

Прогнозирование длительной прочности металлических материалов различных классов

В. В. Кривенюк, Д. С. Авраменко, Д. Р. Скляревский

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

На основе метода базовых диаграмм выполнен анализ более 200 диаграмм длительной прочности дисперсно-упрочненных сплавов никеля и алюминия. При использовании лишь двух близких численных значений одной постоянной достигнута практически приемлемая точность прогнозирования длительной прочности.

Ключевые слова: длительная прочность, метод, прогнозирование, жаропрочные сплавы

Ранее [1, 2] разработан метод прогнозирования длительной прочности металлических материалов – метод базовых диаграмм (МБД), основанный на базовых диаграммах, описываемых общим неизменным уравнением

$$\lg \sigma'_t = \lg \sigma_1 - \frac{3,6 - \lg \sigma_1}{12} (\lg t + 0,1 \lg^2 t), \quad (1)$$

где σ'_t – текущее напряжение по базовой диаграмме, МПа; σ_1 – напряжение, которое вызывает разрушение в течение одного часа, МПа; t – долговечность, ч.

На рис. 1 в качестве примера приведен ряд рассчитанных с помощью уравнения (1) базовых диаграмм для произвольно заданных значений σ_1 , при этом величина σ_1 определяет ординату точки пересечения соответствующей базовой диаграммы с осью ординат в системе координат $\lg \sigma_t - \lg t$.

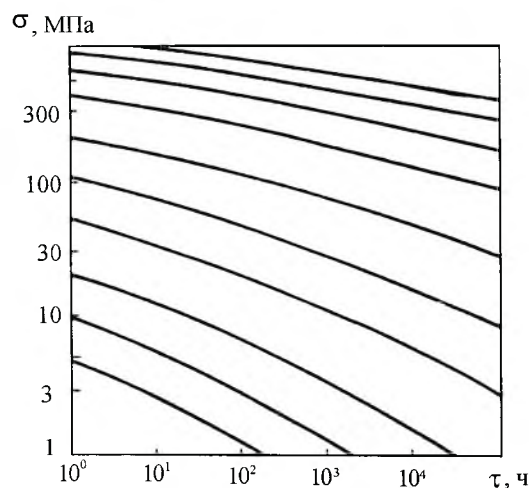


Рис. 1. Базовые диаграммы длительной прочности.

МБД сначала используется для предварительного анализа особенностей длительного разупрочнения исследуемых материалов, затем – для прогнозирования длительной прочности на основе результатов такого анализа, который производится, например, следующим образом.

Предположим, что в каждой строке таблицы представлены экспериментальные данные [3] о диаграмме длительной прочности, которая состоит из двух участков: первый – в интервале 10...100 ч, второй – 100...1000 ч. Таким образом, располагаем данными о 18 участках девяти диаграмм длительной прочности. Следует подчеркнуть, что при использовании МБД каждый участок рассматривается отдельно. Для границ каждого такого участка вводятся общие условные обозначения: координатами левой начальной точки являются напряжение $\sigma_{\alpha t}$ и время αt , правой конечной точки – соответственно σ_{t_3} и t_3 при отношении $\alpha t / t_3 \approx 10$. При рассмотренном табличном представлении данных это отношение равно 10. Однако при анализе непосредственно экспериментальных результатов оно должно быть близким к 10. Тем не менее использование действительных значений от 7 до 30 сравнительно мало влияет на результаты прогнозирования. Следовательно, согласно данным таблицы, для первого участка при $T = 900^\circ\text{C}$ вводятся следующие обозначения: $\sigma_{\alpha t} = \sigma_{10} = 470$ МПа, $\sigma_{t_3} = \sigma_{100} = 370$ МПа; для второго участка – $\sigma_{\alpha t} = \sigma_{100} = 370$ МПа, $\sigma_{t_3} = \sigma_{1000} = 340$ МПа и т.д.

Длительная прочность сплава ЖС6У [2] и результаты обработки по МБД

| $T_{\text{исп}},$ °C | Вероятность неразрушения | $\sigma_{10},$ МПа | β_0 | $\sigma_{10^2},$ МПа | $\Delta_{10-10^2},$ % | β_1 | $\sigma_{10^3},$ МПа | $\Delta_{10^2-10^3},$ % | $\Delta_{10-10^3},$ % |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|-------------------------|--------------------------|-----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 900 | 0,50 | 470 | 1,11 | 370 | 9,5 | 1,58 | 340 | 2,9 | 7,9 |
| | 0,90 | 440 | 1,05 | 350 | 11,1 | 1,77 | 210 | 19,2 | 3,7 |
| | 0,99 | 425 | 1,14 | 330 | 8,9 | 1,84 | 190 | 13,7 | 1,6 |
| 1000 | 0,50 | 250 | 1,17 | 180 | 11,1 | 1,27 | 115 | 10,0 | 20,9 |
| | 0,90 | 225 | 1,16 | 160 | 11,9 | 1,18 | 105 | 14,0 | 25,7 |
| | 0,99 | 215 | 1,20 | 150 | 10,6 | 1,25 | 95 | 11,6 | 24,2 |
| 1100 | 0,50 | 180 | 1,25 | 120 | 10,0 | 1,63 | 58 | 8,6 | 7,4 |
| | 0,90 | 160 | 1,51 | 95 | 0,2 | 1,61 | 45 | 7,8 | 5,6 |
| | 0,99 | 140 | 1,41 | 85 | 4,1 | 1,58 | 36 | 6,9 | 5,6 |

При таких предпосылках для анализа закономерностей длительного разрушения рассчитываются характеристики отклонений каждого отдельного участка экспериментальной диаграммы от соответствующего участка базовой диаграммы с помощью формулы

$$\beta_3 = \frac{\sigma_{\alpha t} - \sigma_{t_3}}{\sigma_{\alpha t} - \sigma'_t} = \frac{\Delta\sigma_{t_3}}{\Delta\sigma'_t}, \quad (2)$$

где $\Delta\sigma_{t_3}$ и $\Delta\sigma'_t$ – соответственно понижения длительной прочности по выходящим из одной точки участкам экспериментальной и базовой диаграмм за одно и то же время от αt до $t = t_3$.

Значения β_3 для каждого из рассмотренных участков могут быть рассчитаны по формуле (2) после оценки величины σ'_t . Оценка последней производится по формуле (1) после подстановки вместо σ'_t и t значений σ_{at} и at , что дает уравнение с одним неизвестным. Решение этого уравнения позволяет определить значение σ_1 , которое задает базовую диаграмму, проходящую через точку с указанными координатами σ_{at} и at . Наконец, при установленном σ_1 с помощью формулы (1) вычисляется искомое σ'_t .

Полученные таким образом значения β_3 для всех 18 участков девяти экспериментальных диаграмм приведены в таблице, информация о каждом участке в системе координат $\beta_3 - \sigma_{at}$ – на рис. 2. Это качественно новое представление длительной прочности, которое, в частности, создает благоприятные условия для эффективной систематизации известных экспериментальных результатов.

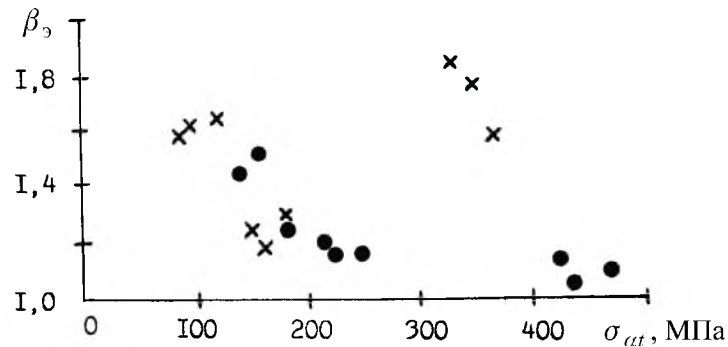


Рис. 2. Длительная прочность сплава ЖС6У.

Прогнозирование с помощью рассматриваемого МБД искомого значения σ_t по исходному σ_{at} производится по формуле

$$\sigma_t = \sigma_{at} - \beta(\sigma_{at} - \sigma'_t) = \sigma_{at} - \beta\Delta\sigma'_t, \quad (3)$$

где β – обобщенный показатель отклонений отдельных участков экспериментальных диаграмм от соответствующих участков базовых диаграмм. Заметим, что формула (3) получена из (2) после замены экспериментального значения σ_{t3} расчетным σ_t при $t = t3$.

Из таблицы следует, что экспериментально определенные значения β_3 (β_0, β_1) изменяются от 1,05 до 1,84. Тем не менее использование в формуле (3) общего постоянного значения $\beta = 1,5$, установленного ранее [4] для сплавов, к которым относится и сплав ЖС6У, привело к сравнительно низким значениям погрешностей прогнозирования

$$\Delta = \frac{\sigma_t - \sigma_{t3}}{\sigma_{t3}} \cdot 100\% \quad (4)$$

и среднеквадратической погрешности

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}. \quad (5)$$

Одна из задач систематизации известных экспериментальных данных с помощью МБД и заключается в определении отдельных численных значений β , которые для больших массивов экспериментальных данных обеспечивали бы

$$S \leq 10 \dots 12\%. \quad (6)$$

Соответственно, цель настоящих исследований – предварительно выяснить, насколько могут быть общими такие численные значения β для различных классов металлических материалов.

Ранее выполненный анализ экспериментальных данных показал, что для сплавов с твердорастворным упрочнением в практически важном интервале температур наиболее вероятными являются значения $\beta = 1,0 \dots 1,3$, а для дисперсно-упрочненных – $1,4 \dots 1,7$. Указанный интервал значений объясняется в основном увеличением β по мере возрастания длительности нагружения. При ориентировании на большие длительности нагружения необходимо выделять четыре временных интервала $10^3 \dots 10^4$; $10^4 \dots 10^5$; $10^5 \dots 2 \cdot 10^5$; $2 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^5$ ч с введением для каждого из них соответствующих значений $\beta = \beta_1$; $\beta = \beta_2$; $\beta = \beta_3$ и $\beta = \beta_4$. В первом приближении установлено, что между значениями β существует взаимосвязь вида

$$\beta_{n+1} = \beta_n + \Delta\beta_{n+1}. \quad (7)$$

Проведенные исследования позволили предположить, что наиболее вероятным является соотношение

$$\Delta\beta_{n+1} = 0,2. \quad (8)$$

Кроме того, установлено, что при

$$\beta - 0,3 \dots 0,4 < \beta_3 < \beta + 0,3 \dots 0,4 \quad (9)$$

прогнозирование длительной прочности по МБД с использованием одного численного значения β приводит к выполнению (6).

Далее будем ориентироваться на условие (6), поскольку сравнение известных различных методов, в частности [5], показывает, что использование лучших в мире параметрических методов часто приводит к более высоким значениям S по сравнению с указанными в (6).

Исходные положения и расчетные оценки позволяют перейти к анализу особенностей длительного разупрочнения различных классов материалов и обоснованию оптимального варианта прогнозирования с учетом результатов такого анализа. Последний проводится на основе учета комплекса характеристик β , β_3 ; Δ , S . При этом базовые диаграммы в сочетании с характеристиками β определяют общую закономерность, а разности $\beta - \beta_3$ – отклонения от нее. Величинами таких отклонений определяются значения Δ и S . Отдельные значения β устанавливаются в основном для таких интервалов изменения β_3 , при которых выполняется условие (6). Перейдем теперь непосредственно к анализу различных комплексов экспериментальных данных.

По вышеописанному МБД обрабатывались практически все (как экспериментальные, так и расчетные) данные [6] о длительной прочности никелевых жаропрочных сплавов с интерметаллидным упрочнением. Однако при этом все они рассматривались как экспериментальные. Каждая кривая длительной прочности анализировалась в виде независимых отдельных участков. Различные участки относились к интервалам долговечностей 10...1000, 1000...10000 и 10000...100000 ч. Общее число участков составило 132. Задача обобщенного анализа такой информации с помощью МБД заключается в нахождении единственного численного значения β , которое обеспечивает минимальное значение S , и решается следующим образом.

Для прогнозирования правой границы σ_t отдельного участка экспериментальной диаграммы по значению σ_{ct} с помощью формулы (3) необходимо знать лишь значение β . Поскольку оно неизвестно, задается произвольно ряд значений: 1,8; 1,7; 1,6; ...; 0,5; 0,4. При каждом таком отдельном значении β , например при $\beta = 1,8$, прогнозируются значения σ_t для всех 132 участков, рассчитываются погрешности прогнозирования по формуле (4) и величина S – по формуле (5). Затем значение β уменьшается на один шаг, равный 0,1, и расчет повторяется. После получения ряда значений S , соответствующих конкретным значениям β , строится зависимость $S = f(\beta)$. Такие зависимости, как следует из рис. 3, имеют вид параболы. Минимальное значение S четко определяет искомое β . При $\beta = 1,5$ с помощью МБД получили $S = 14,6\%$. После исключения из рассмотрения двух случаев максимальных значений погрешностей прогнозирования величина S уменьшилась до 7,9%, что привело к выполнению условия (6). Результаты расчетов можно считать довольно неожиданными, так как при обычной обработке столь больших объемов данных используется до 50 и более численных значений постоянных. В связи с этим целесообразно увеличить объемы соответствующей обработки экспериментальных данных.

Рассмотрим аналогично приведенные в [7] данные исследователей США и Великобритании о длительной прочности жаропрочных никелевых сплавов с интерметаллидным упрочнением. Это данные лишь о σ_{100} и σ_{1000} при пяти уровнях температур для 30 сплавов. Установлено, что прогнозирование по МБД при общем значении $\beta = 1,3$ и числе исследуемых участков $n = 155$ привело к $S = 14,2\%$, а после исключения пяти случаев максимальных значений Δ величина S уменьшилась до 10,9%, что согласуется с условием (6).

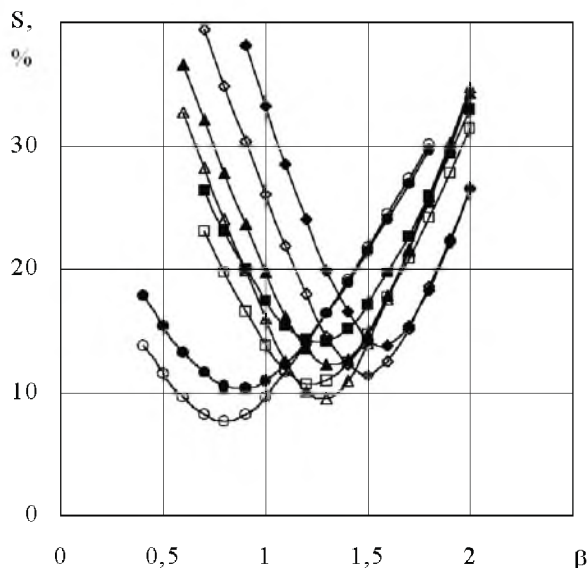


Рис. 3. Зависимость среднеквадратической погрешности прогнозирования длительной прочности от характеристики β для сплавов на основе никеля (отечественные (\blacklozenge , \diamond); NRIM (\blacktriangle , \triangle); США, Великобритания (\blacksquare , \square)) и алюминия (\bullet , \circ). (Темные точки – по всем данным; светлые – после исключения 4-5 случаев.)

Выше анализировались данные о длительной прочности либо при малых значениях долговечности, либо полученные в результате прогнозирования для долговечностей 10^5 ч. Поэтому целесообразно было дополнительно исследовать данные [8–11] экспериментов длительностью до 10^5 ч также для жаропрочных никелевых сплавов с интерметаллидным упрочнением.

Аналогично установлено, что при $\beta = 1,3$ и $n = 165$ величина S оказалась равной 12,4%. После исключения из рассмотрения трех случаев максимальных значений погрешностей величина S уменьшилась до 10,2%.

Выполненная обработка МБД данных о длительной прочности никелевых сплавов позволяет четко констатировать преимущественное проявление довольно общих закономерностей, определяемых изменяющимися в узких пределах значениями β при выполнении условия (6). Видна также существенная роль отклонений, незначительное число которых ($\sim 3...5\%$) может существенно сказываться на выполнении условия (6).

С помощью МБД обрабатывались практически все данные о длительной прочности сплавов алюминия [12, 13]. Прогнозирование проводилось при $\beta = 0,9$. В результате обработки 135 участков диаграмм длительной прочности получено $S = 10,3\%$. Исключение из рассмотрения пяти случаев максимальных значений Δ привело к понижению S до 8,2%.

При исследовании физического характера с целью обнаружения и анализа общего и особенного в закономерностях пластического деформирования и длительного разрушения используется зависимость [14]

$$\frac{\dot{\varepsilon}_y}{D} = A \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n, \quad (10)$$

где $\dot{\varepsilon}_y$ – скорость на установившейся стадии ползучести (во многих моделях принимается $\dot{\varepsilon}_y = 1/t_p$, что дает возможность использовать эту зависимость для анализа закономерностей длительной прочности, t_p – долговечность); E – модуль упругости; D – коэффициент самодиффузии; A и n – постоянные.

Нормирование по величине модуля упругости в соответствии с зависимостью (10) привело к повышению β для сплавов алюминия от 0,9 до 1,3. Этот частный результат свидетельствует в какой-то мере о полезности взаимного использования методов исследования эмпирического характера, к которым можно отнести на начальной стадии МБД, и физического. В подтверждение необходимости такого использования целесообразно обратить внимание на постоянные A и n .

Последние могут существенно различаться для участков диаграмм, относящихся к разным температурно-силовым областям согласно общепринятой концепции превалирующего механизма деформации или разрушения [15, 16]. Часто экспериментальных данных для уточнения соответствующих границ недостаточно, поэтому зависимость (10) при явной ее полезности применяется сравнительно редко. Вместе с тем выявление и конкретизация наиболее общих закономерностей, например с помощью базовых диаграмм и устанавливаемых значений β , достаточно общая классификация отклонений $\beta - \beta_3$ могут в значительной мере способствовать повышению эффективности использования как известных экспериментальных данных, так и зависимости (10).

Наконец, следует заметить, что между характеристиками β , β_3 , с одной стороны, и показателями длительной прочности, т.е. показателями степени в зависимости $t_p \sim \sigma^m$, с другой – существует связь, и следовательно, может производиться их взаимный пересчет. Поэтому характеристики β_3 , также как и m , определяют действующие механизмы деформирования и разрушения. Вместе с тем использование МБД, оперирование характеристиками β и β_3 открывают новые возможности для уточнения общего и особенного в закономерностях длительного разрушения разных материалов. Рассмотрим в этой связи более подробно приведенные выше данные о длительной прочности различных классов материалов, обработанные МБД (рис. 3–5).

При этом основная задача заключается в обосновании целесообразности и возможности осуществления более детальной конкретизации общего и особенного в закономерностях длительного разрушения различных классов материалов на основе МБД. Соответствующие уточнения должны сводиться к выяснению причин, определяющих отклонения от общих закономерностей в виде разностей $\beta - \beta_3$. При этом логично в первую очередь акцентировать внимание на максимальных отклонениях, определяемых максимальными значениями разностей $\beta - \beta_3$ или максимальными значениями погрешностей прогнозирования Δ .

Из рис. 3 следует резкая зависимость S от β , что позволяет четко устанавливать характеристики β и выявлять общее в закономерностях длительного разупрочнения. В свою очередь, это важно в дальнейшем для констатации отклонений от общего на основе разностей значений $\beta - \beta_3$. Последствия таких максимальных отклонений удобно оценивать по значениям погрешностей прогнозирования.

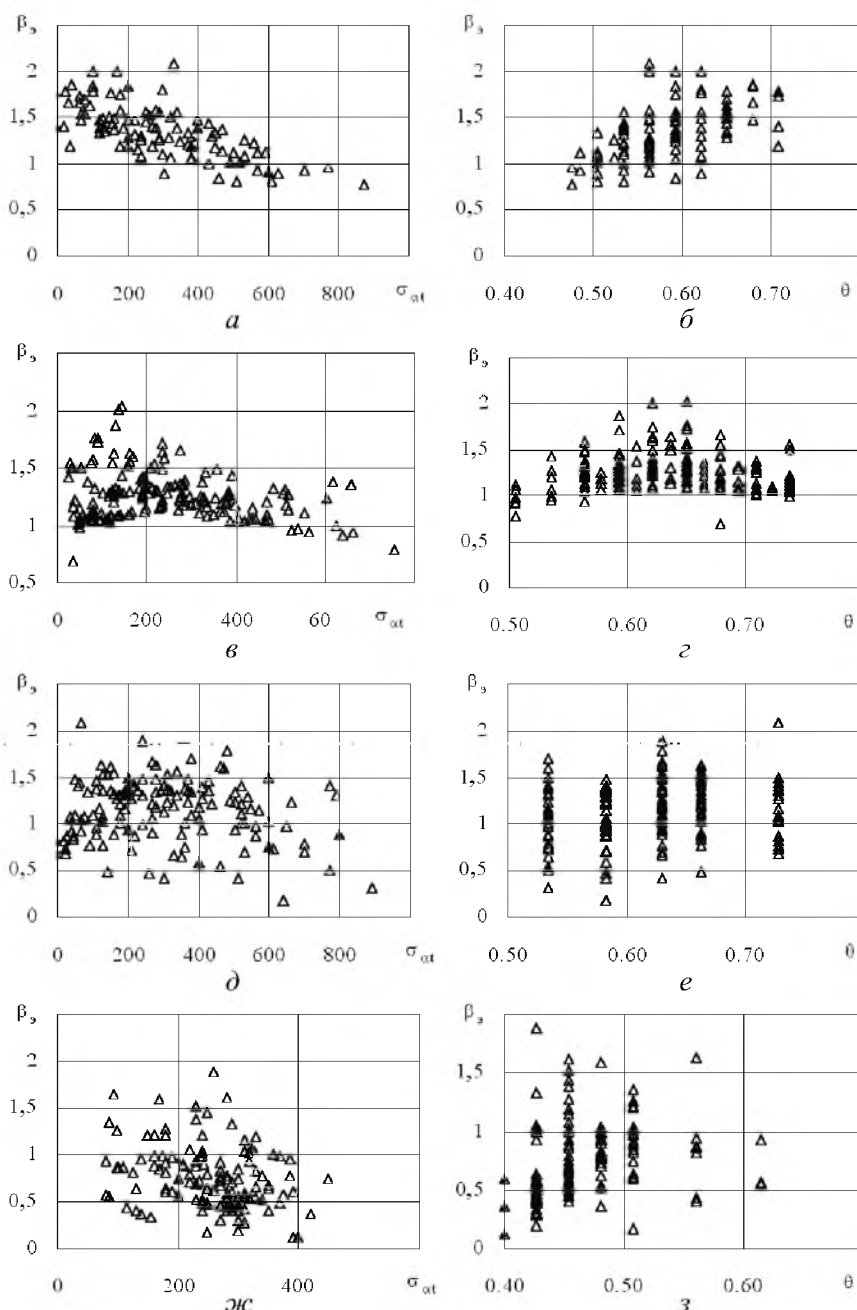


Рис. 4. Зависимость характеристики β_3 от напряжения ($a, в, д, ж$) и относительной температуры ($б, г, е, з$) для сплавов на основе никеля ($a-e$) и алюминия ($ж, з$).

Зависимости среднеквадратической погрешности от произвольно выбираемых значений β приведены на рис. 4 при исключении из рассмотрения нескольких случаев максимальных значений погрешностей. Всего было рассмотрено 555 участков различных диаграмм длительной прочности, при этом исключено из рассмотрения 15 случаев, т.е. около 3% общего числа, что, как отмечалось выше, привело к существенному уменьшению величины S и обеспечению выполнения условия (6).

Рассмотренные выше оценки, а также приведенные на рис. 3 данные свидетельствуют об изменении β в интервале 1,3...1,5. Увеличение β от 1,3 до 1,5 может быть обусловлено разными причинами: отмеченной возможной зависимостью от длительности нагружения, игнорированием случаев максимальных значений погрешностей, качеством производства сталей и сплавов и т.п. Тем не менее выполненные исследования в целом позволяют утверждать следующее.

Для сталей и сплавов предварительно значения β могут устанавливаться на основании учета лишь типа упрочнения в соответствии с приведенными выше общими рекомендациями. Это позволяет по одному значению длительной прочности осуществлять прогнозирование на один порядок по логарифмической шкале времени при обеспечении точности на уровне возможностей лучших параметрических методов. Систематизация известных экспериментальных данных, в частности на основе представления их, как показано на рис. 3–5, может приводить к дальнейшему улучшению прогнозирования.

Из рис. 5 следует, что при высоких нагрузках и соответственно сравнительно низких температурах погрешности прогнозирования в основном небольшие. По мере понижения нагрузок и повышения температуры нагрева погрешности возрастают, особенно существенно при $\sigma_{ст} < 200$ МПа, что определяется значениями β_3 , которые приближаются к 1,7...2,0 согласно данным рис. 4.

Следовательно, необходимо довольно тщательно проанализировать факторы, которые в системе координат $\beta_3 - \sigma_{ст}$ предопределяют область $\sigma_{ст} < 100...200$ МПа и $\beta_3 > 1,7...2,0$. Важной составляющей такого анализа является систематизация известных экспериментальных данных. В этом отношении показателен следующий пример.

Рассмотрим данные стандарта ФРГ о длительной прочности стали GS-17 CrMoV 511, обработанные МБД. В стандарте приведены данные о длительной прочности σ_{10^4} , σ_{10^5} , $\sigma_{2 \cdot 10^5}$ при температурах 410, 420, ..., 600°C. При температуре 400°C указанные значения соответственно равны 479, 413, 395 МПа при $\beta_2 = 0,613$, $\beta_3 = 0,842$, с чем хорошо согласуется $\Delta\beta_3 = 0,2$. При температурах 580 и 600°C соответственно значения 107, 53, 36 МПа и 86, 30, 14 МПа приводят к $\beta_2 = 1,562$; $\beta_3 = 2,535$ и $\beta_2 = 1,92$ и $\beta_3 = 3,757$. Заметим, что в выполненных ранее многочисленных исследованиях при обработке непосредственно экспериментальных данных не встречались значения $\beta_3 > 2,2...2,3$. В рассмотренном примере значения β_3 значительно превышают отмеченную границу максимальных значений 2,2...2,3. Это свидетельствует о важности систематизации надежных экспериментальных данных, полученных при испытаниях большой длительности.

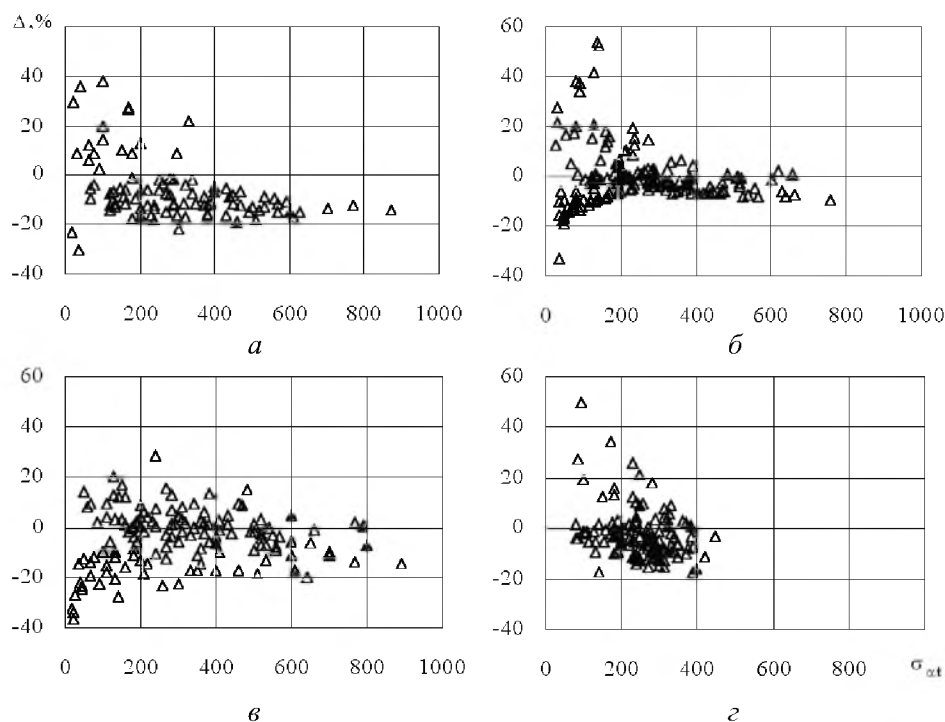


Рис. 5. Зависимости погрешностей прогнозирования от напряжения для сплавов на основе никеля (а-б) и алюминия (в-г).

Согласно данным рис. 5, большая часть значений Δ имеет отрицательный знак. Это означает, что прогнозируемые значения ниже экспериментальных. Ясно, что этот вариант лучше в сравнении с положительными значениями, когда прогнозируемые значения длительной прочности выше экспериментальных. Из описанного способа определения значений β следует, что большое число отрицательных погрешностей объясняется малым числом положительных погрешностей, однако их значения более высокие из-за высоких значений β_3 (рис. 4,а,в,д,ж). Повышение значений β_3 прежде всего определяется температурой, о чем можно судить по данным рис. 4,б,г при гомологических температурах $\theta = 0,58...0,7$. В меньшей мере это проявляется по данным рис. 4,е из-за сравнительно малых длительностей нагружения (до 1000 ч), когда роль временного фактора еще проявляется сравнительно мало. Для сплавов алюминия максимальные значения β_3 установлены при более низких гомологических температурах ($\theta = 0,4...0,5$).

Выполненные ранее исследования показывают, что при дисперсном упрочнении сплавов железа экспериментально обнаруженные области в системе координат $\beta_3 - \sigma_{ст}$ практически такие же, как и на рис. 4,а и в, за исключением существенно большего числа максимальных значений β_3 и соответственно в меньшей мере выраженных конкретных значений β . Сравнительный анализ приводит к следующему объяснению причин такого положения.

Сравнительно большое число значений β_{ε} и $\Delta\beta_n$ при исследовании свойств жаропрочных сталей обусловлено значительно меньшей их легированностью по сравнению с жаропрочными никелевыми сплавами. Если определяющим является легирование лучших конструкционных сталей 1% молибдена, то в жаропрочные никелевые сплавы вводится до 10% и более вольфрама, молибдена и других элементов. Последнее и определяет повышенную прочность межзеренных границ, роль которых является определяющей в зарождении и развитии поврежденности при длительном высокотемпературном нагружении.

При этом заметим, что для никелевых сплавов исследовались диаграммы длительной прочности во временном интервале в основном до 10^4 ч. Для жаропрочных сталей рассматривается более широкий временной интервал. Не исключено, что при увеличении длительности работы никелевых сплавов до 10^5 ч и более склонность к поврежденности проявится в большей мере.

Следует также подчеркнуть, что на рис. 4,а и д представлены данные, полученные для сплавов более 30 лет назад. Со временем качество производства улучшается, что отражается в уменьшении рассеяния значений исследуемых характеристик, о чем в какой-то мере можно судить по данным рис. 4,в.

И все же настоящее и другие исследования свидетельствуют о том, что закономерности длительного разрушения во многом определяются прежде всего типом упрочнения. Например, исследование свойств тугоплавких материалов [2] показывает, что при твердорастворном упрочнении значения β изменяются в основном в пределах 1,0...1,3, а согласно исследованиям свойств жаропрочных сталей в целом значения β для дисперсно-упрочненных сталей могут изменяться в пределах 1,3...1,7. В настоящем сообщении преимущественно констатируется изменение значений β в более узком интервале 1,3...1,5.

Резюме

На основі методу базових діаграм виконано аналіз більше 200 діаграм тривалої міцності дисперсно-зміцнених сплавів нікеля й алюмінія. При використанні лише двох близьких числових значень однієї постійної досягнуто точність прогнозування тривалої міцності на рівні можливостей кращих методів.

1. Писаренко Г. С., Кривенюк В. В. Новый подход к прогнозированию длительной прочности металлов // Докл. АН СССР. Механика. – 1990. – 312, № 3. – С. 558 – 562.
2. Кривенюк В. В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
3. Bulygin I. P., Timofeeva L. N., Golubovskii E. R. et al. Statistical analysis and prediction of the heat-resistance characteristics of cast alloys for gas turbine engines (GTE). – Strength Mater. – 1977. – N 11. – P. 57 – 62.

4. *Krivenyuk V. V., Zelenyuk E. E.* Determining some of the general features of long-term loss of strength of individual classes of heat-resistant materials. *Strength Mater.* – 1979. – N 5. – P. 34 – 37.
5. *Adamovich V. K., Fridman Ya. F., Revzyuk M. B., Stanyukovich A. V.* Comparison of methods employed to extrapolate long-time strength. – *Ibid.* – 1975. – N 11. – P. 26 – 29.
6. *Либерман Л. Я., Пейсихис М. И.* Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении: В 3 ч. – Л.: ЦКТИ, 1966. – Ч. 1, вып. 16. – 219 с.; Ч. 2. – 1966. – 244 с.; Ч. 3. – 1967. – 180 с.
7. *Химушин Ф. Ф.* Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1969. – 646 с.
8. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 19Cr–18Co–4Mo–3Ti–3Al–B // National research institute for metals (NRIM).* – Tokyo, 1993. – N 34B.
9. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 15.5Cr–2.5Ti–0.7Al–1Nb–7Fe // National research institute for metals (NRIM).* – Tokyo, 1992. – N 39A.
10. *Data sheets on the elevated – temperature properties of 15Cr–28Co–4Mo–2.5Ti–3Al // National research institute for metals (NRIM).* – Tokyo, 1989. – N 24B.
11. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 13Cr–4.5Mo–0.75Ti–6Al–2.3(Nb+Ta)–Zr–B // National research institute for metals (NRIM).* – Tokyo, 1990. – N 29B.
12. *Белов А. Ф., Добаикин В. И., Квасов Ф. И. и др.* Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник под общ. ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
13. *Альтман М. Б., Амбарцумян С. М., Аристова Н. А. и др.* Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы: Справочник под общ. ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1972. – 552 с.
14. *Шерби О. Д., Миллер К. Дж.* Комбинированный феноменологический и физический подход к описанию механического поведения кристаллических тел при высоких температурах // *Теор. основы инж. расчетов. Сер. Д.* – 1979. – № 4. – С. 92 – 101.
15. *Миллер К.* Ползучесть и разрушение / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1986. – 120 с.
16. *Ковпак В. И.* Прогнозирование жаропрочности металлических материалов. – Киев: Наук. думка, 1981. – 240 с.

Поступила 29. 06. 2000