

М.С. Беляев<sup>1</sup>, М.А. Горбовец<sup>1</sup>, Т.И. Комарова<sup>1</sup>

## СПОСОБ ИСПЫТАНИЙ И РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО УЧАСТКА КРИВОЙ УСТАЛОСТИ

*Для определения характеристик усталости материала обычно испытывают 15 образцов. Если кривая усталости имеет горизонтальный участок, т. е. физический предел выносливости, то в таком случае можно определить только среднее значение предела выносливости. Предлагается способ испытаний на усталость и обработки результатов с применением метода ступенчатого изменения нагрузки, который позволяет расчетным способом точно определить среднее значение предела выносливости. Он также дает возможность определить минимальное значение с любой заданной вероятностью не-разрушения. При этом общее количество образцов для испытаний составляет 32 шт.*

**Ключевые слова:** испытания на усталость, предел выносливости, обработка результатов испытаний, способы наименьших квадратов и ступенчатого изменения нагрузки, никелевый сплав с монокристаллической структурой.

M.S. Belyaev<sup>1</sup>, M.A. Gorbovets<sup>1</sup>, T.I. Komarova<sup>1</sup>

## TEST METHODS AND THE CALCULATIVE DETERMINATION OF FATIGUE LIMIT FOR THE HORIZONTAL FATIGUE CURVE AREA

*Fifteen specimens are usually subjected to testing in order to determine fatigue characteristics of a material. If the fatigue curve has the horizontal area, i. e. the physical fatigue limit so in this case it's possible to define only the average value of fatigue limit. The fatigue testing method and the data processing are suggested in the paper along with the use of the step-by-step loading changing method, which allows to calculate the average value of fatigue limit to a high precision. This method also gives a possibility to define the minimum value with any given non-destruction probability. In doing so, the total quantity of test specimens is equal to 32 pcs.*

**Keywords:** fatigue tests, fatigue limit, test results processing, least square methods and step-by-step loading changing, Ni-base single-crystal alloy.

---

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Для определения предела выносливости по результатам испытаний партии образцов конструкционного материала прибегают, как правило, к построению средней линии усталости. Общепринятое определение предела выносливости сформулировано как максимальное значение напряжения цикла, при котором не происходит усталостное разрушение до базы испытания. При этом различают условный (ограниченный) и физический пределы выносливости. Если на кривой усталости в области высоких долговечностей испытания имеется горизонтальный участок, т. е. при увеличении числа циклов испытания не происходит разрушения образцов, то говорят, что имеет место физический предел выносливости (усталости). Физическим пределом выносливости обладают многие металлические материалы [1, 2], к числу которых относятся жаропрочные стали, титановые и никелевые сплавы, при комнатной и умеренных температурах ис-

пытания. На рис. 1 представлены результаты испытаний на многоцикловую усталость при комнатной температуре образцов двух никелевых сплавов с монокристаллической структурой, которые имеют физический предел усталости начиная с базы испытаний  $\sim 10^7$  циклов.

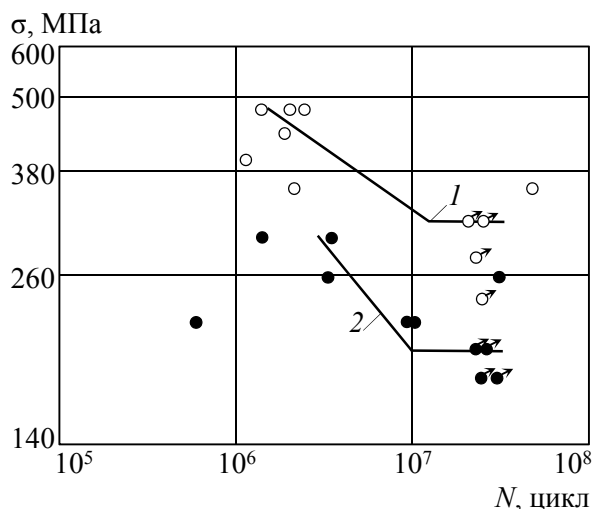


Рис. 1. Результаты испытаний на усталость жаропрочных никелевых сплавов (1 – типа ВКНА; 2 – ВЖМ1) с монокристаллической структурой при комнатной температуре

Половина образцов требуется для построения наклонного участка кривой усталости. По результатам испытаний строят кривую усталости, т. е. среднюю линию выносливости, и на заданной базе испытания определяют среднее значение предела усталости. Кривые усталости по результатам испытаний партии образцов строят в двойных логарифмических ( $\lg\sigma - \lg N$ ) или полулогарифмических ( $\sigma - \lg N$ ) координатах. Определение среднего значения предела выносливости осуществляют методом графического интерполирования или способом наименьших квадратов.

Применяя метод графического интерполирования, который заключается в графическом построении средней кривой усталости в полосе разброса экспериментальных результатов, можно определить только среднее значение предела выносливости.

Способ наименьших квадратов основывается на обработке результатов испытаний с применением методов математической статистики. Он позволяет, приняв в определенной форме уравнение кривой усталости, получить в численном виде уравнение средней кривой усталости и по расчетным значениям  $\lg\sigma - \lg N$  ( $\sigma - \lg N$ ) точно построить среднюю кривую усталости по результатам испытаний партии образцов.

При обработке результатов испытаний на усталость целесообразно использовать линейную зависимость между напряжением и числом циклов до разрушения. Уравнение кривой усталости часто принимают в виде  $\sigma^m N = \text{const}$ , которое после логарифмирования приобретает вид  $\lg N = a + b \lg \sigma$  и выражается прямой линией в системе двойных логарифмических координат. Здесь логарифм напряжения  $\lg \sigma$  или непосредственно напряжение  $\sigma$  являются независимой переменной, логарифм числа циклов до разрушения  $\lg N$  – случайной величиной. Процедура обработки включает все экспериментальные результаты, т. е. учитывает разброс, присущий испытаниям на усталость. Применение методов регрессионного анализа позволяет определить, кроме средних значений,

Вместе с тем, в действительности при испытаниях на усталость имеется разброс экспериментальных результатов и, в частности, в области средних значений предела выносливости. На нескольких уровнях напряжения (близких к среднему значению предела выносливости) имеются образцы, разрушившиеся и неразрушившиеся в пределах установленной базы испытания. Значение предела выносливости устанавливают по определенным правилам, сформулированным, в частности, в ГОСТ 25.502.

В соответствии с этим стандартом для определения среднего значения предела выносливости следует испытать не менее 15 образцов, причем приблизи-

ряд важнейших статистических характеристик, включая значения среднего квадратического отклонения (СКО)  $S$  и дисперсии  $S^2$  логарифма числа циклов до разрушения  $\lg N$ .

Если материал обладает физическим пределом выносливости, то линия выносливости состоит из двух участков: левого наклонного, соответствующего при испытании относительно малым долговечностям (обычно не превышающим  $10^7$  циклов), и правого – горизонтального. В области левого участка все или почти все образцы разрушаются. В области правого участка все или почти все образцы проходят базу испытания без разрушения и не разрушаются (за малым исключением) при долговечностях, превышающих базу испытания в 5–10 и более раз. В таком случае статистические характеристики, полученные с использованием регрессионного анализа для левого участка средней линии выносливости, не могут быть применены для описания правого (горизонтального) участка. Следовательно, для него, т. е. для долговечностей, превышающих  $10^7$  циклов, невозможно определение никаких характеристик кроме среднего значения предела выносливости.

Вместе с тем в ряде случаев характеристики усталости жаропрочных авиационных материалов, обладающих физическим пределом выносливости, требуется определять при долговечностях  $10^7$  циклов и более высоких для различных вероятностей разрушения, достигающих значения 0,999. Сделать это, пользуясь методами регрессионного анализа для левого участка средней линии усталости, не представляется возможным. Задача состоит в том, чтобы предложить надежный способ статистической обработки, который позволит достоверно расчетным путем определить среднее значение предела выносливости и характеристики его разброса, используя для этого экспериментальные результаты (разрушился – не разрушился) относительно установленной базы испытания.

В данной работе для решения сформулированной задачи предлагается для горизонтального участка кривой усталости воспользоваться способом ступенчатого изменения нагрузки, который называют методом «лестницы» [3].

Важное отличие этого способа от способа наименьших квадратов заключается в том, что он предусматривает проведение испытаний образцов только в области значений напряжений, близких к предполагаемому среднему значению предела усталости на установленной базе испытаний. Предполагаемое среднее значение предела усталости определяют по результатам испытаний в области левого наклонного участка кривой усталости.

По методу «лестницы» первый образец испытывают при напряжении  $\sigma_1$ , равном предполагаемому пределу выносливости. Если первый образец не разрушился до базового числа циклов, то следующий образец испытывают на более высоком уровне напряжения  $\sigma_2 = \sigma_1 + \Delta\sigma$ , где  $\Delta\sigma$  – интервал между уровнями напряжений. Если первый образец разрушился на базовом числе циклов или при меньшем значении, то следующий образец испытывают на более низком уровне напряжения  $\sigma_2 = \sigma_1 - \Delta\sigma$ .

Для каждого следующего образца напряжение увеличивают или уменьшают на величину  $\Delta\sigma = d$  в зависимости от результата испытания предыдущего образца. Интервал между уровнями напряжений  $\Delta\sigma = d$  назначают постоянным для каждой выборки образцов. Его величина составляет ~5% от предполагаемой величины среднего значения предела усталости.

Обработка результатов испытаний заключается в расчетном определении среднего значения предела выносливости и среднего квадратического отклонения (СКО) значения предела выносливости. С этой целью применяют соответствующие зависимости математико-статистического характера. Для определения среднего значения предела выносливости применяют зависимость

$$\bar{\sigma}_{-1} = \sigma_0 + d \left[ \frac{\sum i \cdot n_i}{K} \pm 0,5 \right], \quad (1)$$

где  $\bar{\sigma}_{-1}$  – среднее значение предела выносливости;  $\sigma_0$  – величина минимального напряжения испытаний;  $d$  – интервал между уровнями напряжений;  $K$  – меньшая сумма из числа разрушенных или неразрушенных образцов;  $\sum i \cdot n_i$  – сумма произведений порядкового номера уровня напряжений на количество образцов, испытанных на каждом уровне напряжений; знак (+) ставят, если общее число разрушений больше числа неразрушений, знак (–) ставят, если общее число разрушений меньше числа неразрушений.

Для определения значения СКО предела выносливости  $S_{\sigma_{-1}}$  применяют зависимость, в которой использованы такие же условные обозначения, как в зависимости (1) [2, 3]:

$$S_{\sigma_{-1}} = 1,62d \left[ \frac{K \cdot \sum i^2 \cdot n_i - (\sum i \cdot n_i)^2}{K^2} + 0,029 \right]. \quad (2)$$

Для надежного определения среднего значения предела усталости и значения СКО при использовании метода ступенчатого изменения нагрузки необходимо испытать (по различным литературным источникам) не менее 20 образцов.

Применение способа ступенчатого изменения нагрузки с целью точного определения значения предела выносливости возможно только при том условии, что этот способ и метод наименьших квадратов обеспечивают получение достаточно близких значений предела выносливости при одинаковых условиях испытаний. Такое сравнение выполнено с использованием результатов испытаний на многоцикловую усталость при высоких температурах образцов никелевого жаропрочного сплава ЖС32У с монокристаллической структурой <001>.

Химический состав сплава и термическая обработка соответствовали приведенным в нормативно-технической документации. Макроструктуру заготовок образцов выявляли травлением в специально подготовленной смеси концентрированной соляной кислоты и перекиси водорода. После визуального контроля монокристаллические заготовки каждой из заданных ориентаций направляли на рентгеноструктурный контроль. По результатам рентгено съемки годными по ориентации считали те заготовки образцов, у которых угол отклонения  $\alpha$  заданного кристаллографического направления от вертикальной оси заготовки составлял не более 10 град, т. е.  $\alpha_{<001>} \leq 10$  град.

На усталость были испытаны гладкие образцы без покрытия при температурах 850 и 1000°C, при чистом изгибе вращающегося образца (частота нагружения составляла  $f=50$  Гц, цикл нагружения симметричный –  $R=-1$ , контролируемый параметр – нагрузка, база испытания  $N=2 \cdot 10^7$  циклов). Испытания на усталость спланированы и проведены таким образом, что одна и та же выборка образцов использована для определения среднего значения предела усталости двумя различными методами [4].

С использованием математических процедур, соответствующих методу наименьших квадратов и способу ступенчатого изменения нагрузки, рассчитаны средние значения предела многоцикловой выносливости сплава ЖС32У с монокристаллической структурой <001>. Пределы выносливости и другие характеристики сопротивления усталости определены для двух баз испытаний  $N$ :  $10^7$  и  $2 \cdot 10^7$  циклов. Результаты испытаний, включая средние линии усталости, полученные с применением метода наименьших квадратов, представлены в двойной логарифмической системе координат  $\lg \sigma - \lg N$  (рис. 2).

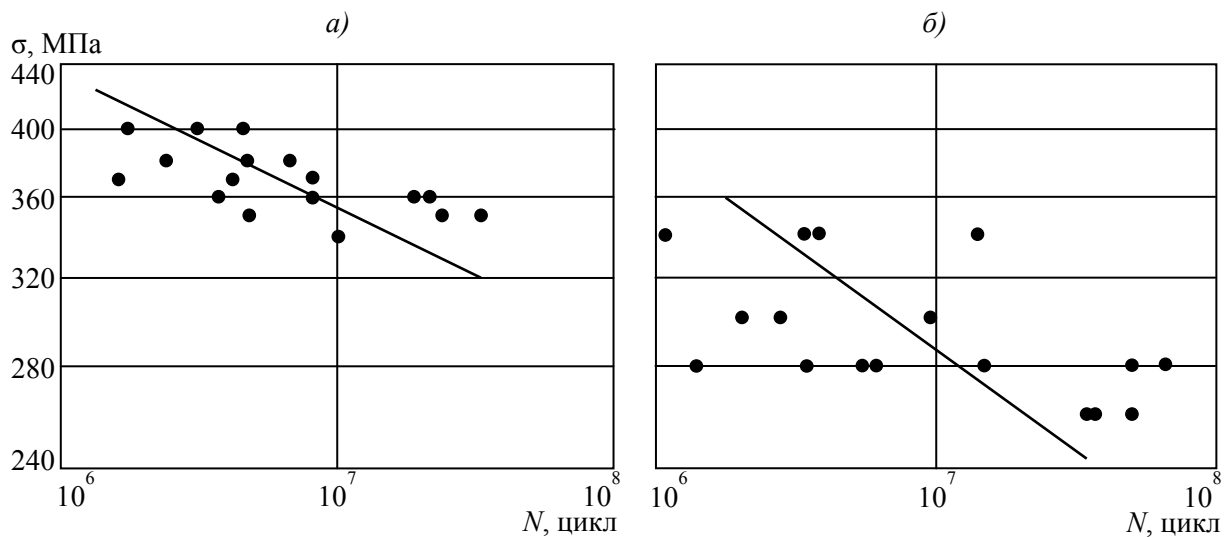


Рис. 2. Результаты испытаний на усталость образцов из сплава ЖС32У с монокристаллической структурой <001> при высоких температурах 850 (а) и 1000°С (б)

Для расчета способом ступенчатого изменения нагрузки составлены соответствующие последовательности испытаний. Последовательность, составленная по результатам испытаний на базе  $10^7$  циклов при температуре испытания 850°С, приведена в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты испытаний на усталость образцов сплава ЖС32У с монокристаллической структурой <001> (база испытания  $N=10^7$  циклов, температура 850°С)**

$\sigma_{-1}$ , МПа	Номера испытанных образцов* по порядку											Сумма	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	×	0
370	×		×				×					3	
360		0		×		0		×				2	2
350					0				×		0	1	2
340										0			1
											$\Sigma n_i$	6	5

\* × – разрушенные образцы; 0 – неразрушенные образцы.

В данной выборке результатов испытаний число неразрушенных образцов меньше, чем число разрушенных. Расчет среднего значения предела усталости  $\bar{\sigma}_{-1}$  и СКО предела усталости  $S_{\sigma_{-1}}$  проведен по неразрушенным образцам с применением формул (1) и (2).

Результаты определения средних значений пределов многоциклового усталости по методу наименьших квадратов и способу ступенчатого изменения нагрузки приведены в табл. 2.

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что имеет место высокая степень соответствия пределов выносливости, определенных методом наименьших квадратов и способом ступенчатого изменения нагрузки. Максимальное отклонение не превышает 7% и наблюдается только на базе испытания  $2 \cdot 10^7$  циклов. При этом более высокое значение имеет предел выносливости, определенный способом ступенчатого изменения нагрузки. На базе испытания  $10^7$  циклов отклонение между значениями предела выносливости, определенного различными способами, фактически отсутствует.

Причиной небольшого отклонения значений предела выносливости, определенного способом ступенчатого изменения нагрузки, от значения, определенного стан-

дартным способом, т. е. с использованием метода наименьших квадратов, является недостаточное количество образцов, образовавших выборку для расчета в первом случае. Выше указано, что выборка должна включать не менее 20 образцов.

Таблица 2

**Средние значения предела многоциклового выносливости сплава ЖС32У с монокристаллической структурой <001>, определенные различными способами**

Параметры испытаний		Значения параметров, полученные			
		методом наименьших квадратов		способом ступенчатого изменения нагрузки	
Температура испытания, °С	База испытания $N$ , циклов	$10^7$	$2 \cdot 10^7$	$10^7$	$2 \cdot 10^7$
850	Количество образцов в выборке	18	18	11	8
	Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа	355	335	357	358
1000	Количество образцов в выборке	17	17	13	12
	Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа	285	260	280	278

Можно сделать вывод, что применение способа ступенчатого изменения нагрузки для определения среднего значения предела выносливости является вполне обоснованным и допустимым. Необходимо, чтобы число образцов, образующих выборку для расчета, было не менее 20 шт.

Таким образом, если при испытаниях на многоцикловую усталость металлический материал имеет физический предел выносливости, т. е. горизонтальный участок на кривой усталости, и требуется точно определить среднее значение предела выносливости или значение предела выносливости с вероятностью разрушения, отличающейся от 50%, то следует соблюдать следующий порядок действий:

- провести испытания на усталость с целью построения левой ветви кривой усталости и определения предполагаемого значения предела выносливости. Для этого потребуется испытать ~12 образцов. Результаты испытаний следует обработать с применением метода наименьших квадратов;

- в области предполагаемого значения предела выносливости на заданной базе испытаний, которая обычно составляет  $10^7$  циклов или более, следует испытать не менее 20 образцов способом ступенчатого изменения нагрузки (методом «лестницы»). Чтобы определить среднее значение предела выносливости и СКО предела выносливости экспериментальные результаты следует обработать, применив зависимости (1) и (2);

- общее количество образцов для испытаний с целью построения кривой усталости, включающей горизонтальный участок, и расчетного определения предела выносливости составляет 32 шт.;

- если требуется определить минимальные значения предела выносливости с некоторой заданной вероятностью неразрушения, следует, приняв гипотезу о нормальном (логарифмически нормальном) распределении значений предела выносливости, выполнить соответствующие расчеты.

В данной работе рассмотрен случай многоциклового усталостного нагружения. Следует полагать, что предложенный способ действий применим и к случаю малоциклового усталостного нагружения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука. 2003. 254 с.
2. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. Ч. 1. Киев: Наукова думка. 1987. 512 с.
3. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. М.: Машиностроение. 2005. 400 с.
4. Беляев М.С., Кошкин С.Б., Горбовец М.А. Определение предела усталости жаропрочного сплава способом ступенчатого изменения нагрузки //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 27–30.

#### REFERENCES LIST

1. Terent'ev V.F. Ustalost' metallicheskih materialov [Fatigue of metallic materials]. M.: Nauka. 2003. 254 s.
2. Troshhenko V.T., Sosnovskij L.A. Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov [Fatigue resistance of metals and alloys]: Spravochnik. Ch. 1. Kiev: Naukova dumka. 1987. 512 s.
3. Stepnov M.N., Shavrin A.V. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mehanicheskikh ispytaniy [Statistical methods for processing the results of mechanical tests]: Spravochnik. M.: Mashinostroenie. 2005. 400 s.
4. Beljaev M.S., Koshkin S.B., Gorbovec M.A. Opredelenie predela ustalosti zharoprochnogo splava sposobom stupenchatogo izmenenija nagruzki [Determination of fatigue limit superalloy way step load changes] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №1. S. 27–30.