

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ

*М.С. Беляев, С.Б. Кошкин,
Т.И. Комарова, Д.В. Щеголев*

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИСПЫТАНИЙ НА ФОРМУ КРИВОЙ УСТАЛОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ

Сопротивление переменным нагрузкам, т. е. сопротивление усталости, является одной из важнейших характеристик прочности материалов. Характеристики усталости жаропрочных никелевых сплавов используют при назначении ресурса и запасов прочности элементов конструкций авиационных ГТД [1, 2]. В работе рассмотрено сопротивление усталости жаропрочных никелевых сплавов при высоких температурах испытания ($T_{\text{исп}} \geq 0,5 T_{\text{пл}}$), соответствующих температурам эксплуатации.

На усталость в соответствии с ГОСТ 25.502–79 проведены испытания сплава ЭП109 при температуре 900°C и сплава ЖС6У – при 950°C. Были испытаны гладкие образцы кругового сечения с переменным диаметром рабочей части. Испытания вращающихся образцов были проведены при симметричном чистом изгибе. Частота нагружения составляла 50 Гц. Представление и аппроксимация результатов испытаний жаропрочных никелевых сплавов осуществлены в системе координат $\lg \sigma - \lg N$. При высокой относительной температуре испытания $T_{\text{исп}} > 0,5 T_{\text{пл}}$ никелевые сплавы не имеют физического предела выносливости. Чем выше база испытания, тем меньше будет значение предела выносливости материала. В таких условиях, исследуя сопротивление усталости, используют термин ограниченный предел выносливости.

Испытания образцов жаропрочных никелевых сплавов на многоцикловую усталость обычно проводят при долговечностях, не превышающих 10^8 циклов. Результаты испытаний гладких образцов с хорошей точностью поддаются прямолинейной аппроксимации в логарифмической системе координат $\lg \sigma - \lg N$. Для аналитического описания средней линии выносливости используют уравнение степенной зависимости $\sigma^m N = C$, которое в названной системе координат принимает вид

$$\lg N = a + b \lg \sigma. \quad (1)$$

В этом уравнении коэффициент b соответствует тангенсу угла наклона линии выносливости к оси ординат, a – постоянная. Корректность такой аппроксимации подтверждает высокий коэффициент корреляции $r=0,7-0,99$, полученный при статистической обработке результатов испытаний большого числа никелевых сплавов [3]. Чем выше температура испытания, тем меньшее значение приобретает коэффициент b .

В работе испытания на усталость проведены в широком интервале долговечностей: $5 \cdot 10^5 \div 10^9$ циклов. Результаты испытаний сплавов ЭП109 и ЖС6У представлены на рис. 1 и 2.

Рис. 1. Линейная аппроксимация в пределах различных интервалов испытаний (1 – $10^5 \div 10^8$ циклов; 3 – $10^5 \div 10^9$ циклов) и прогнозирование с базы 10^8 циклов (2) средних значений выносливости сплава ЭП109 при температуре 1173К

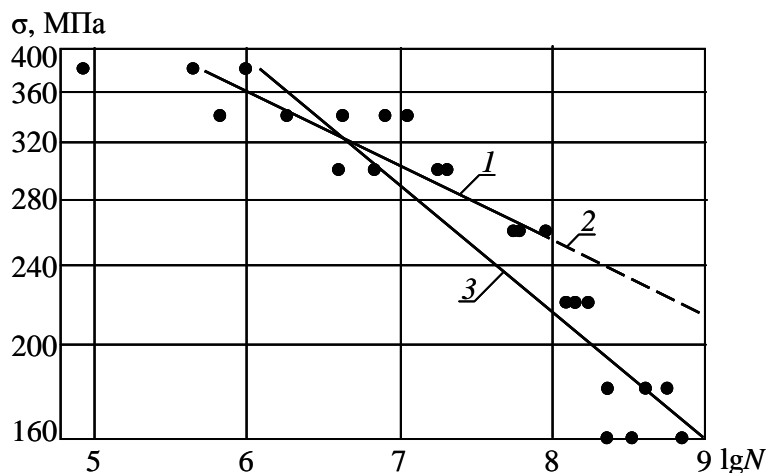
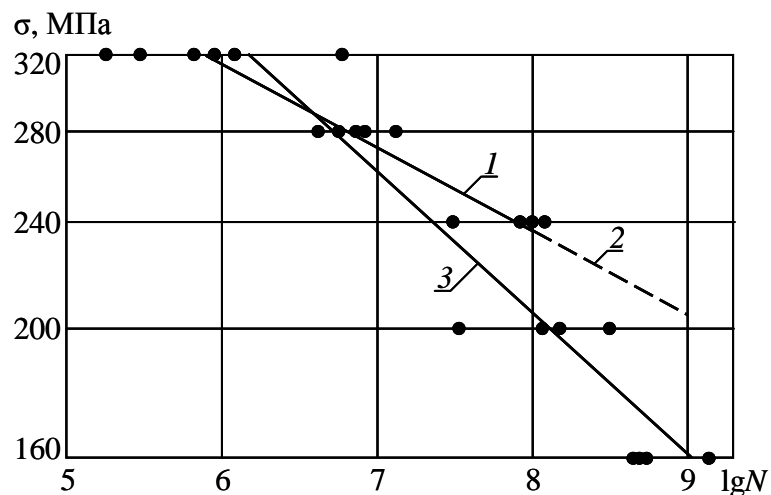


Рис. 2. Линейная аппроксимация в пределах различных интервалов испытаний (1 – $10^5 \div 10^8$ циклов; 3 – $10^5 \div 10^9$ циклов) и прогнозирование с базы 10^8 циклов (2) средних значений выносливости сплава ЖС6У при температуре 1223К



Видно, что при превышении определенной базы испытания, которая лежит в интервале $5 \cdot 10^7 \div 10^8$ циклов, происходит более быстрое снижение ограниченного предела усталости, чем при меньших долговечностях. Поэтому необходимо проверить гипотезу о возможности линейной аппроксимации результатов испытаний.

Предположение относительно формы линии регрессии проверяется при помощи критерия Фишера [4]

$$F = s_2^2 / s_1^2, \quad (2)$$

где s_1^2 – дисперсия $\lg N$ внутри систем, т. е. осредненная для определенной выборки условная дисперсия; s_2^2 – дисперсия $\lg N$ относительно эмпирической линии регрессии.

Дисперсионное отношение было найдено для выборки образцов каждого сплава, испытанного в данной работе. Вычисление дисперсии s_1^2 проведено после проверки однородности условных дисперсий. Проверка произведена по критерию Бартлета и показала, что в пределах выборки образцов одного сплава условные дисперсии s_{1i}^2 однородны. Результаты расчетов представлены в таблице.

Величина дисперсионного отношения $F = s_2^2 / s_1^2$

Сплав (m – количество уровней напряжения; n – количество испытанных образцов)	Температура испытания, °С	Число степеней свободы f_2 f_1	Квантиль F -распределения (при уровне значимости $\alpha=5\%$)	Дисперсионное отношение $F = s_2^2 / s_1^2$		
				линейная аппроксимация в интервале $5 \cdot 10^5 \div 10^9$ циклов	при прогнозировании с базы испытания, цикл	
					10^8	$5 \cdot 10^7$
ЖС6У ($m = 5; n = 23$)	950	3 18	3,16	4,60	7,43	48,56
ЭП109 ($m = 7; n = 26$)	900	5 19	2,74	4,25	5,34	12,56

Полученные результаты показывают, что дисперсионное отношение, вычисленное по экспериментальным данным, превышает значение квантиля F -распределения при 5%-ном уровне значимости. Это означает, что при указанных температурах в широком интервале долговечностей $5 \cdot 10^5 \div 10^9$ циклов применение для аппроксимации результатов испытаний линейной зависимости является необоснованным. Для аппроксимации результатов в этих условиях должна применяться иная зависимость.

Имеющиеся экспериментальные результаты позволяют также оценить возможность применения линейной зависимости для прогнозирования средних значений выносливости. Для этого при расчете линии выносливости не учитывали результаты испытаний, полученные при одном или нескольких нижних уровнях напряжения, для которых долговечность превышала $5 \cdot 10^7 \div 10^8$ циклов. Найденное уравнение экстраполировали в область долговечностей, не включенных в расчет. При этом прогнозируемое значение всегда значительно превышало экспериментальное (см. рис. 1 и 2).

Проведена статистическая оценка возможности прогнозирования. Дисперсию s_2^2 вычисляли на одном или двух нижних уровнях напряжения относительно экстраполированного среднего значения $\lg N$. Результаты, представленные в таблице, показывают, что прогнозирование средних значений выносливости по линейной зависимости вызывает превышение дисперсионным отношением квантиля F -распределения. Отметим, чем меньше база испытания, с которой осуществлялось прогнозирование, тем выше расчетное значение F -критерия.

Проведенный анализ показал, что для исследованных сплавов и условий испытаний линейная зависимость выносливости $\lg N = a + b \lg \sigma$ (т. е. степенное уравнение $\sigma^m N = C$) не может быть использована для аппроксимации результатов испытаний в широком интервале долговечностей $5 \cdot 10^5 \div 10^9$ циклов и для прогнозирования в область долговечностей, превышающих $5 \cdot 10^7 \div 10^8$ циклов.

В работе исследована возможность прогнозирования средних значений выносливости в область долговечностей, превышающих $5 \cdot 10^7 \div 10^8$ циклов. Такая возможность в большой степени зависит от выбора зависимости, которая будет использована для прогнозирования. Зависимость должна отвечать ряду условий:

- прогнозирование должно производиться в область долговечностей, превышающих наибольшее экспериментально определенное среднее значение $\lg N$ в 5–10 раз;
- прогнозные значения, полученные по средней линии выносливости, не должны значительно отличаться (до 15% по пределу выносливости) от экспериментальных значений, полученных методом графического интерполирования (от экспериментального среднего);

– зависимость для прогнозирования должна носить экспоненциальный характер, что моделирует описание общего процесса разупрочнения жаропрочных никелевых сплавов при совместном действии нагрузок и высоких температур;

– зависимость для прогнозирования в системе координат $\lg\sigma - \lg N$ должна иметь форму кривой, наклон которой к оси абсцисс (N , цикл) становится более крутым при увеличении числа циклов.

В работе для аппроксимации и прогнозирования средних значений выносливости сплавов ЖС6У и ЭП109 в названных условиях испытаний применена зависимость $N = A\sigma^n \exp(-k\sigma^d)$, которая после логарифмирования принимает вид

$$\lg N = a + b \lg \sigma + c \sigma^f, \quad (3)$$

где N – число циклов до разрушения; σ – напряжение испытания; a, b, c, f – коэффициенты.

Эта зависимость в координатах $\lg\sigma - \lg N$ носит нелинейный характер.

Решение уравнения (3) заключается в определении коэффициентов. Коэффициенты a и c определяют путем обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Коэффициенты b и f определяют перебором, при этом каждому коэффициенту задается значение из числа следующих: $b = -(0,01; 0,1; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5)$, $f = 1, 2, 3, 4$.

Для исследования возможности применения с целью аппроксимации и прогнозирования нелинейного уравнения средней линии выносливости (3), было использовано компьютерное моделирование.

В методе наименьших квадратов критерием степени приближения расчетных результатов к экспериментальным является величина остаточной дисперсии $s_{\text{ост}}^2$ [4]. Чем меньше $s_{\text{ост}}^2$, тем точнее зависимость (3) описывает экспериментальные результаты.

Вычисляя значения $\lg N$ для различных сочетаний коэффициентов b и f и используя критерий $s_{\text{ост}}^2$, определяли значения коэффициентов уравнения (3), которые обеспечивают максимальную сходимость экспериментальных и расчетных результатов.

Для зависимости (3) на персональном компьютере составлена программа расчета по методу наименьших квадратов коэффициентов a и c в связи с теми значениями, которые были заданы коэффициентам b и f . Программа включала определение величины остаточной дисперсии $s_{\text{ост}}^2$ для каждого уравнения средней линии выносливости.

Для разработки программы применена система визуального проектирования и событийного программирования «Vorland C+Builder 6.0» в операционной среде «Windows XP». Программа позволяет в режиме диалога вычислить и подобрать коэффициенты уравнений с представлением результатов расчетов в графической и табличной форме.

При компьютерном моделировании для каждого сплава был получен ряд уравнений средней линии выносливости, соответствующих комбинации значений коэффициентов b и f , задаваемых перебором. Таким образом, из ряда прогнозных значений для каждого сплава надо выбрать одно, которое обеспечивает максимальную точность. Были сформулированы следующие критерии оценки точности прогнозирования:

– величина остаточной дисперсии логарифма числа циклов $s_{\lg N}^2$ должна иметь минимальное значение;

– расчетные значения $\lg N_{\text{расч}}$ должны принадлежать доверительному интервалу относительно среднего значения $\lg N$, определенного экспериментально;

– отклонение прогнозных значений ограниченного предела выносливости от аппроксимирующих следует определять на контрольных уровнях долговечности с использованием формулы:

$$\delta = \frac{(\sigma_a - \sigma_n) \cdot 100\%}{\sigma_a}, \quad (4)$$

где σ_a, σ_n – ограниченные пределы, определенные по аппроксимирующей и прогнозной кривой соответственно.

Установлено, что при аппроксимации и прогнозировании лучшая сходимость расчетных и экспериментальных результатов достигается, когда коэффициенты b и f принимают значения $b=-1; f=3$. Таким образом, для сплавов ЭП109 и ЖС6У, испытанных на многоцикловую усталость в широком интервале долговечностей $5 \cdot 10^5 \div 10^9$ циклов, при других условиях, указанных выше, нелинейное уравнение средних значений выносливости имеет вид

$$\lg N = a - \lg \sigma + c \sigma^3. \quad (5)$$

Средние линии выносливости, полученные при нелинейной аппроксимации и прогнозировании с использованием уравнения (5), представлены на рис. 3 и 4.

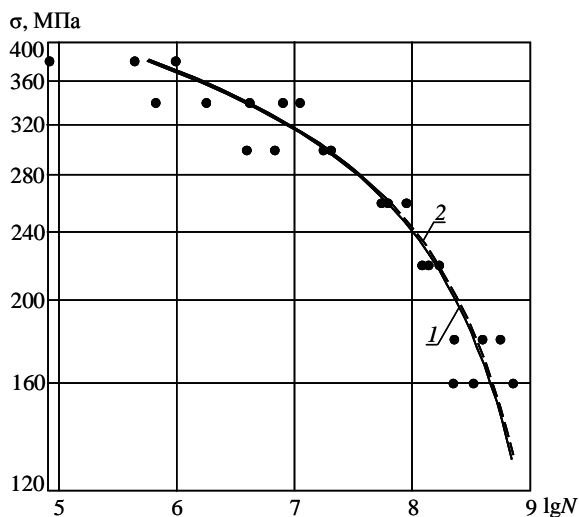


Рис. 3. Нелинейная аппроксимация в интервале $5 \cdot 10^5 \div 5 \cdot 10^8$ (1 – сплошная линия) и прогнозирование с базы $5 \cdot 10^7$ циклов (2 – пунктирная линия) средних значений выносливости сплава ЭП109 при температуре 1173К

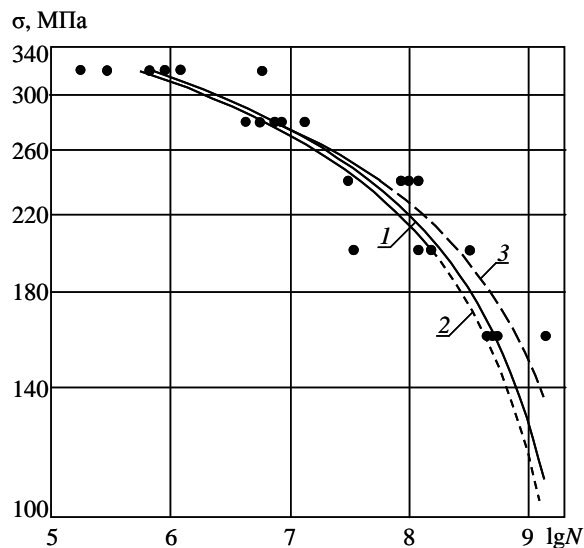


Рис. 4. Нелинейная аппроксимация в интервале $5 \cdot 10^5 \div 10^9$ циклов (1) и прогнозирование с базы 10^8 циклов (2) и базы $5 \cdot 10^7$ циклов (3) средних значений выносливости сплава ЖС6У при температуре 1223К

Оценивая результаты, полученные при переборе возможных значений коэффициентов b и f , которые указаны выше, следует отметить, что удовлетворительные результаты при аппроксимации и прогнозировании экспериментальных данных могут быть получены только при условии $f=3$. В то же время изменение коэффициента b в интервале значений $-(0,01 \div 2)$ обеспечивает значения остаточной дисперсии $s_{\text{ост}}^2$, близкие к минимальным. Другими словами, значение коэффициента b не обязательно во всех случаях равняется $b=-1$. Для других выборок экспериментальных результатов или для других условий испытаний (например, при другой температуре) b может принять значение $b \neq -1$.

Для обеспечения хорошей точности прогнозирования большое значение имеет правильное определение условий прогнозирования. На основе анализа результатов и условий прогнозирования сформулированы следующие обязательные требования, которым должна удовлетворять выборка экспериментальных результатов:

- выборка для испытаний должна включать не менее 15 образцов;
- экспериментальные результаты должны быть получены в интервале долговечностей $10^5 \div 10^8$ циклов;
- экспериментально определенное среднее значение долговечности, с которого начинается прогнозирование, должно находиться в интервале долговечностей $5 \cdot 10^7 \div 10^8$ циклов.

При соблюдении этих условий среднее значение выносливости можно прогнозировать до базы $5 \cdot 10^8$ циклов, т. е. до долговечности, превышающей полученные экспериментально значения не менее чем в пять раз.

В статье показано, что при испытании двух никелевых сплавов на усталость при симметричном цикле нагружения и рабочих температурах при высоких базах испытания происходит существенно более быстрое снижение предела выносливости, чем при малых и средних (до 10^8 циклов) базах испытания. Этот факт является важной характеристикой сопротивления жаропрочных никелевых сплавов переменным нагрузкам при высоких температурах. Он объясняется изменением и разупрочнением структуры сплавов при совместном воздействии механического нагружения и высокой температуры [5]. Конечное изменение структуры при переменном нагружении близко к тому, которое наблюдается при статическом нагружении, т. е. в условиях ползучести.

При испытаниях на усталость жаропрочных никелевых сплавов в условиях высоких температур и асимметричного нагружения, т. е. при одновременном действии статического и переменного напряжения, процесс ускоренного снижения предела выносливости реализуется при базах испытания существенно более низких, чем это показано в данной работе. Отметим, что в реальных условиях эксплуатации жаропрочные лопаточные и дисковые материалы (последние – в зоне крепления лопатки) подвергаются совместному воздействию статических и переменных напряжений. Поэтому проведение испытаний жаропрочных никелевых сплавов в условиях высоких температур и асимметричного усталостного нагружения является важным элементом оценки работоспособности этих материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Н.Д. Обеспечение надежности современных авиадвигателей. //В кн.: Проблемы надежности и ресурса машиностроения.– М.: Наука, 1986, 320 с.
2. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей /Под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Балашова.– М.: Машиностроение, 1981, 222 с.
3. Ищенко И.И., Погребняк А.Д., Синайский Б.Н. Влияние высоких температур на сопротивление усталости жаропрочных сталей и сплавов.– Киев: Наук. Думка, 1979, 176 с.
4. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул.– М.: Высшая школа, 1988, 239 с.
5. Кишкин С.Т., Морозова Г.И., Беляев М.С. и др. Фазовые превращения в жаропрочном никелевом сплаве ЖС6У, испытанном на усталость //ФММ, 1984, т. 58, № 6, с. 1171–1178.