

А.Д.Погребняк, В.Н.Пелых, В.В.Касперская

## К ВЫБОРУ МОДЕЛИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНООСНОМ АСИММЕТРИЧНОМ НАГРУЖЕНИИ

*Институт механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины,  
ул. Нестерова, 3, Киев, 03057, Украина; e-mail: creep@intech.kiev.ua*

**Abstract.** The limiting state of specimens made of the heat-resistant nickel alloys is studied in conditions of the combined action of static and cyclic loading in the wide range of temperatures. The solution is constructed with using the model of the limiting state that sets the relations between the ultimate damaging stresses in the form of exponential transcendental function. The findings are approved experimentally on the solid prismatic specimens.

**Key words:** high cycle fatigue, limiting state, heat-resistant, solid prismatic specimen, cyclic tension-compression, cyclic bending.

### **Введение.**

Анализ условий работы многих ответственных элементов машиностроительных конструкций свидетельствует о том, что в условиях эксплуатации они подвергаются весьма сложному комплексу силовых воздействий, включающему, как правило, циклические и статические нагрузки. Это приводит к развитию процессов усталости металла и, в конечном итоге, к разрушению как деталей, так и конструкций в целом. Нередко реальные условия их работы сопровождаются воздействием повышенных температур. Примером таких элементов являются, например, лопатки и диски газотурбинных двигателей, детали энергетического оборудования, паропроводы и др.

В связи с вопросом прочности элементов конструкций возникает настоятельная необходимость в оценке предельного состояния жаропрочных материалов в условиях многоциклового асимметричного нагружения с учетом температурного воздействия. Такая оценка при нормальных температурных условиях, как правило, осуществляется на основе диаграмм предельных амплитуд напряжений – зависимости предельных амплитуд  $\sigma_a$  от среднего напряжения  $\sigma_m$  цикла при постоянном значении числа циклов до разрушения  $n_R$ .

К числу таких зависимостей, применяемых в расчетной практике, следует отнести зависимости Гудмана, Гербера, Зодерберга, Серенсена – Кинашошвили [8, 11 – 13]. Как правило, их построение требует минимального объема экспериментальных исследований.

Однако, как показали многочисленные экспериментальные проверки для широкого класса материалов, указанные зависимости соответствуют экспериментальным данным лишь в частных случаях – применительно к конкретным материалам либо при определенных условиях нагружений [11, 14, 18]. В реальных условиях соотношение разрушающих напряжений зависит как от долговечности работы конструкции, так и от температуры и других факторов, когда вероятны изменения физических и механических свойств материалов [15], что требует дополнительной корректировки известных зависимостей.

В работах [1, 3, 16] предложен новый подход к оценке предельных напряжений конструкционных материалов в условиях многоциклового асимметричного и комбинированного нагружения, в основе которого лежит использование степенной трансцендентной функции, позволяющей описать большое многообразие диаграмм пре-

дельных напряжений – вогнутых, выпуклых, близких к линейным. Метод апробирован на решении задач оценки предельного состояния широкого круга конструкционных материалов при асимметричном нагружении растяжением-сжатием, изгибом, кручением при нормальной температуре [5 – 7]. Результаты исследования сопротивления усталости конструкционных материалов в условиях высокотемпературного циклического нагружения отражены в работах [9, 19].

Применительно к высокотемпературному асимметричному циклическому нагружению вопросы предельного состояния жаропрочных никелевых сплавов частично рассмотрены в публикациях [1, 2, 7]. Целью данной работы является дальнейшее расширение исследований в данном направлении и решение задач по оценке предельного состояния данного класса материалов в широком диапазоне температур.

### 1. Постановка задачи. Исходные соотношения.

Исследуем усталостное разрушение сплошных цилиндрических образцов серии жаропрочных никелевых сплавов в широком диапазоне температур. Температурный диапазон их использования в эксплуатационных условиях колеблется от нормальной температуры до максимальных рабочих – 900 – 1000 °С. Столь высокие температуры, естественно, оказывают влияние на свойства исследуемых материалов и могут оказать определенное влияние на их предельные состояния.

В работе [2] установлены особенности сопротивления усталости жаропрочных никелевых сплавов в двух температурных диапазонах, границей которых является область температур, которая составляет примерно 0,55 – 0,60 температуры плавления ( $\theta_{пл.}$ ) сплава.

При температурах до 0,55, ..., 0,60 температуры плавления разрушение деталей носит усталостный характер. При более высоких температурах имеют место процессы ползучести, которые оказывают заметное влияние на особенности разрушения в этих условиях. Учитывая это обстоятельство, на первом этапе возникает необходимость выбора функции для оценки предельного состояния сплавов в этих температурных условиях, обеспечивающей адекватное описание экспериментальных данных.

Образцы исследуемых сплавов подвергаются совместному воздействию статических и циклических нагрузок, при которых реализуется асимметричный цикл нагружения. При этом рассмотрено одноосное напряженное состояние, формируемое при нагружении образцов статической осевой нагрузкой. Принимаем, что имеет место многоцикловая усталость, развивающаяся при относительно невысоких температурах на фоне упругих деформаций, когда сумма статических и циклических напряжений меньше предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и тем более меньше предела прочности  $\sigma_B$ . Для этой области обычно характерны высокие частоты нагружения ( $f > 10$  Гц) и долговечности  $n_R$ , превышающие  $10^4$  циклов.

Усталостные испытания образцов исследуемых материалов в условиях симметричного и асимметричного нагружений проведены по общеизвестным методикам [8]. Испытаниям при температурном воздействии предшествовал цикл тарировочных работ, обеспечивающих заданный уровень температуры испытываемых образцов.

В работах [1 – 3] на основе предложенного подхода разработаны модели, позволяющие описать предельное состояние большого числа конструкционных материалов в виде таких зависимостей:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \left[ \cos \left( \frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right) \right]^\lambda; \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \right]^\xi. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) содержат три характеристики исследуемого материала: предел ограниченной усталости при симметричном цикле  $\sigma_n$ ; предел кратковременной прочнос-

ти  $\sigma_B$  и коэффициенты чувствительности материала к асимметрии нагружения  $\lambda$  или  $\xi$ , определяющие форму диаграмм предельных амплитуд напряжений и выступающие в качестве параметров материала. Первые две характеристики определяются на основе стандартных испытаний партии гладких цилиндрических образцов на усталость при симметричном цикле нагружения и на кратковременную прочность.

Определение коэффициентов  $\lambda$  или  $\xi$  может быть осуществлено на основе проведения дополнительного единичного эксперимента при асимметричном нагружении с реализацией в нем определенной комбинации циклической  $\sigma_a$  и статической  $\sigma_m$  компонент. На основе предварительных исследований установлено, что наилучший результат имеет место при выборе компонент  $\sigma_a$  и  $\sigma_m$ , соответствующих отнулевому циклу нагружения, при котором  $\sigma_a = \sigma_m$ . Более подробно методика определения показателей степени ( $\lambda, \xi$ ) изложена в [1, 2].

## 2. Исследуемые материалы.

Рассмотрим особенности влияния температуры на структурное состояние и прочностные свойства некоторых жаропрочных материалов, которые, в конечном итоге, могут определить выбор модели для описания их предельного состояния в широком диапазоне температур. Ниже исследованы сплошные цилиндрические образцы жаропрочных сплавов – деформируемых ЭИ867, ЭП109, ЭИ698ВД и литейных ЖСЗДК и ЖС6У, обладающих при нормальной температуре достаточно низкой пластичностью, оцениваемой по величине относительного удлинения  $\delta$ . Для исследуемых сплавов величина  $\delta$  не превышает 10%.

Жаропрочные никелевые сплавы относятся к дисперсионно-твердеющим материалам, упрочняемым в процессе термической обработки мелкодисперсной  $\gamma'$ -фазой типа  $Ni_3AlTi$ ,  $Ni_3Al$  [10, 17]. Основной особенностью этих сплавов является их структурная нестабильность в области повышенных и высоких температур. Очевидно, что влияние температуры обуславливает изменение структуры материала, что неизбежно сказывается на прочностных характеристиках, в том числе на сопротивлении усталости, долговечности и, естественно, на их предельном состоянии.

На рис. 1 представлены зависимости предела ограниченной усталости сплавов ЭИ867 (а) при растяжении – сжатии и ЖСЗДК (б) при растяжении – сжатии и чистом изгибе с вращением от температуры испытания при симметричном цикле нагружения для двух долговечностей –  $10^6$  (○) и  $2 \cdot 10^7$  (●) циклов.

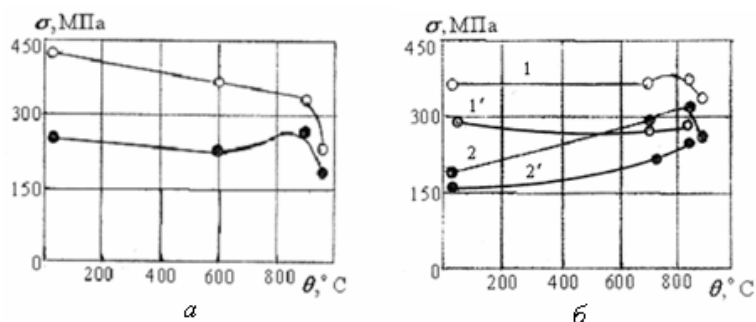
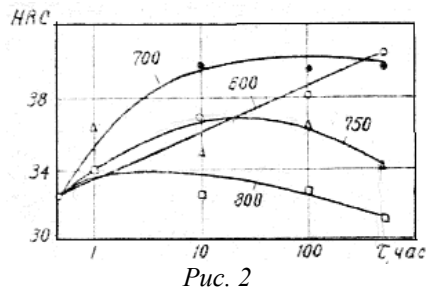


Рис. 1

Представленные графики отражают влияние структурных изменений на сопротивление усталости в процессе испытаний. В области относительно небольшой долговечности ( $n_R = 10^6$  цикл – ~8 час) предел ограниченной усталости в диапазоне температур до  $0,55 - 0,60 \theta_{пл}$ , как правило, либо незначительно снижается (сплав ЭИ867, рис. 1, а, ○), либо сохраняется на одном уровне (сплав ЖСЗДК, рис. 1, б, ○). Эти зако-

номерности характерны как для испытаний при растяжении-сжатии (рис. 1, б, кривая 1'), так и при чистом изгибе с вращением (рис. 1, б, кривая 1), т.е. вид напряженного состояния не оказывает заметного влияния на особенности изменения характеристик сопротивления усталости в вышеуказанном диапазоне температур в области малых долговечностей. Структурные изменения в этих температурно-временных условиях ещё не успевают заметно проявиться. Это отражают также выполненные исследования твердости и микротвердости в процессе длительного воздействия различных уровней температур. В частности, представленные на рис. 2 результаты измерений твердости в единицах HRC образцов сплава ЭИ698ВД свидетельствуют о том, что в области малых долговечностей при температурах 600 – 700 °С имеет место относительно незначительное изменение его твердости, подтверждающее стабильность структуры сплава в этих условиях.



С повышением длительности испытаний ( $2 \cdot 10^7$  цикл. – более 100 час.) структурные изменения, способствующие дополнительному выделению упрочняющей фазы, обеспечивают повышение твердости (см. рис. 2) и, как следствие, усталостных характеристик (см. рис. 1, ●). Особенно это заметно при анализе результатов испытаний образцов сплава ЖСЗДК (см. рис. 1, б) При этом повышение сопротивления усталости имеет место как при растяжении-сжатии (кривая 2'), так и при чистом изгибе с вращением (кривая 2). В этих условиях показатели сопротивления усталости при температурах 700 – 800 °С оказываются выше аналогичных показателей при температуре 20 °С.

Иной характер сопротивления усталости наблюдается при температурах, превышающих  $0,55 - 0,60 \theta_{\text{пл}}$  – 750 – 800 °С. В этих температурных условиях происходят интенсивные структурные изменения, сопровождающиеся, как правило, растворением упрочняющей фазы, что подтверждают исследования изменений твердости (см. рис. 2), отражающие снижение её показателей и свидетельствующие о разупрочнении сплава. В этих условиях имеет место снижение во времени сопротивления усталости при симметричном цикле по линейному закону, реализуемом в испытаниях (при снижении уровня амплитуды напряжений). С дальнейшим повышением температуры может наблюдаться резкое снижение сопротивления усталости жаропрочных никелевых сплавов. В данном случае проявляется также временная зависимость характеристик прочности от температуры – предел длительной прочности материала снижается с увеличением длительности испытаний. Установленные особенности влияния температуры на сопротивление усталости жаропрочных сплавов не могут не отразиться на их предельном состоянии.

### 3. Выбор и обоснование модели предельного состояния.

Исследования предельного состояния различного рода конструкционных материалов в условиях растяжения – сжатия, изгиба и кручения продемонстрировали возможность использования обеих моделей предельного состояния с использованием степенных трансцендентных функций. В меньшей степени исследовано предельное состояние жаропрочных материалов в широком диапазоне температур [1, 2]. Это вызывает необходимость дальнейших исследований.

Выбор модели для адекватного описания экспериментальных данных обычно определяется свойствами конкретного материала – пределом прочности, характеристиками пластичности. Учитывая существенную зависимость свойств жаропрочных материалов от температуры, на первом этапе выполнен цикл испытаний образцов двух деформируемых (ЭИ867, ЭП109) и двух литейных (ЖСЗДК и ЖСБУ) сплавов с целью возможности обоснованного выбора модели предельного состояния применительно к исследуемым уровням температур. Рассчитанные и построенные диаграммы предельного состояния сопоставлены с экспериментальными данными с оценкой максимальной погрешности рассогласования расчёта и эксперимента. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Марка сплава, температура, $\theta$ °С	Расчет по (1)		Расчет по (2)	
	$\lambda$	$\Delta_{\max}, \%$	$\xi$	$\Delta_{\max}, \%$
$\theta < 0,6 \theta_{\text{пл}}$				
ЭИ867, 20	2,225	10,21	0,695	9,61
ЭП109, 600	3,221	14,89	0,604	1,51
ЖС39К, 600	3,688	18,34	0,448	2,99
$\theta > 0,6 \theta_{\text{пл}}$				
ЭП109, 900	0,381	7,49	2,46	8,55
ЖС39К, 850	0,796	16,95	1,152	6,05
ЖС6У, 900	1,27	6,84	0,98	7,58

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что при описании экспериментальных данных применительно к температурам испытаний менее 0,6 температуры плавления лучший результат обеспечивает использование зависимости (2) – максимальная погрешность для исследованных материалов, как правило, меньше (см. табл. 1). Этот результат коррелирует с выводами ранее выполненных исследований применительно к относительно невысоким температурам [8], согласно которым выбор зависимости для оценки предельного состояния в первом приближении может быть осуществлен с учетом пластичности конкретного материала. Так, выражение (2) достаточно хорошо описывает предельное состояние малопластичных, хрупких конструкционных материалов, для которых относительное удлинение  $\delta$  (как характеристика их пластичности), как правило, меньше 12%.

Выражение (1) обеспечивает удовлетворительное описание предельного состояния конструкционных материалов, для которых относительное удлинение  $\delta$  находится на уровне 15 – 20% и выше.

Принципиальная особенность предельного состояния пластичных и малопластичных материалов заключается в характере их реакции на воздействие циклических нагрузок.

Пластичные материалы в области небольшой статической компоненты  $\sigma_m$  слабо реагируют на циклические нагрузки, в то время как для малопластичных, хрупких материалов характерна высокая чувствительность к циклическим нагрузкам и, как следствие, заметное снижение в этих условиях нагружения амплитуды циклических напряжений при асимметричном нагружении.

В области больших значений статической компоненты пластичные материалы весьма чувствительны к статическим напряжениям, а для малопластичных, хрупких – наоборот, присуща слабая чувствительность к ней.

При температурах менее 0,55 – 0,60  $\theta_{\text{пл}}$  предельной статической характеристикой материала, определяющей его работоспособность, является предел прочности  $\sigma_B$ .

При более высоких температурах ( $\theta > 0,6 \theta_{\text{пл}}$ ) максимальные погрешности при сопоставлении результатов расчета предельного состояния и эксперимента имеют место, в основном, на одном уровне (см. табл. 1), что позволяет в этом случае использовать обе зависимости для расчета предельного состояния жаропрочных сплавов. Предельной статической характеристикой в этих условиях является предел длительной прочности  $\sigma_{\text{дл}}$ , зависящий от длительности воздействия нагрузки при конкретной температуре. В связи с этим при данных температурных условиях необходимо располагать зависимостью длительной прочности исследуемого материала при заданных значениях долговечности и температуры.

Это требует необходимости корректировки зависимостей (1) и (2) применительно к указанным температурным условиям с заменой характеристики  $\sigma_B$  на характеристику  $\sigma_{\text{дл}}$ .

#### 4. Предельное состояние жаропрочных сплавов.

Расчет предельного состояния исследуемых жаропрочных никелевых сплавов при температурах менее  $0,55 - 0,60 \theta_{пл}$  проведен, исходя из выполненного предварительного анализа, с использованием модели (2). Результаты расчетов предельного состояния сплавов ЭИ867 (а), ЭП109 (б) и ЖСЗДК (в) при многоцикловом асимметричном нагружении (линии), с использованием характеристик исследуемых материалов и коэффициентов, приведенных в табл. 2, сопоставлены на рис. 3 с экспериментальными данными (точки) для различных значений чисел циклов до разрушения  $n_R = 1,25 \cdot 10^6$  (○) и  $10^7$  (●) циклов.

Таблица 2

Марка сплава	Температура $\theta$ , °С	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Амплитуда напряжения $\sigma_n$ , МПа, при $n_R$ , цикл		Коэффициент $\xi$
				$1,25 \cdot 10^6$	$10^7$	
ЭИ867	20	1257	6	410	279	0,69
ЭП109	600	1080	5	346	250	0,60
ЖСЗДК	600	1025	6	259	186	0,45

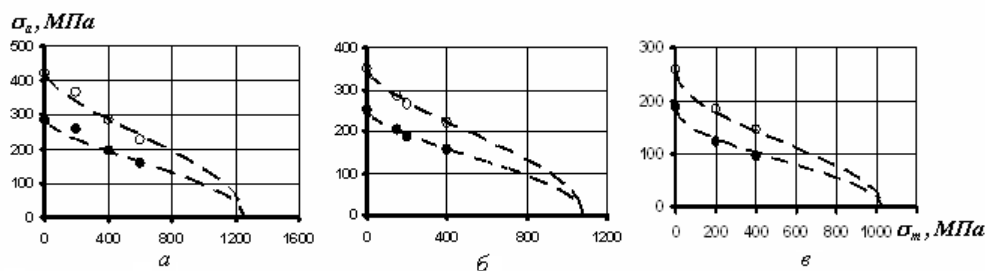


Рис. 3

Диаграммы предельного состояния в этих условиях нагружения представляют собой зависимости амплитуд циклических напряжений  $\sigma_a$  от статической компоненты  $\sigma_m$  по параметру числа циклов до разрушения  $n_R$ . Форма диаграмм предельных амплитуд напряжений в этом случае является слегка вогнутой или близка к линейной.

Таблица 3

Марка сплава	Температура $\theta$ , °С	Предел длительной прочности $\sigma_{дл}$ , МПа, при $t$ , час		Относительное удлинение $\delta$ , %	Амплитуда напряжения $\sigma_n$ , МПа, при $n_R$ , цикл		Коэффициент $\xi$
		30	100		$3,78 \cdot 10^6$	$1,25 \cdot 10^7$	
ЭП109	900	301	265	3,0	360	326	2,46
ЖСЗДК	850	428	378	3,5	267	242	1,15
ЖС6У	900	393	206	1,0	231	207	0,98

Расчеты предельного состояния при температурах, превышающих  $0,55 - 0,60 \theta_{пл}$ , проведены применительно к сплавам ЭП109 (а), ЖСЗДК (б) и ЖС6У (в) также при вышеуказанных условиях нагружения. Результаты расчетов (линии), выполненные по уравнению (2) с использованием коэффициентов, приведенных в табл. 3, сопоставлены на рис. 4 с экспериментальными данными (точки) для долговечностей  $n_R = 3,78 \cdot 10^6$  (○) и  $1,25 \cdot 10^7$  (●) циклов, которым соответствуют значения длительной прочности при  $t = 30$  и  $100$  час.

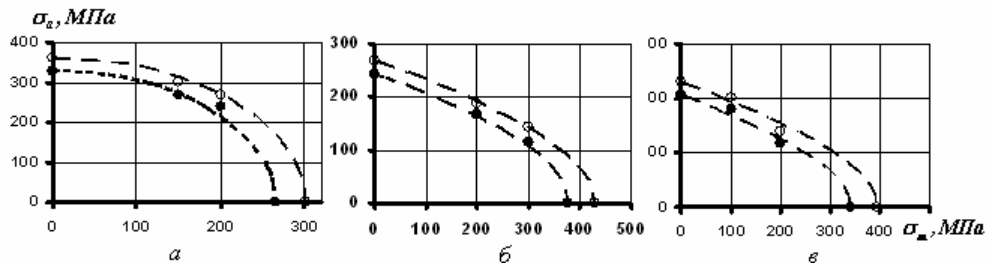


Рис. 4

Диаграммы предельного состояния в данном диапазоне температур также отражают зависимости амплитуд циклических напряжений  $\sigma_a$  от статической компоненты  $\sigma_m$  по параметру числа циклов до разрушения  $n_R$ . Для этих температурных условий форма диаграмм предельных амплитуд напряжений является выпуклой.

Используя экспериментальные данные применительно к многоцикловому асимметричному нагружению, выполнены расчет и построение обобщенных диаграмм предельного состояния, под которыми понимается такое состояние, которое задается в нормированной системе координат в форме зависимостей, связывающих относительные значения разрушающих напряжений, инвариантных по отношению к числу циклов до разрушения  $n_R$ .

Расчеты обобщенного предельного состояния исследуемого класса материалов при температурах менее  $0,55 - 0,60$  температуры плавления осуществляются с использованием зависимости

$$\sigma_a = \frac{2\sigma_n}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi \right]. \quad (3)$$

Результаты расчетов предельного состояния при асимметричном нагружении жаропрочных никелевых сплавов ЭИ867 (а), ЭП109 (б) и ЖСЗДК (в) при температурах ниже  $0,55 - 0,60 \theta_{пл}$  сопоставлены с экспериментальными данными (точки) на рис. 5 для долговечности  $n_R = 1,25 \cdot 10^6$  (○) и  $10^7$  (●) циклов в виде зависимости  $\sigma_a / \sigma_n$  от отношения  $\sigma_m / \sigma_B$  (для сплава ЭП109 точки для обеих долговечностей совпали). Экспериментальные результаты достаточно удовлетворительно описывают выполненный расчет обобщенных диаграмм предельного состояния.

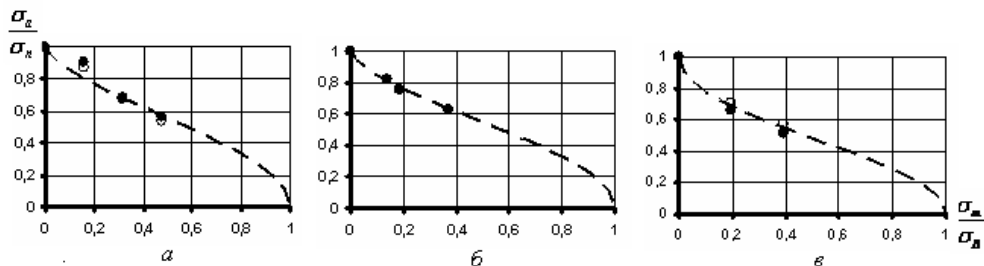


Рис. 5

Аналогичные расчеты обобщенных диаграмм предельного состояния жаропрочных никелевых сплавов ЭП109 (а), ЖСЗДК (б) и ЖС6У (в) выполнены применительно к температурам, превышающим  $0,55 - 0,60 \theta_{пл}$ , с использованием зависимости

$$\sigma_a = \frac{2\sigma_n}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{пл}} \right)^\xi \right]. \quad (4)$$

Результаты расчетов в виде соответствующих диаграмм (линии) представлены на рис. 6 в сопоставлении с результатами экспериментальных исследований (точки) в виде зависимости  $\sigma_a / \sigma_n$  от отношения  $\sigma_m / \sigma_{dl}$ . Обозначения на графиках соответствуют принятым на рис. 4. В данном случае также получено хорошее согласование результатов расчета и эксперимента.

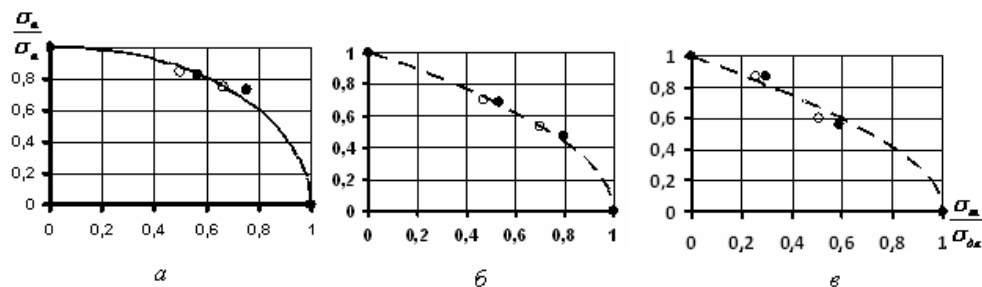


Рис. 6

Характерной особенностью обобщенных диаграмм предельного состояния является то обстоятельство, что они отражают как амплитуды напряжений разрушившихся образцов, так и неразрушившихся, в широком диапазоне изменения статической компоненты цикла напряжений.

Такая форма записи диаграмм позволяет при необходимости, используя вышеприведенные зависимости, рассчитывать предельное состояние исследуемого материала для любой долговечности в рамках как разрушающих, так и неразрушающих амплитуд напряжений, т.е. определять в последнем случае значения пределов выносливости. Для расчета предельных амплитуд напряжений необходимо, задаваясь значениями статической составляющей  $\sigma_m$ , воспользоваться значениями амплитуды напряжений  $\sigma_n$  при симметричном цикле нагружения применительно к рассчитываемой долговечности, значениями предела кратковременной прочности  $\sigma_B$  (для случая  $\theta < 0,55 \dots 0,60 \theta_{пл.}$ ) или предела длительной прочности  $\sigma_{dl}$  (для случая  $\theta > 0,55 \dots 0,60 \theta_{пл.}$ ) и показателем степени диаграммы обобщенного предельного состояния.

### 5. Обсуждение результатов.

Эффективность решения задач предельного состояния жаропрочных никелевых сплавов с использованием моделей предельного состояния в форме степенных трансцендентных функций обоснована примерами решения задач по расчету предельного состояния в широком диапазоне температур.

Расчет выполнен применительно к многоцикловому асимметричному нагружению растяжением – сжатием. Результаты расчета сопоставлены с экспериментальными данными. Их анализ, как свидетельствуют данные, приведенные на рисунках, продемонстрировал вполне удовлетворительное согласование данных расчета с результатами экспериментов как применительно к умеренным температурам (менее  $0,55 - 0,60 \theta_{пл.}$ ), так и более высоким.

Максимальная погрешность расчета предельных диаграмм не превышает 15%. При этом лучшее согласование расчета с экспериментом применительно к первому диапазону температур получено при использовании выражения (2), что характерно для малопластичных материалов, к которым относятся исследуемые жаропрочные никелевые сплавы. При высоких температурах достаточно хорошее согласование расчета с экспериментом при прогнозировании предельного состояния обеспечивает использование как модели (1), так и модели (2).

Анализ выполненных расчетов предельного состояния ряда жаропрочных никелевых сплавов – деформируемых (ЭИ867, ЭП109) и литейных (ЖСЗДК, ЖС6У) свидетельствует о том, что форма зависимости предельного состояния определяется уров-



нем температуры. При относительно невысоких температурах (менее  $0,55 - 0,60 \theta_{пл}$ ) диаграммы предельного состояния как деформируемых, так и литейных сплавов близки к линейной зависимости между предельными напряжениями – циклической и статической компонентами цикла напряжения (см. рис. 3). В диапазоне температур, превышающих эту границу, диаграммы предельного состояния и деформируемых, и литейных жаропрочных никелевых сплавов являются выпуклыми (см. рис. 4), что определяется влиянием температуры и отражается на значениях показателя степени в соответствующих уравнениях. Отметим также, что в первом диапазоне температур диаграммы предельного состояния для разных долговечностей по оси абсцисс сходятся в одной точке, определяемой предельной характеристикой конкретного сплава – пределом кратковременной прочности  $\sigma_B$ . Во втором диапазоне температур для каждой долговечности значение диаграммы предельного состояния при  $\sigma_a = 0$  определяется величиной предела длительной прочности  $\sigma_{дл}$  при соответствующих долговечности и температуре.

В процессе исследований установлено также, что интенсивность структурных изменений жаропрочных никелевых сплавов в связи с температурным воздействием не зависит от вида нагружения (растяжение – сжатие или круговой изгиб) в процессе усталостных испытаний и, следовательно, в равной степени сказывается на особенностях изменения в этих условиях характеристик сопротивления усталости, в том числе на диаграммах предельных амплитуд напряжений.

#### **Заключение.**

Решение задач прогнозирования предельного состояния жаропрочных никелевых сплавов, применяемых в качестве конструкционных материалов в транспортном и стационарном энергомашиностроении в широком диапазоне температур, продемонстрировало эффективность использования для этих целей моделей предельного состояния, основанных на степенных трансцендентных функциях, как одного из возможных подходов надежной оценки их предельного состояния как при нормальной, так и при высоких температурах. Модели охватывают широкий спектр форм связи циклических и статических напряжений при минимальном объеме трудоемких экспериментальных исследований посредством варьирования показателя степени модели. В качестве базовых экспериментов при определении параметров модели использованы стандартные испытания образцов исследуемых материалов на усталость при симметричном цикле нагружения, на кратковременную прочность и единичный идентифицирующий эксперимент, например, при отнулевом цикле нагружения для определения показателя степени модели.

**РЕЗЮМЕ.** Досліджено граничний стан зразків жароміцних нікелевих сплавів за умов комбінованої дії статичного та циклічного навантажень в широкому діапазоні температур. Розв'язок побудовано з використанням моделі граничного стану, що встановлює залежність між руйнівними граничними напруженнями у формі ступеневі трансцендентної функції. Результати розрахунків апробовано експериментально на прикладі суцільних призматичних зразків.

1. Голуб В.П., Крижановский В.И. К оценке предельного состояния материалов при асимметричном многоцикловом нагружении // Пробл. прочности, 1994. – № 4. – С. 3 – 15.
2. Голуб В.П., Погребняк А.Д. Высокотемпературное разрушение материалов при циклическом нагружении. – К.: Наук. думка, 1994. – 228 с.
3. Голуб В.П., Крижановский В.И., Погребняк А.Д. Метод расчета усталостной прочности металлических и композитных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении // Прикл. механика. – 2004. – 40, № 11. – С. 106 – 116.
4. Голуб В.П., Крижановский В.И., Погребняк А.Д., Кочеткова Е.С. Усталостная прочность металлических и композитных материалов при асимметричном растяжении – сжатии // Прикл. механика. – 2006. – 42, № 1. – С. 48 – 58.

5. Голуб В.П., Погребняк А.Д., Кочеткова Е.С. Усталостная прочность металлических и композитных материалов при асимметричном многоцикловом изгибе // Прикл. механика. – 2006. – **42**, № 5. – С. 26 – 36.
6. Голуб В.П., Погребняк А.Д., Кочеткова Е.С. Усталостная прочность металлов и композитов при асимметричном многоцикловом кручении // Прикл. механика. – 2008. – **44**, № 2. – С. 19 – 28.
7. Регульский М.Н., Погребняк А.Д., Пельх В.Н. Предельное состояние жаропрочных никелевых сплавов при многоцикловом асимметричном нагружении // Тр. Межд. н/т конф. «Прочность материалов и элементов конструкций». – К., 2011. – С. 750 – 761.
8. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность // Руководство и справочное пособие / Под ред. С.В.Серенсена. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
9. Allen N.P., Forrest P.G. The Influence of Temperature on the Fatigue of Metals // Proc. of the Int. Conf. on Fatigue of Metals. – London, 1956. – P. 327 – 340.
10. Betteridge W. The Nimanic Alloys. – London: Edward Arnold (publisher) LTD, 1959. – 382 p.
11. Forrest P.G. Fatigue of Metals. – London – New York – Paris: Pergamon Press Ltd, 1962. – 426 p.
12. Gough H.J. The Fatigue of Metals. – London: Scott, Greenwood & Son, 1924. – 304 p.
13. Heywood R.B. Designing against Fatigue. – London: Chapman and Hall Ltd. – 1962. – 504 p.
14. Kennedy A.J. Processes of Creep and Fatigue in Metals. – Edinburgh and London: Oliver and Boyd, 1962. – 312 p.
15. Kuzin N.O. A Mathematical Model Describing the Variation in Material Properties // Int. Appl. Mech. – 2015. – **50**, N 4. – P. 474 – 479.
16. Pogrebnyak A.D. Solving Fatigue Problems for Reversed and Repeated Biaxial Combined Stress Cycles // Int. Appl. Mech. – 2016. – **52**, N 3. – P. 315 – 325.
17. Sims C.T., Hagel W.C. The Superalloys – New York: A. Wiley – Interscience Publication, 1972. – 458 p.
18. Weibull W. Fatigue Testing and Analysis of Results. – London: Pergamon Press, 1961. – 276 p.
19. Wells C., Sullivan C. Fatigue at High Temperatures // ASTM STP 459. – Philadelphia, 1969. – P. 39 – 51.

Поступила 07.09.2016

Утверждена в печать 10.10.2017