

*Е. В. ГИАЦИНТОВ, М. Н. СТЕПНОВ*

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Известно, что при усталостных испытаниях наблюдается большое рассеяние характеристик выносливости, что связано со статистической природой процесса усталостного разрушения и несовершенством методики усталостных испытаний.

Если испытать на одном уровне напряжений достаточно большое количество образцов, то получим расхождения в долговечности отдельных образцов, достигающие десятка раз (фиг. 1).

Кривые усталости, которые строятся по результатам испытания серии из 6–8 образцов, носят случайный характер, при повторении испытаний такой же серии образцов они не совпадают и расхождения по пределам усталости могут достигать значительных величин.

Поэтому для получения надежных оценок характеристик выносливости следует проводить испытания достаточно большого количества образцов и результаты испытаний подвергать статистической обработке.

Задача статистической обработки заключается в нахождении функции распределения вероятности разрушения образцов и определения параметров этой функции.

Исследованиями, проведенными в Московском авиационном технологическом институте [1] на серии из 463 образцов, испытанных на одном уровне напряжений, установлено, что в качестве функций распределения вероятности разрушения образцов можно пользоваться нормальным законом распределения величины

$$\lg(N_i - N_0),$$

где  $N_i$  — число циклов до разрушения  $i$ -го образца,

$N_0$  — так называемый порог чувствительности по циклам, т. е. наибольшее количество циклов, для которого вероятность разрушения при  $N < N_0$  еще равна нулю; иначе говоря, если  $N_0 > 0$ , то при испытании даже очень большого количества образцов при дан-

ном уровне напряжений ни один из них не разрушится при  $N < N_0$ . На больших уровнях напряжений, т. е. при низких долговечностях, порог чувствительности проявляется при очень малых вероятностях разрушения.

Статистическая обработка усталостных испытаний в соответствии с установленным законом распределения проводится в следующем порядке. Пусть при напряжении  $\sigma$  испытано  $n$  образцов. Расположим числа циклов в возрастающем порядке:

$$N_1 \leq N_2 \leq \dots \leq N_i \leq N_n.$$

Тогда статистической оценкой вероятности разрушения  $P(N_i)$  может служить накопленная частота  $\frac{i}{n}$ , более удобно принять  $\frac{i}{n+1}$  (2).

Экспериментальные точки наносятся на логарифмически нормальную вероятностную бумагу, по оси абсцисс которой откладывается случайная величина  $N_i$  в логарифмическом масштабе, а по оси ординат — накопленные частоты  $\frac{i}{n+1}$ , соответствующие вероятности разрушения  $P(N_i)$ , в специальном вероятностном масштабе, согласно с нормальным законом распределения. Если экспериментальные точки ложатся на прямую со случайными отклонениями в разные стороны, то справедлив логарифмически нормальный закон распределения. В этом случае вычисляются эмпирические оценки среднего значения и среднего квадратичного отклонения логарифма чисел циклов по формулам

$$\overline{\lg N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i;$$

$$\overline{S} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n (\lg N_i)^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \lg N_i \right)^2 \right]},$$

и находятся доверительные интервалы для соответствующих параметров функций распределения генеральной совокупности по формулам

$$\overline{\lg N} - \frac{\overline{S} \cdot t_{q, \gamma}}{\sqrt{n}} < a < \overline{\lg N} + \frac{\overline{S} \cdot t_{q, \gamma}}{\sqrt{n}};$$

$$\sqrt{\frac{n-1}{n}} \cdot \overline{S} z_1 < \sigma < \sqrt{\frac{n-1}{n}} \cdot \overline{S} \cdot z_2,$$

где  $t_{q, \gamma}$  и  $z_1 z_2$  — коэффициенты определяемые по таблицам (3) в зависимости от числа образцов в партии  $n$  и доверительной вероятности  $\gamma$ , принимаемой обычно в диапазоне 90—95%.

Значения  $\overline{\lg N}$  и  $\overline{S}$  позволяют провести на вероятностной бумаге прямую линию, характеризующую эмпирическую функцию распределения долговечности. Эта линия описывается уравнением

$$\lg \cdot N = \overline{\lg N} + U_p \cdot \overline{S},$$

где  $U_p$  — квантиль, соответствующий данной вероятности разрушения.

По доверительным интервалам для  $\sigma$  и  $a$  аналогично наносятся границы доверительной области, которая с доверительной вероятностью  $\gamma$  будет покрывать линию, соответствующую теоретической функции распределения долговечности.

Пример указанной обработки результатов усталостных испытаний сплава В95 с  $\sigma_{-1} = 20 \text{ кг/мм}^2$  приведен на фиг. 1 для напряжений 24 и 30  $\text{кг/мм}^2$ .

Если экспериментальные точки ложатся на кривую, как показано на фиг. 1 для напряжения 21  $\text{кг/мм}^2$ , то распределение логарифмов чисел циклов до разрушения не подчиняется нормальному закону. Как уже говорилось в этом случае нормальному закону распределения подчиняется случайная величина  $\lg(N_i - N_0)$

Порог чувствительности  $N_0$  можно определить графически на вспомогательном графике, по оси абсцисс которого в логарифмическом масштабе откладываются величины  $x_i = \lg(N_i - N_0)$ . Подбирается такая величина  $N_0$ , при которой точки со случайными отклонениями попадут на прямую линию. После этого подсчитывается среднее и среднее квадратичное отклонение величины  $x$  по формулам

$$\overline{\lg(N_i - N_0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg(N_i - N_0);$$

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left\{ \left[ \sum_{i=1}^n \lg(N_i - N_0)^2 \right] - \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n \lg(N_i - N_0) \right]^2 \right\}},$$

находятся доверительные интервалы

$$\overline{\lg(N - N_0)} - \frac{\bar{S} \cdot t_{q, \kappa}}{\sqrt{n}} < a < \overline{\lg(N - N_0)} + \frac{\bar{S} \cdot t_{q, \kappa}}{\sqrt{n}};$$

$$\sqrt{\frac{n-1}{n}} \cdot \bar{S} \cdot z_1 < \sigma < \sqrt{\frac{n-1}{n}} \cdot \bar{S} \cdot z_2,$$

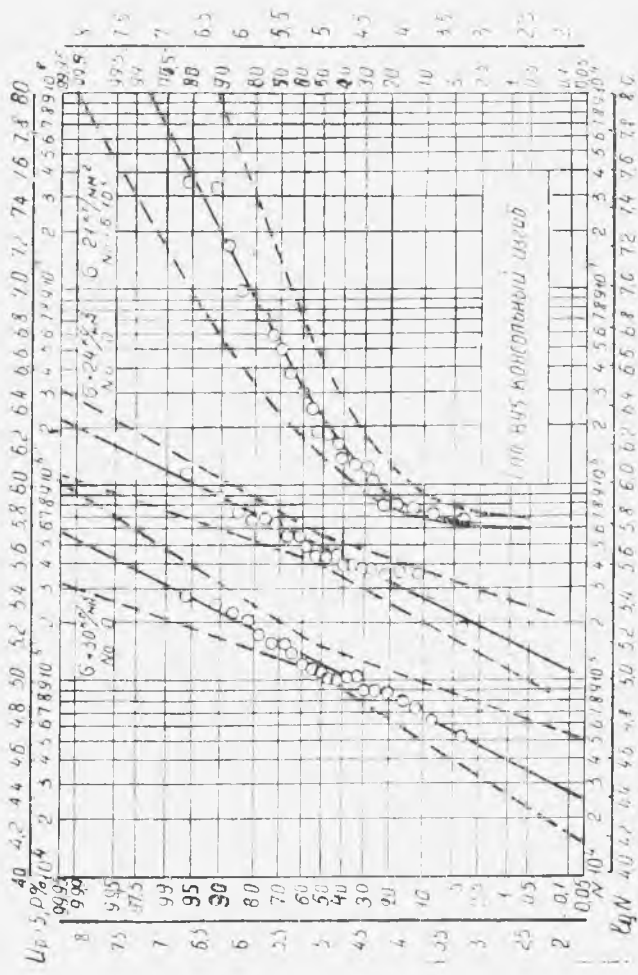
и на вспомогательном графике проводится эмпирическая линия и доверительная область. Далее совершается переход от вспомогательного графика к основному путем замены абсцисс всех точек  $\lg(N_i - N_0)$  на  $\lg N_i$ .

Результат указанной обработки приведен на фиг. 1 для напряжений  $\sigma = 21 \text{ кг/мм}^2$ .

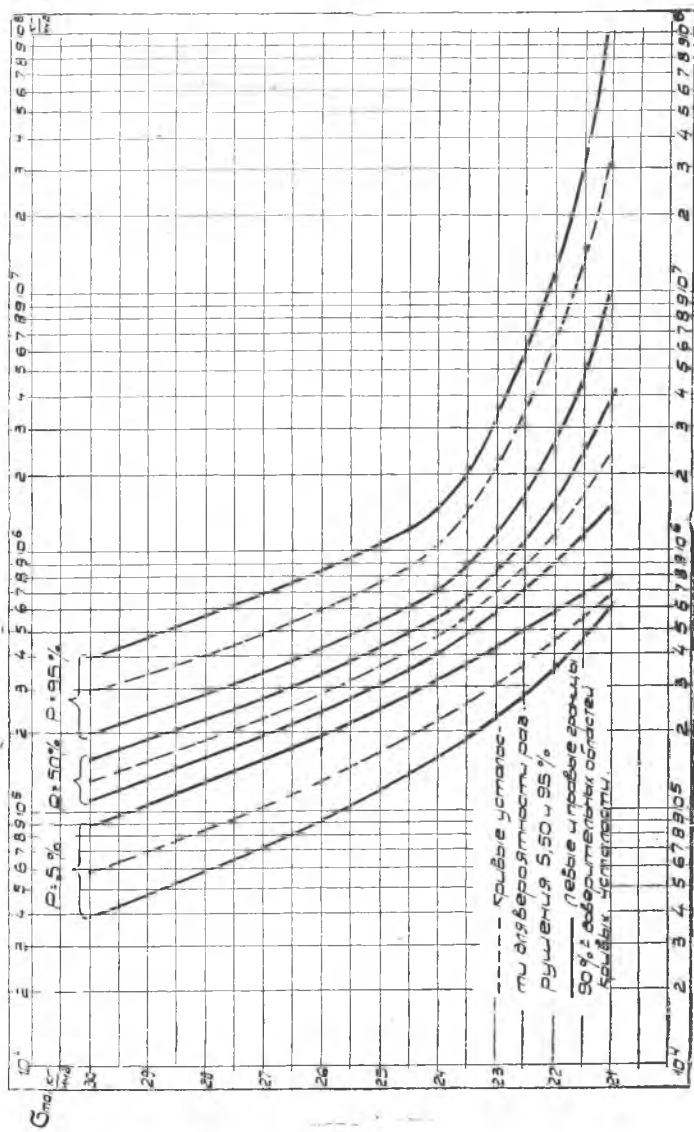
Если подобная обработка с построением доверительных областей проведена для ряда уровней напряжений, то в результате можно построить кривые усталости для разных вероятностей разрушения. На фиг. 2 приведены кривые усталости сплава В95 для вероятностей разрушения 5, 50 и 95%, а также их 90%-ные доверительные области.

Ниже приводятся некоторые экспериментальные данные, позволяющие установить зависимости рассеяния сопротивления усталости от ряда факторов.

На фиг. 3 нанесены кривые изменения среднего квадратичного

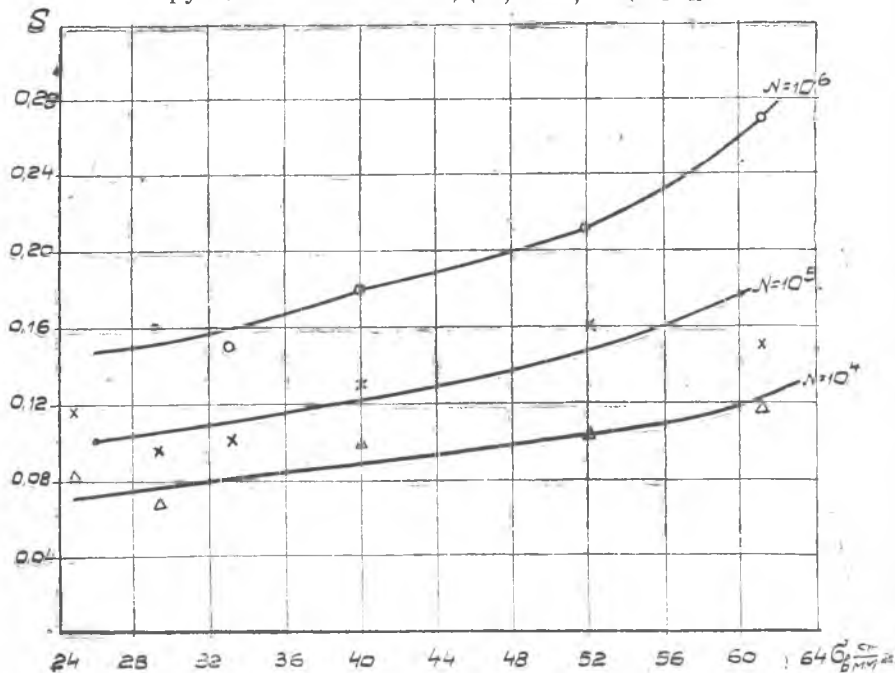


Фиг. 1. Зависимость вероятности разрушения от долговечности образцов при разных максимальных напряжениях.



Фиг. 2. Кривые усталости сплава В95 для вероятностей разрушения 5,50 и 96% и их 90%-ные доверительные области

отклонения долговечности, в зависимости от предела прочности алюминиевых сплавов. Графики построены по результатам испытаний конструкционных сплавов Д16, В95, АК4-1 и АВТ1.



Фиг. 3. Зависимость среднего квадратного отклонения долговечности от предела прочности конструкционных алюминиевых сплавов.

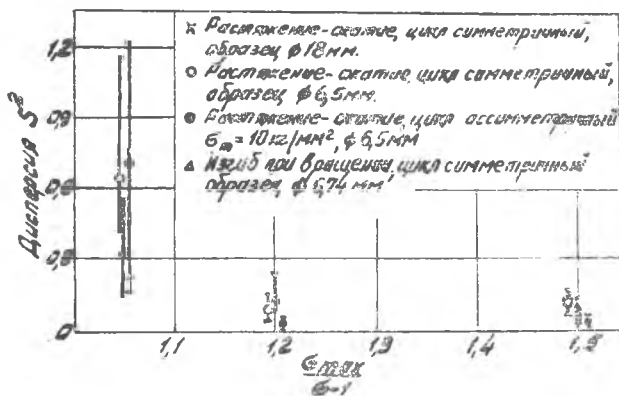
Из приведенных данных видно, что с увеличением  $\sigma_B$  рассеивание долговечности возрастает. Это, очевидно, связано с ростом чувствительности материалов при увеличении  $\sigma^3$  к неоднородностям структуры, включениям и другим факторам, определяющим сопротивление усталости.

Анализ кривых (фиг. 3) показывает, что рассеивание снижается с уменьшением средней долговечности.

На фиг. 4 нанесены значения дисперсии с доверительными интервалами при различных напряжениях для образцов из сплава В95 разных размеров, испытанных при растяжении — сжатии и изгибе. Из приведенных данных вытекает, что с увеличением напряжений рассеивание уменьшается.

Сравнение рассеивания долговечности образцов  $\varnothing 18$  мм и  $\varnothing 6,5$  мм при растяжении — сжатии показывает, что с увеличением размеров, точнее напрягаемого объема, рассеивание уменьшается. Переход от растяжения — сжатия к изгибу вызвал уменьшение рассеивания, хотя согласно выше сказанному уменьшение напрягаемого объема при изгибе должно было повести к увеличению разброса.

Полученные результаты объясняются рядом методических факторов. Так при испытании на растяжение—сжатие очень трудно добиться центрального приложения нагрузки. Несмотря на повы-



Фиг. 4. Зависимость дисперсии логарифма долговечности и доверительных интервалов от уровней напряжений при испытании.

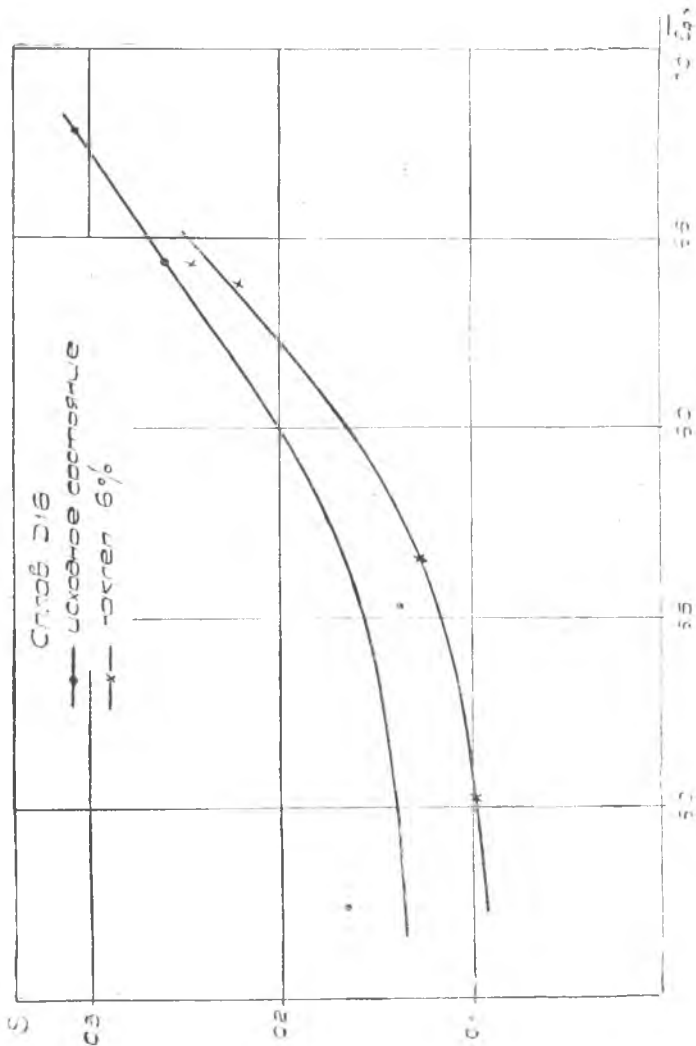
шенные требования, предъявляемые к точности изготовления образцов и в частности опорных поверхностей головок, всегда имеет место эксцентриситет нагрузки, что в свою очередь вызывает дополнительный разброс долговечности.

На фиг. 5 показано влияние наклепа на рассеяние сопротивления усталости в зависимости от среднего значения  $lg N$ . Наклеп осуществлялся путем предварительного растяжения образцов. Испытание производилось при изгибе с вращением. Выравнивание механических свойств материала в результате пластического деформирования, ведет к уменьшению разброса долговечности при испытании на усталость.

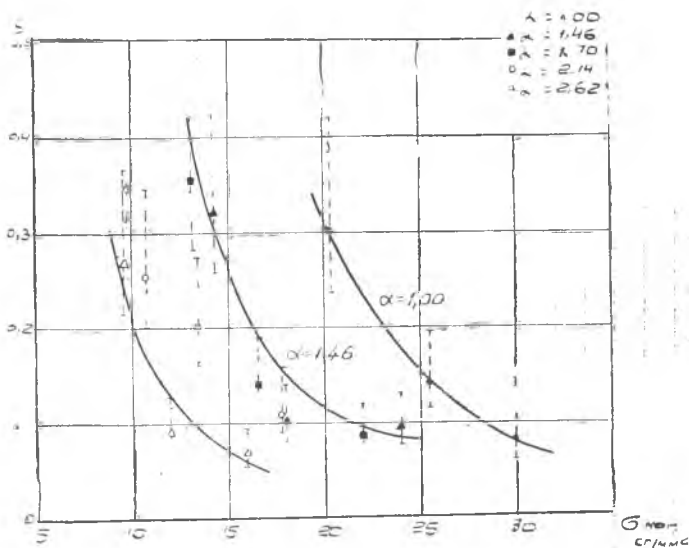
На фиг. 6 показано влияние концентрации напряжений на рассеяние. Испытание производилось при консольном изгибе вращающихся круглых образцов из сплава В95, имеющих кольцевую выточку.

Из рассмотрения данных приведенных на фиг. 6 следует, что рассеяние уменьшается с ростом степени концентрации напряжений, если сравнение производить при одинаковом номинальном напряжении. Это связано с ростом действующих напряжений в зоне концентрации, а, как было указано выше, увеличение напряжений ведет к уменьшению рассеяния.

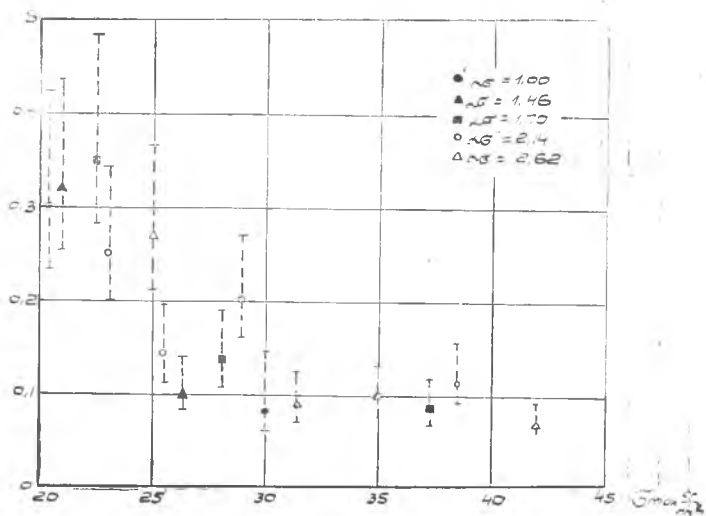
Если сравнение производить при одинаковых максимальных напряжениях в зоне концентрации, то в этом случае не выявляется зависимость между средним квадратичным отклонением и степенью неравномерности распределения напряжений (фиг 7).



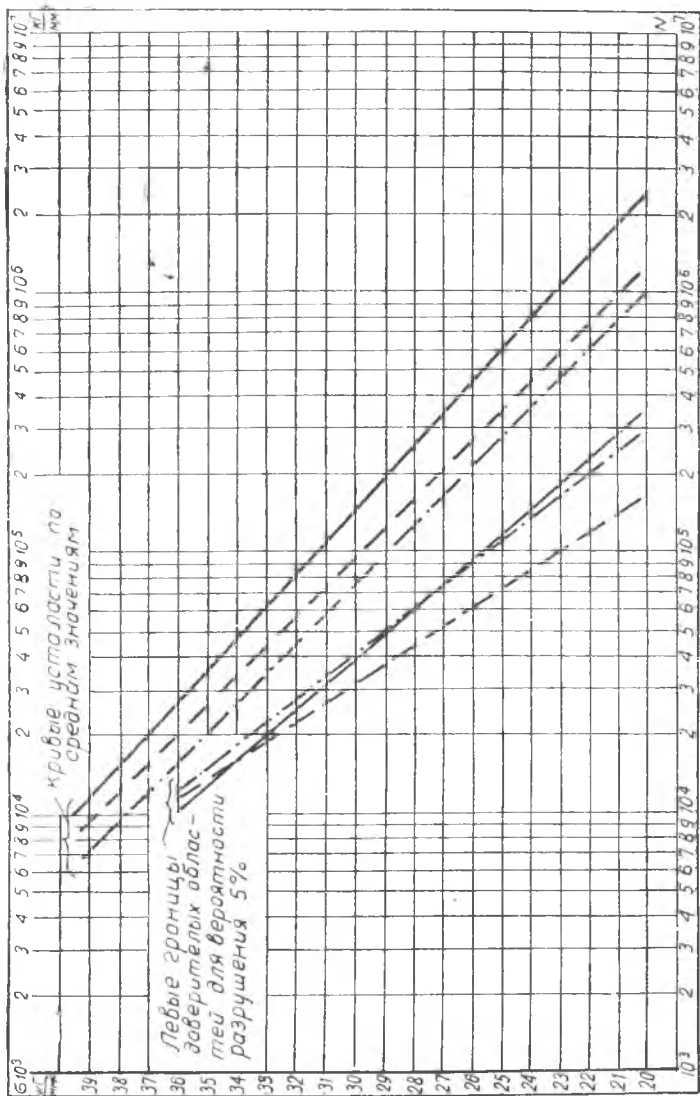




Фиг. 6. Зависимость среднего квадратичного отклонения от номинальных напряжений.



Фиг. 7. Зависимость среднего квадратичного отклонения от максимальных напряжений.



Фиг. 8. Кривые усталости и левые границы доверительных областей для сплава В95 при разных температурах прессования.

С ростом  $\sigma_{\max}$  рассеяние уменьшается в одинаковой степени независимо от уровня концентрации напряжений.

Если сравнение проводить при одинаковой средней долговечности, то можно отметить, что с увеличением  $\alpha_0$  рассеяние уменьшается.

На фиг. 8 приведены результаты статистической обработки экспериментальных данных, полученных при исследовании влияния температуры прессования профилей из сплава В95. На графике нанесены кривые усталости, построенные по средним значениям долговечности 60-ти образцов, испытанных на 3-х уровнях напряжений (по 20 образцов на каждом напряжении) и левые границы доверительных областей (доверительная вероятность 90%) для вероятности разрушения 5%.

Из приведенных данных следует, что, если анализировать кривые усталости, построенные по средним значениям долговечности большого количества образцов, но без учета рассеяния, то при температуре прессования 360°C долговечность оказывается наименьшей.

Однако, если учитывать рассеяние долговечности, т. е. анализировать взаимное расположение левых границ доверительных областей, построенных для относительно небольшой вероятности разрушения, то оказывается, что температуры прессования 360°C—410°C оказываются наиболее выгодными с точки зрения сопротивления усталости сплава В95.

Этот пример показывает, что анализ кривых усталости, построенных без учета рассеяния по средним значениям даже при испытании большого количества образцов (60 обр.) не может быть исчерпывающим, и в ряде случаев может привести к ошибочным выводам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Н. М. Степнов, Е. В. Гиацингов, О законе распределения долговечности при усталостных испытаниях. Заводская лаборатория, № 3, 1958.

2. W. Weibull. Trans. of the Royal Ynst. of Technology, Stockholm, Sweden, № 27, 1949. г.

3. И. В. Дунин-Барковский и Н. В. Смирнов, Теория вероятностей и математическая статистика в технике (общая часть) ГИТТЛ, 1955.