

УДК 539.37

Исследование пластичности стали с карбидно-интерметаллидным упрочнением¹

А.М. Покровский

Экспериментально исследована пластичность стали с карбидно-интерметаллидным упрочнением в широком температурном диапазоне. Предложены формулы, описывающие упругопластическое деформирование стали в процессе термической обработки. Приведены экспериментальные мгновенные кривые растяжения стали в аустенитном и мартенситном состояниях, а также теоретические кривые, рассчитанные по предлагаемым эмпирическим зависимостям.

Ключевые слова: испытательная машина, сталь с карбидно-интерметаллидным упрочнением, термообработка, структурные превращения, аустенит и мартенсит, мгновенная кривая растяжения, предел текучести, показатель степенного упрочнения, напряжение, деформация.

The plasticity of steel with carbide-intermetallic strengthening in a wide temperature range has been experimentally investigated. The equations describing elastic-plastic deformation of steel in the process of heat treatment are offered. The experimental steel instant tension curves in austenitic and martensitic states, as well as the theoretical curves calculated according to the proposed empirical dependencies are given.

Keywords: testing machine, steel with carbide-intermetallic strengthening, heat treatment, structural transformations, austenite and martensite, instant tension curve, yield strength, indicator of hardening power, tension, deformation.

Высоколегированная сталь 25Н12М6К10 с карбидно-интерметаллидным упрочнением является перспективной для изготовления высококачественных биметаллических прокатных валков нового поколения с наплавкой из этой стали [1]. Увеличение ресурса этих валков в первую очередь связано с оптимизацией режимов их термической обработки. Выбор таких режимов возможен посредством компьютерного моделирования термомеханических процессов, протекающих при термообработке, для проведения которого необходима информация о пластических свойствах стали в широком температурном диапазоне. При этом проблема в значительной степени осложняется протеканием структурных превращений при термообработке, которые приводят к существенному изменению механических характеристик. Напри-



ПОКРОВСКИЙ

Алексей Михайлович

доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой
«Прикладная механика»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11–08–01314 а).

мер, пределы текучести стали в аустенитном и мартенситном состояниях при одной и той же температуре могут отличаться в 2 и более раза.

В настоящей работе в процессе опытов определялись мгновенные кривые растяжения, полученные с такой скоростью деформирования, при которой влияние сопутствующей деформации ползучести несущественно [2]. Экспериментальные исследования, проведенные в работе [3], показали, что для получения мгновенных кривых растяжения скорость деформирования должна быть не меньше 10^{-2}с^{-1} , поэтому все опыты на пластичность выполнялись с такой скоростью деформирования.

Испытания проводились на оборудовании лаборатории кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Использовалась испытательная машина для растяжения образцов немецкой фирмы Zwick/Roell модель Z050, имеющая точность задания нагрузки 1% и определения линейной деформации 1 мкм. Нагрев образцов в диапазоне температур 200...1100 °С обеспечивался с помощью трехсекционной электрической печи типа НТО-08/2 фирмы МАУТЕС. Управление печью осуществлялось с помощью автоматического регулятора, способного задавать температуру в печи с точностью до 1 °С.

Сталь 25Н12М6К10 относится к сталям мартенситного класса [4], т. е. даже при очень медленном охлаждении образуется мартенситная структура, поэтому исходная структура образцов была мартенсит. Для испытания образцов в аустенитном состоянии необходимо вначале провести аустенизацию. С этой целью образец нагревался со скоростью 20 °С/мин до температуры 1100 °С и выдерживался при данной температуре 10 мин для перехода стали в аустенитное состояние. Далее образец медленно охлаждался в печи до температуры эксперимента и выдерживался при этой температуре 5 минут для компенсации неравномерности охлаждения образца и захватов. Для предотвращения образования окалины на образце при температурах испытания выше 500 °С в печь подавался аргон. Во всех опытах использовалось по три образца.

Рассматривались небольшие деформации (до 5%), характерные для термической обработки прокатных валков. Систематическая ошибка из машинной диаграммы исключалась путем сдвига значений деформаций таким образом, чтобы деформации точек, которые расположены на прямолинейном участке, соответствовали упругим деформациям, подсчитанным по закону Гука для заданного модуля упругости E . Поскольку упругие характеристики мало чувствительны к структурному составу, принималось, что E зависит только от температуры. В связи с тем, что модуль Юнга мало зависит от легирования, зависимость модуля упругости E от температуры t принималась равной полученной в работе [3] для стали 75Х2ГНМФ (МПа):

$$E(t) = 2,15 \cdot 10^5 - 87,2t. \quad (1)$$

Аустенит исследовался при температурах 800, 700, 500 и 300 °С. В процессе экспериментов образцы нагревались до температуры 1100 °С и затем охлаждались до температуры испытания. Результаты испытания представлены на рис. 1. При исследовании пластических свойств мартенситной структуры при температуре 800, 700, 600, 400 и 200 °С образец сразу нагревался до температуры испытания, так как исходная структура образцов была мартенсит. Кроме этого проводились испытания образцов с мартенситной структурой при нормальной температуре (20 °С).

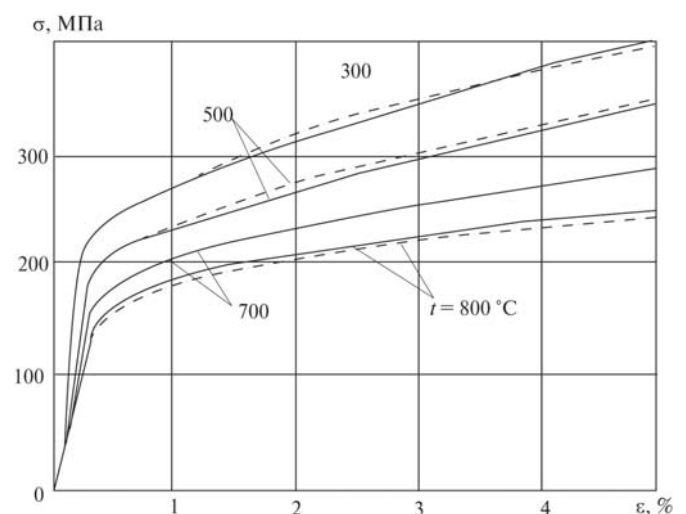


Рис. 1. Кривые растяжения аустенита:

— — эксперимент;
 - - - - аппроксимация

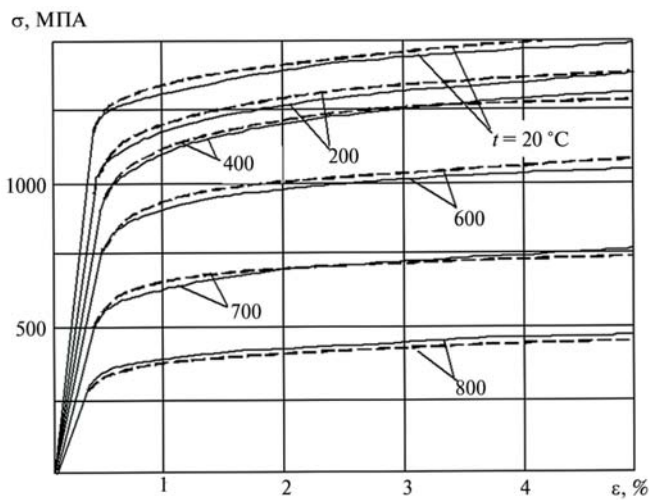


Рис. 2. Кривые растяжения мартенсита:
 — — эксперимент;
 - - - - аппроксимация

Следует отметить, что при испытании мартенситной структуры в диапазоне температур 570...820 °С происходит обратное мартенситное превращение и мартенсит превращается в аустенит. Проведенное dilatометрическое исследование показало, что кинетику этого превращения в зависимости от температуры t можно описать по формуле

$$V_a = 4,244 \cdot 10^{-3} t - 2,470, \quad (2)$$

где V_a — удельная доля аустенита.

В связи с этим кривые растяжения, полученные в процессе экспериментов в этом температурном диапазоне, фактически представляют собой кривые растяжения гетерогенной структуры, состоящей из аустенита и мартенсита. На основании правила смеси кривую растяжения гетерогенной структуры можно рассчитать по следующей формуле:

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_a(\epsilon) V_a + \sigma_m(\epsilon) V_m, \quad (3)$$

где $\sigma(\epsilon)$, $\sigma_a(\epsilon)$, $\sigma_m(\epsilon)$ — значения напряжений для данной деформации ϵ на кривых растяжения соответственно гетерогенной структуры, аустенита и мартенсита; V_m — удельная доля мартенсита, $V_m = 1 - V_a$.

Тогда кривую растяжения мартенсита можно пересчитать по кривым растяжения гетерогенной структуры и аустенита по формуле

$$\sigma_m(\epsilon) = (\sigma(\epsilon) - \sigma_a(\epsilon) V_a) / (1 - V_a). \quad (4)$$

На рис. 2 представлены кривые растяжения мартенсита для температур 600, 700 и 800 °С, рассчитанные по формуле (4), а также кривые растяжения мартенсита для температур 20, 200 и 400 °С, для которых описанный пересчет не требовался, так как указанные температуры испытания лежали ниже температуры начала обратного мартенситного превращения (570 °С).

При обработке кривых растяжения определялся условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), соответствующий пластической деформации 0,2%. Из сравнения кривых растяжения следует, что мартенсит имеет предел текучести выше, чем аустенит, но в тоже время обладает меньшим деформационным упрочнением. Проведенные опыты показали, что аппроксимация кривых растяжения по схеме идеального упругопластического тела, особенно при невысоких температурах, может привести к значительным ошибкам. В связи с этим для описания кривых растяжения использовалась модель упругопластического материала со степенным упрочнением

$$\sigma = E\epsilon \text{ при } \epsilon \leq \epsilon_T;$$

$$\sigma = \sigma_T \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_T} \right)^m \text{ при } \epsilon > \epsilon_T, \quad (5)$$

где $\epsilon_T = \sigma_T / E$ — деформация, соответствующая началу текучести.

Значение параметров, полученные в результате обработки кривых растяжения методом наименьших квадратов (МНК) на основании формулы (5), представлены в табл. 1 и 2. Аустенит, исследованный в широком температурном диапазоне, характеризуется значительным изменением показателя упрочнения. Причем, как и следовало ожидать [5], показатель уменьшается при повышении температуры. Схематизированные диаграммы, рассчитанные по значениям коэффициентов, приведенным в табл. 1 и 2, изображены на рис. 1 и 2 штриховыми линиями.

Таблица 1

Параметры схематизированной диаграммы растяжения со степенным упрочнением для аустенита

Температура, °C	300	500	700	800
σ_{Ta} , МПа	200	180	160	140
m_a	0,181	0,165	0,139	0,135

Таблица 2

Параметры схематизированной диаграммы растяжения со степенным упрочнением для мартенсита

Температура, °C	20	200	400	600	700	800
σ_{Tm} , МПа	1 200	1 000	910	750	500	300
m_m	0,132	0,138	0,142	0,145	0,149	0,150

Температурные зависимости предела текучести аустенита и мартенсита, представленные на рис. 3 и 4, были аппроксимированы по МНК следующими уравнениями соответственно (МПа);

$$\sigma_{Ta} = 311 - 0,105t; \tag{6}$$

$$\sigma_{Tm} = \sqrt{1,44 \cdot 10^6 - 1,58 \cdot 10^3 t}.$$

Температурные зависимости для показателя степенного упрочнения аустенита и мартенсита, представленные на рис. 5, также были аппроксимированы с использованием МНК:

$$\begin{aligned} m_a &= 0,214 - 1,01 \cdot 10^{-4} t; \\ m_m &= 0,133 + 2,38 \cdot 10^{-5} t. \end{aligned} \tag{7}$$

Применяя правило смеси (3), можно получить уравнения, описывающие кривую растяжения гетерогенной структуры

$$\sigma = E\varepsilon \text{ при } \varepsilon \leq \varepsilon_T = (\sigma_{Ta} V_a + \sigma_{Tm} V_m) / E; \tag{8}$$

$$\sigma = \sigma_{Ta} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{Ta}} \right)^{m_a} V_a + \sigma_{Tm} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{Tm}} \right)^{m_m} V_m \text{ при } \varepsilon > \varepsilon_T,$$

Значения пределов текучести и показателей степенного упрочнения для аустенита и мартенсита определяются из соотношений (6) и (7).

С помощью уравнений (8), описывающих упругопластическое деформирование стали

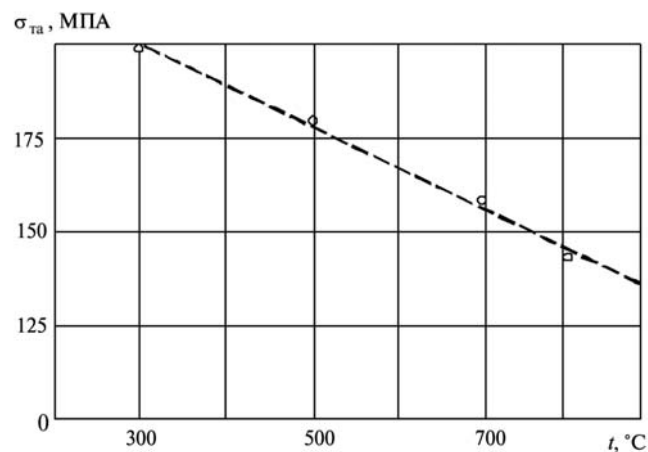


Рис. 3. Зависимость предела текучести аустенита от температуры:
o — эксперимент;
- - - - - аппроксимация

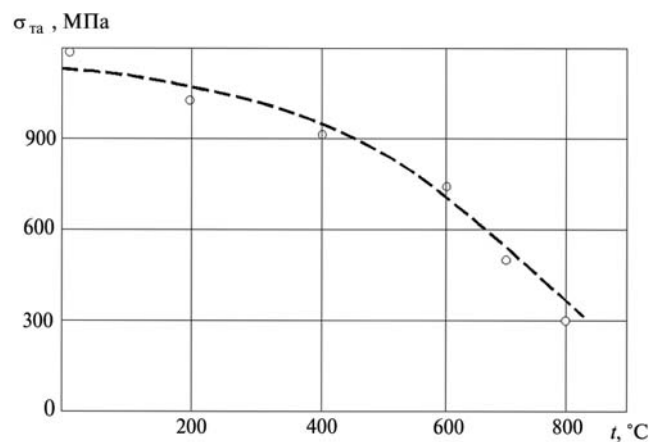


Рис. 4. Зависимость предела текучести мартенсита от температуры:
o — эксперимент; - - - - - аппроксимация

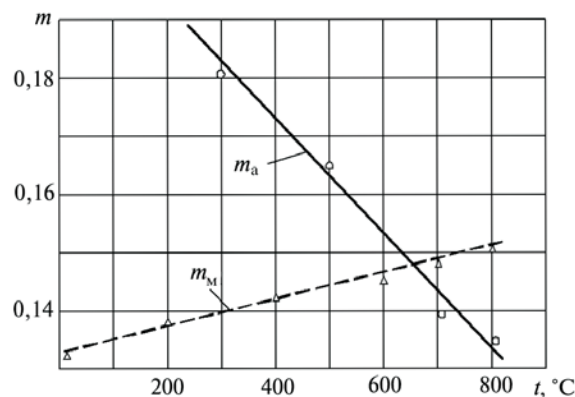


Рис. 5. Зависимости показателей степенного упрочнения для аустенита и мартенсита:
o, Δ — эксперимент;
—, - - - - - аппроксимация

в процессе изменения температуры и структурного состава, можно создать математическую модель формирования остаточных напряжений в прокатных валках с наплавкой из этой стали при термообработке.

Проведенное экспериментальное исследование стали 25Н12М6К10 позволило сформулировать следующие выводы:

1) кривые растяжения аустенита и мартенсита хорошо описываются по схеме упругопластического тела со степенным упрочнением. Кривую растяжения гетерогенной структуры с известным структурным составом можно определить на основании правила смеси по кривым растяжения аустенита и мартенсита.

2) мартенсит имеет предел текучести выше, чем аустенит, но в тоже время обладает меньшим деформационным упрочнением. Показатель степенного упрочнения аустенита меняется сильнее от температуры, чем показатель степенного упрочнения мартенсита. Кроме того первый уменьшается с повышением температуры, а второй падает.

Литература

1. *Лешковцев В.Г., Покровский А.М., Плохих А.И., Ховова О.М.* Исследование возможности создания композитных валков с наплавкой из стали 30Н12М6К10Б с карбидно-интерметаллидным упрочнением // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2009. № 3. С. 38—42.
2. *Работнов Ю.Н., Милейко С.Т.* Кратковременная ползучесть. М.: Наука, 1970. 222 с.
3. *Вафин Р.К., Покровский А.М., Лешковцев В.Г.* Прочность термообрабатываемых прокатных валков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 264 с.
4. *Гуляев А.П.* Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 542 с.
5. Сопротивление деформации и пластичность стали ШХ15 // *Обработка металлов давлением: Межвуз. сб. (Свердловск).* 1979. Вып. 6. С. 17—23.
6. Производство и эксплуатация крупных опорных валков / *Н.П. Морозов и др.* М.: Металлургия. 1977. 77 с.

Статья поступила в редакцию 29.09.2011