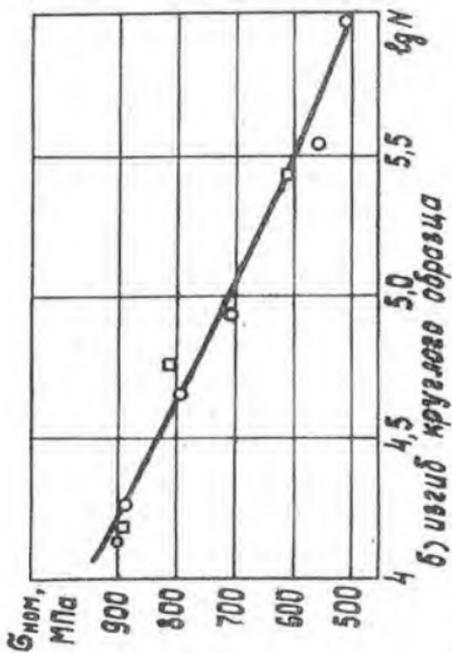


Рис. I



номинальных напряжениях, полученные расчетным путем для плоских образцов с отверстием и круглых гладких образцов при изгибе и растяжении-сжатии (сплошные линии - материал АМг6М, штриховые - 30ХГСА).

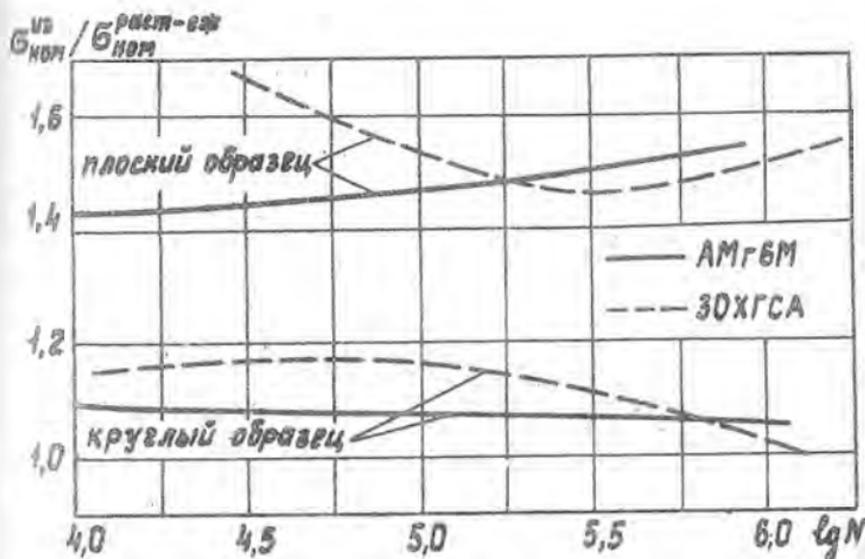


Рис. 3

Как видно из рис. 3, соотношения пределов усталости при изгибе и растяжении-сжатии в пределах логарифмов числа циклов нагружения 5,1–6,0 изменяются одинаково для материалов АМг6М и 30ХГСА. При более низких значениях долговечности сказывается материал, из которого сделан образец. Это различие приобретает не только количественный, но и качественный характер. Во всем рассмотренном диапазоне долговечности соотношение пределов существенно зависит от формы рассматриваемых образцов. Последнее подтверждает отмеченную выше необходимость исследования соотношений пределов усталости при различных видах напряженного состояния на однотипных образцах.

#### Л и т е р а т у р а

И. Кочаев В.П. Определение расчетных характеристик выносливости деталей машин. - В кн.: Механическая усталость в статисти-

ческом аспекте. - М.: Наука, 1969, с. 12-28.

2. Дуплякин В.М., Мостовой А.С. К вероятностному расчету кривых усталости деталей по результатам испытаний лабораторных образцов. - В кн.: Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Межвузовский сборник, изд. КуАИ, вып. I, 1974, с.134-139.

3. Миноранский Э.И. Экспериментальные исследования усталостной прочности образцов. - В кн.: Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. Межвузовский сборник, изд. КуАИ, вып. 3, 1977, с. 129-135.

4. Хазанов Х.С., Лавров Б.А., Иванченко В.И., Петровичев М.А. Исследование влияния спектральной плотности стационарной случайной нагрузки на усталостную прочность образцов из сплава Д16АТ и ЗОХГСА. - В кн.: Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Труды КуАИ, вып. 29, 1967, с. 70-79.

5. Тимшин В.Т., Хазанов Х.С. Расчетно-экспериментальный метод определения долговечности при случайных нагрузках. - В кн.: Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Межвузовский сборник, изд. КуАИ, вып. 2, 1975, с. 97-103.

6. Дуплякин В.М. Прогнозирование появления первой макротрещины в цилиндрической оболочке по результатам усталостных испытаний плоских образцов двух типоразмеров. - В кн.: Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. Межвузовский сборник, изд. КуАИ, вып. 3, 1977, с. 93-97.

7. Weibull W. A statistical theory of the strength of materials. Stockholm, 1939, Ingeniörs vetenskaps akademien, Handlingen (Proceeding) Nr. 151, p. 58.