

2. Князев С.В., Антипенко В.А., Марчуков В.А., Усольцев А.А. Алгоритм диагностики дефектности отливок и структура АСУ их качеством // Литейное производство. 1992. № 4. С. 26, 27.
3. Князев С.В., Усольцев А.А., Чичков В.И. Шихов Е.А. Контроль и управление производства отливок по критерию их качества // Теория и практика литейных процессов: Труды Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 80-летию кафедры литейного производства СибГИУ / Под ред. И.Ф. Селянина, В.Б. Деева. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2012. С. 153 – 158.
4. Hastie, T., Tibshirani R., Friedman J. Chapter 15. Random Forests // The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. – 2nd ed. – Springer-Verlag, 2009.
5. Википедия: https://ru.wikipedia.org/wiki/Random_forest (Дата обращения: 13.03.2015 г.).
6. Юрий Лифшиц. Метод опорных векторов (Слайды) – лекция № 7 из курса «Алгоритмы для Интернета»: <http://yury.name/internet.html> (Дата обращения: 13.03.2015 г.).
7. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, 1979. – 448 с.

© 2015 г. С.В. Князев, Д.В. Скопич,
А.А. Усольцев, Е.А. Фатьянова
Поступила 13 марта 2015 г.

УДК 621.011:539.52

М.В. Филиппова, М.В. Темлянец, В.Н. Перетяшко

Сибирский государственный индустриальный университет

ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 08X18H10T*

Точность расчетов энергосиловых параметров различных процессов обработки металлов давлением в значительной степени зависит от точности определения величины сопротивления деформации (напряжения течения). Значение напряжения течения зависит в общем случае от типа кристаллической решетки, химического состава, структуры, степени деформации, температуры и скорости деформации [1]. Влияние исходной структуры и ее изменение в процессе деформации может быть учтено через структурно-чувствительный фактор. Тогда для конкретной марки стали напряжение течения σ_T можно записать в виде

$$\sigma_T = \sigma_T(\varepsilon, u, T, C), \quad (1)$$

где ε – степень деформации; u – скорость деформации; T – температура; C – структурно-чувствительный фактор.

При больших деформациях (установившаяся стадия пластического течения) напряжение

течения и структура не зависят от степени деформации и однозначно определяются скоростью деформации и температурой:

$$\sigma_T = \sigma_T(u, T). \quad (2)$$

Проведено исследование кривых течения аустенитной стали марки 08X18H10T с содержанием 28 % δ -феррита. Исследование образцов проводили методом растяжения при температурах от 800 до 1200 °С при скорости деформации от $3,2 \cdot 10^{-2}$ до $1,7 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$. Скорость деформации $1,7 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ получена при испытании образцов на горячее скручивание [2].

Для изучения изменения микроструктуры при высоких температурах растяжение образцов из стали марки 08X18H10T проводили на установке высокотемпературной металлографии ИМАШ-20-75 «Ала-Тоо» [3]. Для испытания образец крепился в вакуумной камере. После откачки воздуха до остаточного давления $6,7 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ проводили нагрев и растяжение образцов. Нагрев образца до температуры от 800 до 1200 °С осуществлялся за счет пропускания через него тока промышленной частоты.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ на 2014 – 2015 гг. (гос. контракт № 14-08-00686).

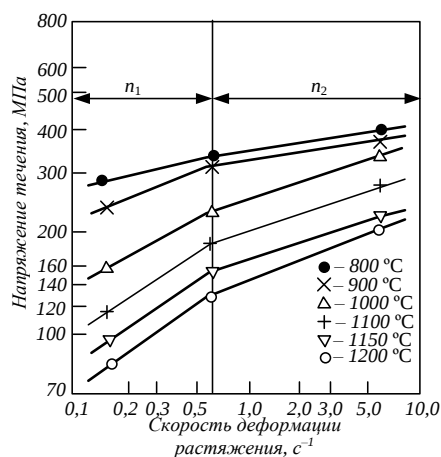


Рис. 1. Зависимость напряжения течения стали 08X18N10T от скорости деформации

Вакуумным травлением выявлялись границы зерен, деформацию которых можно наблюдать и фотографировать с помощью микроскопа МВТ-71.

Зависимость напряжения течения от скорости деформации в значительной степени определяет взаимоотношение конкурирующих процессов упрочнения и разупрочнения [1]. Скоростная зависимость $\sigma_t - u$ может быть представлена в виде уравнения [1]

$$\sigma_t = A_1 u^n, \quad (3)$$

в котором A_1 – коэффициент; n – скоростной показатель.

На рис. 1 представлена скоростная зависимость напряжения течения стали 08X18N10T.

Можно отметить увеличение напряжения течения с ростом скорости деформации и его снижение при увеличении температуры. При скорости деформации около $0,5 \text{ с}^{-1}$ наблюдается перегиб линейных зависимостей. Таким

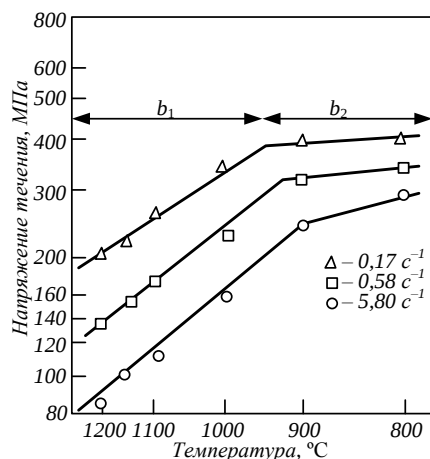


Рис. 2. Зависимость напряжения течения стали 08X18N10T от температуры

образом, на рис. 1 можно выделить два характерных участка: участок с большим показателем скоростной чувствительности напряжения течения n_1 и участок с малым показателем скоростной чувствительности n_2 . Ниже приведены значения показателя скоростной чувствительности для различных температур испытания:

$T, ^\circ\text{C} \dots$	800	900	1000	1100	1150	1200
$n_1 \dots \dots \dots$	0,19	0,24	0,24	0,31	0,32	0,36
$n_2 \dots \dots \dots$	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,15

Для анализа влияния температуры на напряжение течения применяют экспоненциальную зависимость [4]

$$\sigma_t = \sigma_0 \exp(b/T), \quad (4)$$

где σ_0 – напряжение течения, экстраполированное до $0 ^\circ\text{C}$; $b = Q/R$ – температурный коэффициент, град; Q – энергия активации, кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К); T – температура испытания, К.

На рис. 2 приведена температурная зависимость напряжения течения исследованной стали. Можно отметить увеличение напряжения течения с ростом скорости деформации и его снижение при увеличении температуры. При температурах $900 - 950 ^\circ\text{C}$ наблюдается перегиб линейных зависимостей напряжения течения от температуры. В области высоких температур (выше $900 - 950 ^\circ\text{C}$) температурная чувствительность напряжения течения характеризуется коэффициентом b_1 . Чувствительность напряжения течения к изменению температуры в области температур меньше $900 - 950 ^\circ\text{C}$ ниже и оценивается коэффициентом температурной чувствительности b_2 . Влияние скорости деформации на коэффициент температурной чувствительности отражают следующие данные:

$u, \text{с}^{-1} \dots \dots \dots$	0,17	0,58	1,70	5,80
$b_1 \cdot 10^3 \dots \dots \dots$	4,0	3,0	2,7	2,6
$b_2 \cdot 10^3 \dots \dots \dots$	1,1	0,2	0,2	0,2

Интервал исследованных температур и скоростей деформации для стали 08X18N10T может быть представлен в виде нескольких областей, которые характеризуются сочетанием различных по величине коэффициентов скоростной (n) и температурной (b) чувствительности напряжения течения (рис. 3).

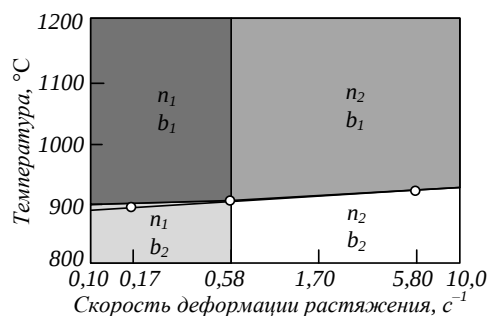


Рис. 3. Области значений температурного коэффициента и показателя скоростной зависимости стали 08X18H10T

При изучении механизмов, контролирующих деформацию, широко используются оценки активационных параметров [5], однако применительно к горячей обработке давлением двухфазных сталей такие исследования не проводились. Поэтому целесообразно проанализировать рассмотренные выше зависимости напряжения течения от температуры и скорости деформации с привлечением представлений о пластической деформации как о термически активированном процессе.

Модели, основанные на представлении об атермической пластической деформации, контролируемой переползанием дислокаций, подробно рассмотрены в работе [6]. Модели приводят к следующей зависимости между сопротивлением деформации (напряжением течения) и скоростью деформации:

$$u = \sigma_{\tau}^{n'} \quad (5)$$

В этой модели коэффициент n' имеет значение от 3,0 до 4,5. Сравнивая уравнения (3) и (5), можно отметить, что показатель степени n в уравнении (3) равен $n = 1/n'$. Таким образом, пластическая деформация атермична, когда значения коэффициента скоростной чувствительности находятся в интервале 0,22 – 0,33. Это область пластической деформации со скоростями менее $5,8 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ при температурах выше 850 °C. На рис. 3 показано, что эта область характерна не только высоким коэффициентом скоростной чувствительности n_1 , но и высоким коэффициентом температурной чувствительности b_1 напряжения течения.

Наличие двух участков на графике зависимости $\sigma_{\tau} - u$ позволяет предположить, что при низкой скоростной и температурной чувствительности пластическая деформация является термически активированным процессом. В области высоких скоростей (более $5,8 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$) и низких температур (ниже 900 °C) существен-

ную роль играет атермическая деформация. Области, которые характеризуются парными коэффициентами n_1, b_2 и n_2, b_1 , являются переходными.

Для объяснения полученных результатов воспользуемся параметром Зинера-Холломоны (З-Х) – Z .

В условиях, когда с увеличением скорости деформации степенной закон (3) перестает быть справедливым, а на графике в координатах $\sigma_{\tau} - T$ имеются перегибы, следует применять другой закон связи напряжения течения с температурой и скоростью деформации (7):

$$u = A_2 [\sinh(\alpha \sigma_{\tau})]^n \exp(-Q/RT). \quad (6)$$

Используя параметр Зинера-Холломоны

$$Z = u \exp(Q/RT), \quad (7)$$

эту зависимость можно записать в виде

$$Z = A_2 [\sinh(\alpha \sigma_{\tau})]^{n^{ii}}, \quad (8)$$

где A_2, n^{ii}, α – постоянные, не зависящие от температуры и напряжения.

Выражения (6) и (8) для больших напряжений течения – высокие скорости деформации или низкие температуры деформации – стремятся к уравнениям [7]

$$u = A_3 \exp(\beta \sigma_{\tau}) \exp(-Q/RT); \quad (9)$$

$$Z = A_3 \exp(\beta \sigma_{\tau}), \quad (10)$$

где A_3 и β – константы, не зависящие от температуры и напряжения.

Для малых напряжений течения – низкие скорости деформации или высокие температуры деформации – выражения (6) и (8) стремятся к уравнениям [7]

$$u = A_1^i \sigma_{\tau}^n \exp(-Q/RT); \quad (11)$$

$$Z = A_1^i \sigma_{\tau}^n. \quad (12)$$

Многочисленные исследования горячей деформации металлов и однофазных сплавов показали [7, 8 и др.], что в тех случаях, когда деформация происходит путем термически активируемого скольжения дислокаций и энергия активации процесса деформации равна энергии активации самодиффузии, справедливы соотношения (6), (8) – (10).

С использованием методики [7] была рассчитана энергия активации горячей деформации стали 08X18H10T, которая является энергией активации самодиффузии и равна 86 кДж/моль. Приведенные ниже значения параметра Z для стали 08X18H10T рассчитаны с использованием этой величины и при различных температурно-скоростных условиях деформации:

Опыт	u, c^{-1}	T, K	Z, c^{-1}	σ_T, MPa
1	0,17	1073	$2,6 \cdot 10^3$	275
2		1173	$1,1 \cdot 10^3$	242
3		1273	$3,8 \cdot 10^2$	164
4		1373	$3,2 \cdot 10^2$	114
5		1423	$2,4 \cdot 10^2$	101
6		1473	$1,9 \cdot 10^2$	85
7	0,58	1073	$8,9 \cdot 10^3$	330
8		1173	$3,9 \cdot 10^3$	319
9		1273	$2,0 \cdot 10^3$	225
19		1373	$1,1 \cdot 10^3$	175
11		1423	$8,2 \cdot 10^2$	153
12		1473	$6,5 \cdot 10^2$	134
13	5,80	1073	$8,9 \cdot 10^4$	396
14		1173	$3,9 \cdot 10^4$	386
15		1273	$2,0 \cdot 10^4$	327
16		1373	$1,1 \cdot 10^4$	251
17		1423	$8,2 \cdot 10^3$	221
18		1473	$6,5 \cdot 10^3$	209

Зависимость $\ln Z - \sigma_T$, представленная прямой линией (рис. 4), свидетельствует о выполнении экспоненциального закона (10) и о независимости энергии активации от температуры и скорости деформации.

Далее были рассчитаны значения всех коэффициентов уравнения (8) [7]. Для стали 08X18H10T получили следующее уравнение для расчета параметра Z :

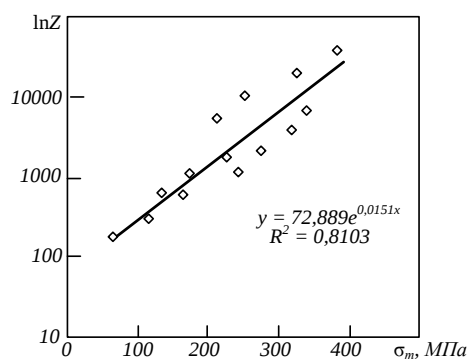


Рис. 4. Связь напряжения течения стали 08X18H10T с параметром Зинера-Холломоны

$$Z = 2,0 \cdot 10^2 \left[\sinh(1,0 \cdot 10^{-2} \sigma_T) \right]^{1,6}. \quad (13)$$

Согласно данным работы [7], величина $\alpha \sigma_T$ является граничной, так как она разделяет область, в которой справедлив степенной закон (12), от области, в которой справедлив экспоненциальный закон (10). Граничные значения напряжения течения для стали 08X18H10T и параметра Зинера-Холломоны составляют соответственно $\sigma_{тр} = 120$ МПа и $Z_{тр} = 3,6 \cdot 10^2 c^{-1}$. Расчеты показали, что большинство исследованных режимов деформации стали 08X18H10T удовлетворяют условию $u \exp(Q/RT) = Z > Z_{тр}$, когда деформация является термически активируемым процессом. Механизмами термоактивируемого скольжения при высоких температурах являются стяжка и поперечное скольжение расщепленных дислокаций. В области $Z < Z_{тр}$ происходит атермическая деформация, которую определяют переползания дислокаций [7].

На основании полученных результатов построена уточненная диаграмма механизма деформации стали 08X18H10T (рис. 5). В этой диаграмме расширен экспериментальный интервал скоростей деформации. В правом углу рисунка при скоростях от 0,1 до $10 c^{-1}$ приведена ранее рассмотренная на рис. 3 диаграмма механизмов деформации стали 08X18H10T. Видно, что чем выше температура деформации, тем больше скорость, соответствующая смене механизмов деформации. Сопоставление диаграмм рис. 3 и рис. 5 подтверждает предположение о том, что область с высокой скоростной и температурной чувствительностью является областью атермической деформации.

На рис. 5 кривая 1 означает пограничное значение параметра Z в зависимости от температуры и скорости деформации. Левее этой границы расположена область атермической деформации II, правее – область термически активируемой деформации I. Штриховыми линиями обозначены границы доверительного интервала параметра Z .

Изменение температурно-скоростных условий деформации вызывает изменение скоростного показателя n и температурного коэффициента b напряжения течения стали. Для чистых металлов и сплавов интенсивность динамического разупрочнения повышается

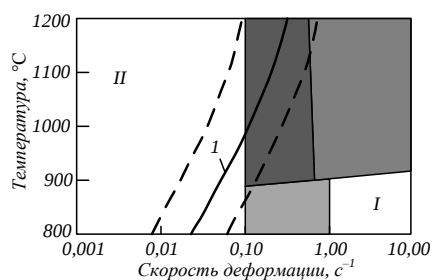


Рис. 5. Диаграмма областей термически активной деформации I и атермической деформации II

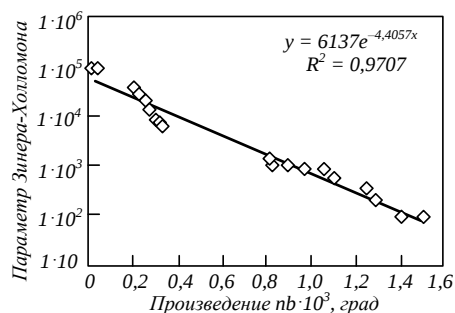


Рис. 6. Зависимость произведения nb от параметра Зенера-Холломена

с увеличением показателя n и коэффициента b [4, 9 и др.].

О совместном влиянии температуры и скорости деформации на интенсивность динамического упрочнения можно судить по величине произведения nb . На рис. 6 представлен график зависимости величины nb от параметра Z для стали 08X18H10T, из которого видно, что с уменьшением параметра Z интенсивность динамического упрочнения возрастает и принимает максимальное значение в области атермической деформации.

Выводы. Для стали 08X18H10T при температурах 800 – 1200 °С наблюдаются два значения скоростного показателя n напряжения течения. Для исследованной стали наблюдаются два температурных интервала с разными значениями температурного коэффициента b . Энергия активации горячей деформации в исследованном интервале скоростей и температур стали 08X18H10T является постоянной и составляет 86 кДж/моль. Граничное значение параметра Z , разделяющие области справедливости степенного (12) и экспоненциального (10) законов для исследованной стали, составляет $Z_{гп} = 3,6 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$. Протекание атермической деформации возможно при высоких температурах и низких скоростях деформации. Определены интервалы температур и скоростей деформации, где формоизменение металла явля-

ется результатом термически активированного движения дислокаций. Интенсивность динамического разупрочнения, характеризуемого произведением скоростного показателя и температурного коэффициента nb , увеличивается при уменьшении параметра Z ; произведение nb принимает наибольшее значение в области атермической деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. Учебное пособие. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.
2. Развитие теории и практики металлургических технологий: Монография в 3 т. / Под ред. В.Н. Перетяшко, Е.В. Протопопова, И.Ф. Селянина. Т. 2: Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением/ В.Н. Перетяшко, М.В. Темлянцев, М.В. Филиппова. – М.: Теплотехник, 2010. – 352 с.
3. Лозинский М.Г. Строение и свойства металлов при повышенных температурах. – М.: Металлургия, 1963. – 536 с.
4. Соколов Л.Д. Сопротивление металлов пластической деформации. – М.: Металлургия, 1963. – 284 с.
5. Термически активированные процессы в кристаллах: сборник статей / Пер. с англ.; под ред. А.Н. Орлова. – М.: Мир, 1973. – 312 с.
6. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
7. Высокотемпературная пластичность кристаллических тел: переводное издание / Ж.П. Пуарье; пер. с франц. Г.Д. Стельмаковой; под ред. А.С. Кагана, С.С. Рыжак. – М.: Металлургия, 1982. – 272 с.
8. McQueen H.J. Deformation Mechanisms in Hot Working // J. Metals. 1968. Vol. 20. № 4. P. 31 – 38.
9. Соколов Л.Д., Скуднов В.А., Солёнов В.М. Механические свойства редких металлов. – М.: Металлургия, 1972. – 288 с.

© 2015 г. М.В. Филиппова, М.В. Темлянцев,
В.Н. Перетяшко
Поступила 15 июня 2015 г.