

О взаимосвязи характеристик деформирования и прочности при кратковременном растяжении жаропрочных материалов

В. В. Кривенюк, Е. И. Усков, В. Р. Будинский

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

В результате анализа 124 диаграмм растяжения обоснована возможность их описания при варьировании характеристиками деформационного упрочнения и разупрочнения. При неизменных значениях пределов текучести и прочности взаимосвязанное пропорциональное изменение вышеуказанных характеристик позволяет получить ряд различных диаграмм растяжения. Для определения конкретной диаграммы растяжения необходимо учитывать предел текучести и предел прочности, а также деформацию, соответствующую последнему. Статистически установлено существование взаимосвязи между пределами прочности и текучести и упрочнением и практически ее полное отсутствие между этими параметрами и разупрочнением.

Ключевые слова: диаграммы растяжения, кратковременная прочность, предел текучести, предел прочности, ползучесть, упрочнение, разупрочнение.

Характеристики кратковременной прочности, определяемые по диаграммам растяжения (ДР), широко применяются при анализе закономерностей деформирования и разупрочнения металлических материалов при различных условиях нагружения [1–3]. Однако обоснование возможностей более полного использования данных о ДР и характеристиках кратковременной прочности является в настоящее время актуальным.

Следует отметить, что в большинстве случаев результаты, полученные при кратковременном растяжении, представляются в основном значениями таких характеристик, как предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_B , относительное удлинение δ и сужение ψ после разрушения. В данной работе акцентируется внимание на необходимости определения и дополнительного учета деформации ε' , при которой достигается предел прочности, а также уточняются и конкретизируются закономерности упрочнения и разупрочнения, взаимосвязь характеристик упрочнения h и разупрочнения r с характеристиками кратковременной прочности $\sigma_{0,2}$ и σ_B . Обосновывается в первом приближении целесообразность учета характеристик h и r при исследовании закономерностей ползучести.

Для описания процесса ползучести используется уравнение [4, 5]

$$\dot{\varepsilon}^{1-\gamma} \lg \dot{\varepsilon} = \left[\frac{\frac{\sigma_0}{\sigma'}}{\left(1 - \frac{r\varepsilon}{1+r\varepsilon} - \alpha\sigma_0 t^{1/3}\right) \left(1 + \frac{h}{\sigma_0^2} \varepsilon\right)^{n/2}} \right]^m, \quad (1)$$

где $\varepsilon, \dot{\varepsilon}$ – пластическая деформация при ползучести и ее скорость; h, r – характеристики деформационного упрочнения и разупрочнения; σ' – напряжение, при котором $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ ч}^{-1}$; σ_0 – исходное условное напряжение; t – текущее время; $\gamma = 0,1$; $n = 1$; α, m – постоянные при $T = \text{const}$.

Преобразуя выражение (1) с учетом некоторых упрощений и предположений, что при напряжении, равном пределу прочности, $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ ч}^{-1}$, при малых длительностях нагружения можно пренебречь временной поврежденностью и принять $\alpha = 0$, получим формулу для описания ДР в виде

$$\sigma = \frac{(\sigma_{0,2}^2 + h\varepsilon)^{1/2}}{1 + r\varepsilon}, \quad (2)$$

где ε – текущая деформация за вычетом упругой деформации и деформации текучести (0,2%).

Выше отмечалось, что уравнения (1) и (2) получены путем использования ряда упрощений, например введением r в знаменатель формулы (2). Заметим, что при описании закономерностей пластического деформирования обычно используется большое число упрощений. При этом некоторые, как и отмеченный учет деформационного разупрочнения, имеют принципиальное значение.

Например, в физических исследованиях [6] при анализе ДР, в частности при рассмотрении первого участка, учитывается лишь упрочнение, т.е. в основном величина $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$. В действительности при этом игнорируется то, что характер этих диаграмм определяется одновременным протеканием процессов упрочнения и разупрочнения. Соотношение интенсивностей протекания этих процессов по мере нарастания деформации изменяется, отражая особенности сопротивления материалов пластическому деформированию, которые в [6] не могут быть обнаружены достаточно полно из-за игнорирования процессов разупрочнения. Анализ закономерностей деформирования при других условиях нагружения также должен сопровождаться уточнением процессов упрочнения и разупрочнения.

На рис. 1 приведены экспериментальные [7] и расчетные ДР стали 25Х1М1Ф при различных температурах. Для каждой ДР в соответствии с формулой (2) определяли коэффициенты h и r , а затем координаты представленных на рис. 1 расчетных точек.

Как видно, расчетные кривые находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментальными. При этом, конечно, следует учитывать, что истинные диаграммы обычно резко отличаются от приведенных на рис. 1 условных диаграмм, поскольку истинные напряжения на втором участке ДР могут значительно превышать величину $\sigma_{\text{в}}$. Заметим, что при описании ползучести имеет место аналогичная картина, т.е. на ускоренной стадии ползучести также имеют место уменьшение поперечного сечения образца и локализация пластической деформации. Поскольку отмеченные неопределенности весьма существенны, достаточно строгое описание ДР практически невозможно. В этой связи упрощения, часто используемые при развитии исследований по уточнению особенностей пластического деформиро-

вания при кратковременном растяжении и в условиях ползучести, могут быть весьма полезными. Заметим, что численные значения постоянных h и r устанавливались методом эмпирического подбора, который должен обеспечить как можно более точное описание стадии упрочнения. В соответствии с этими предпосылками в настоящей работе рассматривается возможность использования данных о кратковременном деформировании для описания закономерностей ползучести.

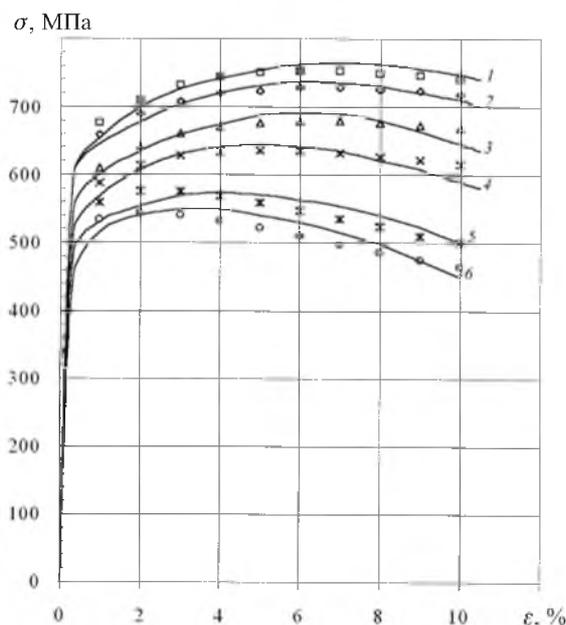


Рис. 1. Экспериментальные [7] (сплошные линии) и расчетные (точки) диаграммы растяжения стали 25X1M1Ф при различных температурах и значениях h и r : 1 – $T = 20^\circ\text{C}$, $h = 1,6 \cdot 10^7$, $r = 9$; 2 – $T = 100^\circ\text{C}$, $h = 1,5 \cdot 10^7$, $r = 9$; 3 – $T = 200^\circ\text{C}$, $h = 1,3 \cdot 10^7$, $r = 9$; 4 – $T = 400^\circ\text{C}$, $h = 1,3 \cdot 10^7$, $r = 10,5$; 5 – $T = 500^\circ\text{C}$, $h = 2 \cdot 10^7$, $r = 20$; 6 – $T = 540^\circ\text{C}$, $h = 1,7 \cdot 10^7$, $r = 20$.

Постоянные h и r для расчетных ДР (рис. 2) выбираются с учетом того, что их одинаковое пропорциональное уменьшение приводит к росту величины ε' при неизменных значениях $\sigma_{0,2}$ и σ_B .

Из рис. 2 следует, что при одних и тех же значениях $\sigma_{0,2}$ и σ_B могут быть получены существенно различные расчетные ДР, для которых величины ε' явно отличаются друг от друга. Следовательно, обычно представляемые данные о σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ недостаточно информативны. Рассмотрим теперь, насколько это важно.

На рис. 3 приведены экспериментальные и рассчитанные с помощью уравнения (1) кривые ползучести. Расчетные кривые построены при различных значениях h и r , причем при описании кривых ползучести использовались такие же значения h и r , как и при описании ДР (рис. 2). Кривые ползучести рассчитываются на основе представлений о равномерном деформировании по объему рабочей части образца, что не подтверждается экспериментально, особенно при рассматриваемых длительных испытаниях. По-

этому ставилась задача достаточно точного аналитического описания кривой ползучести. Кроме того, учитывая разброс экспериментальных данных, при оценке соответствия расчетных и экспериментальных кривых ползучести значительное внимание уделялось величине времени до разрушения. Данные рис. 3 позволяют утверждать, что экспериментальная кривая ползучести, представляемая точками, достаточно близка к одной из расчетных. Вместе с тем для оценки того, какая из приведенных на рис. 2 ДР близка к экспериментальной, необходимо, по крайней мере, располагать данными о ε' .

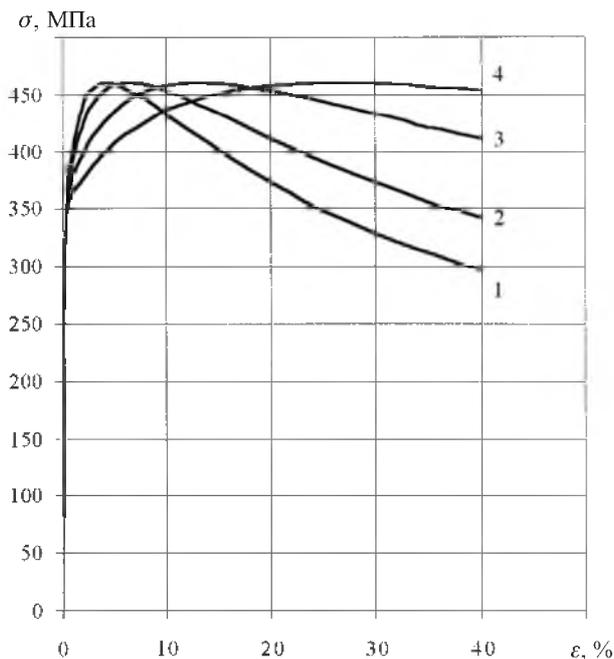


Рис. 2. Расчетные кривые кратковременного растяжения при одинаковых значениях $\sigma_{в}$, $\sigma_{0,2}$ и различных h и r : 1 – $h = 1,05 \cdot 10^7$, $r = 15$; 2 – $h = 0,7 \cdot 10^7$, $r = 10$; 3 – $h = 0,35 \cdot 10^7$, $r = 5$; 4 – $h = 0,175 \cdot 10^7$, $r = 2,5$.

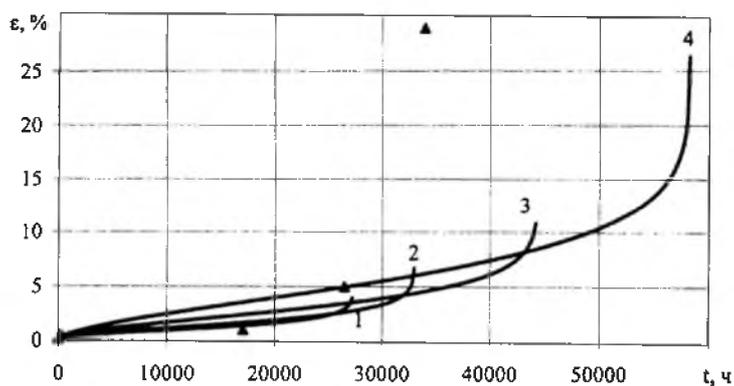


Рис. 3. Экспериментальные [8] (точки) и расчетные (линии) кривые ползучести при $\sigma' = \sigma_{в} = 461$ МПа, $\sigma = 265$ МПа, $\alpha = 5,5 \cdot 10^{-3}$; $N = 34$ и различных h и r : 1 – $h = 1,05 \cdot 10^7$, $r = 15$; 2 – $h = 0,7 \cdot 10^7$, $r = 10$; 3 – $h = 0,35 \cdot 10^7$, $r = 5$; 4 – $h = 0,175 \cdot 10^7$, $r = 2,5$.

Целесообразность подобных уточнений объясняется, в частности, отмечаемой в [1] слабой чувствительностью параметров кривых ползучести к особенностям свойств исследуемых материалов и соответственно низкой эффективностью прогнозирования закономерностей пластического деформирования. Для подтверждения вышеизложенного рассмотрим уравнение [9]

$$\dot{\varepsilon} = m\varepsilon^{1-n} \exp[\alpha\sigma_0(1+k\varepsilon)], \quad (3)$$

где α , m , n , k – постоянные при $T = \text{const}$; n – характеристика упрочнения; k – характеристика разупрочнения, учитывающая изменение сечения образца вследствие его геометрического сужения и накопление различного рода повреждений (трещин, пор и т.п.).

Это уравнение удобно использовать для иллюстрации одной из наиболее существенных и довольно общих трудностей обеспечения такого описания закономерностей пластического деформирования, при котором параметры соответствующих уравнений состояния имели бы четкий смысл. Так, в [9] после применения в уравнении (3) условия нахождения точки перегиба на кривой ползучести получена формула

$$\varepsilon_k = \frac{n-1}{\alpha k \sigma_0}, \quad (4)$$

где ε_k – ордината точки перегиба на кривой ползучести.

Согласно формуле (4) между различными постоянными уравнения (3) существует взаимосвязь: например, при неизменном значении ε_k увеличение n вызывает рост k .

При определении значений постоянной n функции упрочнения в уравнении (3) не учитывается информация о третьей стадии ползучести, в частности о величине k , аналогично определяется также величина k , т.е. без учета информации о функции упрочнения. Вместе с тем в [4] показано, что значения k для двух близких кривых ползучести с несколько различными начальными участками могут отличаться в 5 раз. Это в значительной мере объясняется взаимообусловленностью постоянных уравнений состояния, которой практически не уделяется внимания. Так, согласно (4) значение деформации ε_k может быть неизменным при пропорциональном уменьшении или увеличении характеристик упрочнения и разупрочнения при ползучести. Представленные на рис. 2 результаты обработки ДР иллюстрируют проявление такой же взаимосвязи между этими характеристиками. На основании такого анализа предпринята попытка обосновать тот факт, что данные о ДР могут быть использованы для уточнения характеристик ползучести, поскольку в обоих случаях существует близкая взаимосвязь между характеристиками h и r .

Таким образом, постановка задачи более полного использования информативности ДР вызвана тем, что, например, предложенное в [4, 5] уравнение пластической деформации (1), затем переход от (1) к (2) позволяют при-

менить данные о кратковременном растяжении для уточнения параметров уравнения ползучести. Важность этого положения определяется, в частности, следующим.

Выше было показано возможное проявление взаимосвязи между характеристиками h и r . При этом заметим, что часто при проведении длительных испытаний третья стадия ползучести происходит в условиях практически неконтролируемой и вместе с тем существенной неоднородности деформирования и локализации пластической деформации. В связи с этим трудно предположить, что устанавливаемые только по кривым ползучести характеристики упрочнения и разупрочнения будут в достаточной мере точными и информативными. Полезными можно считать уточнения по данным о ДР, хотя и в этом случае следует учитывать возможные методические погрешности в эксперименте, т.е. и кратковременные испытания должны проводиться при сопоставимых условиях (размеры образцов, скорость деформирования и т.п.), что далеко не всегда выполняется.

Это исследование позволяет повысить эффективность использования накопленного к настоящему времени значительного объема данных о кратковременном растяжении и дает основание утверждать, что подобные исследования являются актуальными.

Ниже обоснованы некоторые возможности получения недостающей информации на основе установления и использования довольно общих соотношений. С этой целью проводились следующие исследования.

С помощью формулы (2) были обработаны 124 диаграммы растяжения, полученные при исследованиях на кратковременную прочность [7], для которых определялись значения h и r , позволяющие построить соответствующие ДР, близкие к экспериментальным. Затем эти данные независимо от материала и температуры испытания использовались для установления соответствующих обобщенных зависимостей. На рис. 4 представлена корреляционная зависимость между значениями пределов прочности и текучести, на рис. 5 – зависимость пределов текучести и прочности от параметра упрочнения h . Как видно из рис. 4 и 5, характеристики прочности зависят от деформационного упрочнения. Оказалось довольно неожиданным практически полное отсутствие, согласно данным рис. 6, взаимосвязи между характеристиками прочности и деформационного разупрочнения.

Это очевидное противоречие приводит к следующему предположению. Постоянные деформационного упрочнения при кратковременном растяжении и ползучести в значительной мере определяются по начальным участкам соответствующих зависимостей, когда еще сравнительно слабо проявляется неоднородность и неустойчивость деформирования. Характеристики деформационного разупрочнения определяются в основном на заключительных стадиях так называемого неустойчивого деформирования в условиях значительной неоднородности деформации по длине и объему образца, сопровождающейся часто выраженной локализацией.

Изложенное выше оправдывает пусть и упрощенный, но достаточно обобщенный анализ экспериментальных данных.

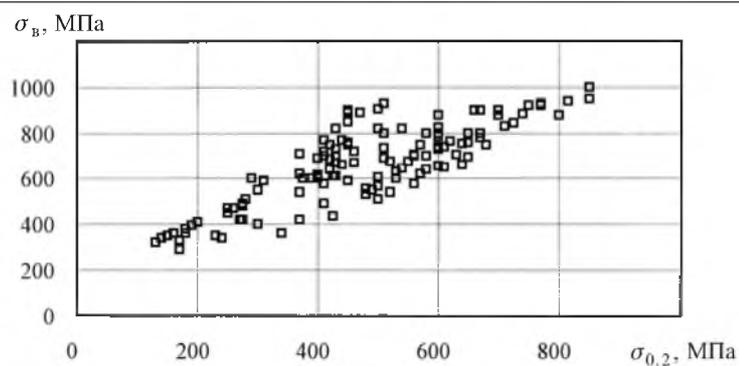


Рис. 4. Обобщенная зависимость между характеристиками $\sigma_{в}$ и $\sigma_{0,2}$ по данным [7].

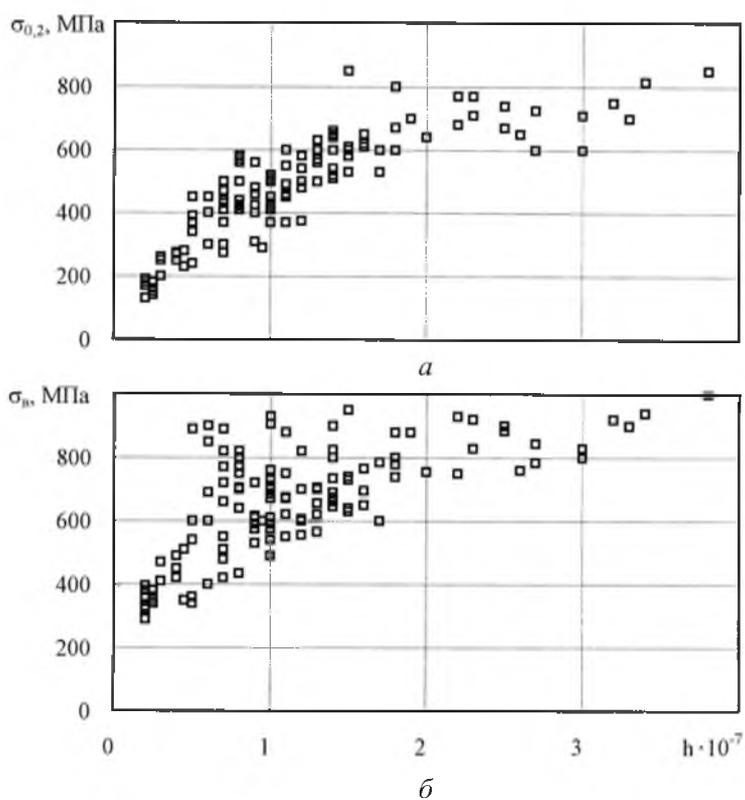


Рис. 5. Обобщенные зависимости между характеристиками $\sigma_{0,2}$ и h (а) и $\sigma_{в}$ и h (б) по данным [7].

Из рис. 2 видно, что между характеристиками h и r , рассчитываемыми по данным о ДР, существует взаимосвязь. Так, переход от одной расчетной ДР к другой при неизменных значениях $\sigma_{в}$ и $\sigma_{0,2}$ происходит при одновременном пропорциональном изменении характеристик h и r . Это позволяет использовать значения h и r , полученные по ДР, при оценке параметров ползучести, поскольку установить взаимосвязь между указанными характеристиками по данным о ползучести значительно сложнее. Объясняется это тем, что согласно (4) при прочих равных условиях отмеченное

соотношение между характеристиками упрочнения и разупрочнения при кратковременном растяжении может также существовать между n и k , однако при ползучести оно зависит от значительно большего числа параметров.

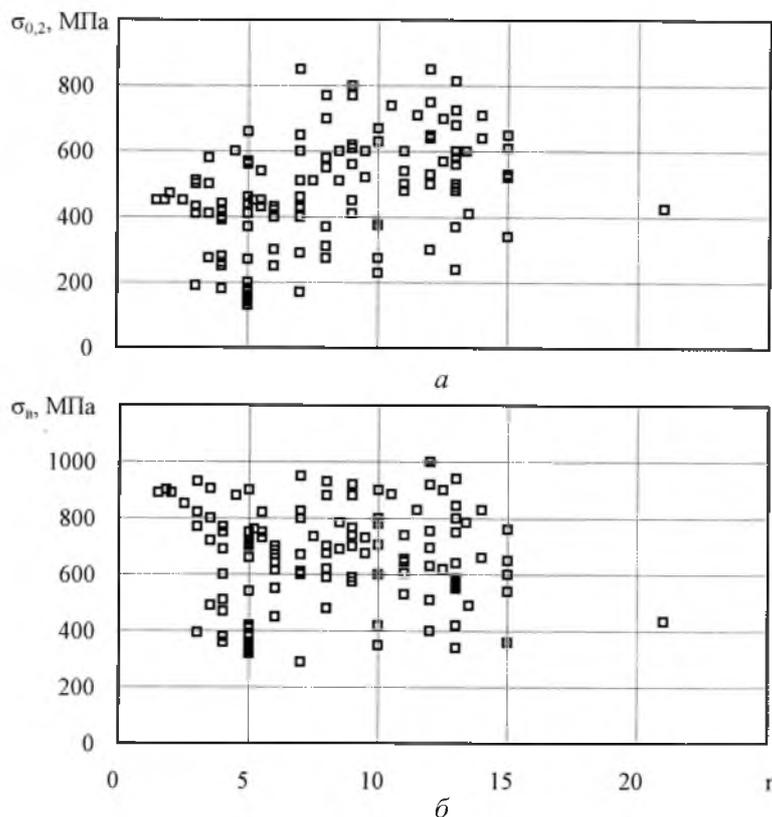


Рис. 6. Обобщенные зависимости между характеристиками $\sigma_{0,2}$ и r (а) и σ_b и r (б) по данным [7].

Анализ данных исследования показал, что практически наиболее важным является установленная взаимосвязь $\sigma_b = f(h)$. Представляют интерес различного рода возможные уточнения такой взаимосвязи. Из рис. 5 следует, что при сравнительно низких уровнях величин σ_b и $\sigma_{0,2}$ различие значений h относительно небольшое, а с увеличением значений пределов прочности и текучести интервал изменения h расширяется. Тем не менее заметим, что даже при отсутствии данных о деформации ε' приведенные на рис. 5 зависимости позволяют уточнять значения h . Кроме того, с точки зрения дальнейших уточнений значений h имеет смысл проанализировать действительные причины их различия, а также рассмотреть при отдельных значениях $\sigma_{0,2}$ и σ_b , насколько существенно величина ε' зависит от величины h .

Таким образом, для повышения эффективности и надежности описания закономерностей пластического деформирования металлических материалов целесообразно проводить уточнение рассматриваемых зависимостей с учетом результатов их применения.

Резюме

За даними аналізу 124 діаграм розтягу обґрунтовано можливість їх опису при варіюванні характеристиками деформаційного зміцнення та знеміцнювання. За умови незмінних значень границі текучості та границі міцності взаємозв'язана пропорційна зміна вищезгаданих характеристик дає можливість отримувати ряд різних діаграм розтягу. Для визначення конкретної діаграми розтягу необхідно враховувати деформацію, що відповідає повзучості. Статистично встановлено взаємозв'язок між границями міцності і текучості та зміцненням і практично його повну відсутність між цими параметрами і руйнуванням.

1. Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. и др. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
2. Manson S. S. Fatigue: A complex subject – some simple approximations // Exp. Mech. – 1965. – 5, No. 7. – P. 193 – 226.
3. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Зайцева Л. В. Влияние вида напряженного состояния на кинетику разрушения и трещиностойкость мартенситно-старееющей стали. Сообщ. 1. Исследование стадийности процесса разрушения // Пробл. прочности. – 1991. – № 8. – С. 3 – 13.
4. Кривенюк В. В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
5. Кривенюк В. В. О взаимообусловленности решения задач описания и анализа особенностей высокотемпературной ползучести металлических материалов // Пробл. прочности. – 1990. – № 5. – С. 31 – 35.
6. Трефилов В. И., Мильман Ю. В., Фирстов С. А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. – Киев: Наук. думка, 1975. – 316 с.
7. Либерман Л. Я., Пейсихис М. И. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении: В 3 ч. – Л.: ЦКТИ, 1966. – 643 с.
8. Data sheets on the elevated-temperature properties of 12Cr steel // NRIM Creep Data Sheet. – 1994. – No. 13B. – 41 p.
9. Лепин Г. Ф. Ползучесть металлов и критерии жаропрочности металлических материалов. – М.: Металлургия, 1976. – 334 с.

Поступила 06. 06. 2001