

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МАРГАНЦОВИСТЫХ СТАЛЕЙ

С.В. Карпов, А.А. Банщиков, А.С. Карпова

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Металлургической промышленностью России выпускается порядка 30 марок сталей, где основным легирующим элементом является марганец. Марганцовистые стали идут в основном на изготовление ответственных деталей и изделий в машиностроении для химической, металлургической промышленности в автотракторостроении и судостроении. Значительная часть изделий в данных отраслях на промежуточной стадии изготовления проходит через операции пластической деформации. Успешное осуществление, которых во многом зависит от знания свойств металлов в процессе горячей деформации. Эти необходимые свойства находят отражение в показателях пластичности Λ_p и сопротивлению деформации σ_s .

При малых степенях деформации сопротивление деформации в первом приближении, а иногда и достаточно точно, можно рассчитать с помощью термодинамических коэффициентов [1].

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \cdot K_\theta \cdot K_\varepsilon \cdot K_\xi, \quad (1)$$

где σ_{s0} – сопротивление деформации при значениях коэффициентов $K_\theta=K_\varepsilon=K_\xi=1$, θ , ε , ξ – температура, логарифмическая степень деформации, скорость деформации, соответственно. С достаточно большой степенью точности значению σ_{s0} – соответствует значение сопротивления деформации при $\theta=1000^\circ\text{C}$, $\varepsilon=0,1$ и $\xi=10\text{c}^{-1}$.

Термомеханические параметры представляют собой известные простые функции, коэффициенты которых приведены в табл. 1. Величина σ_{s0} – для каждой конкретной марки стали имеет свое значение (табл. 2).

Имеющийся в литературе материал по сопротивлению деформации показывает, что формула (1) не всегда справедлива. Так, сравнение кривых текучести для стали 09Г2ФБ, полученных экспериментально и с помощью формулы (1), дает следующую картину (рис. 1).

Таблица 1 - Коэффициенты для расчета сопротивления деформации при горячей деформации

Материал (табл.2)	Термодинамические коэффициенты					
	$K_\theta = A_1 e^{-m_1 \theta}$		$K_\varepsilon = A_2 \varepsilon^{m_2}$		$K_\xi = A_3 \xi^{m_3}$	
	A_1	m_1	A_2	m_2	A_3	m_3
1	18,17	0,0028	1,516	0,181	0,75	0,124
2	14,59	0,0027	1,629	0,212	0,726	0,139
3	11,48	0,0024	1,296	0,113	0,726	0,139
4	15,74	0,0028	1,361	0,134	0,691	0,160

$\sigma, \text{ МПа}$

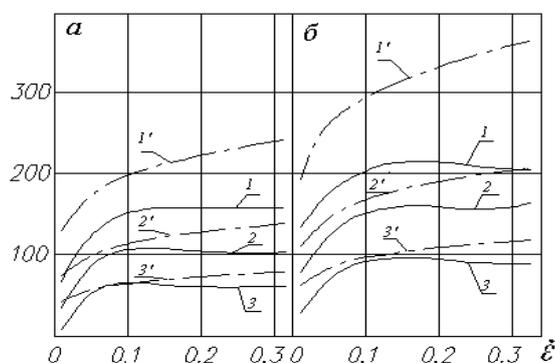


Рисунок 1 - Кривые текучести стали 09Г2ФБ, полученные экспериментально (сплошная линия) и по формуле (1) при $0,5 \text{ c}^{-1}$ (а), $12,5 \text{ c}^{-1}$ (б) и различных температурах, $^\circ\text{C}$: 1-800; 2-1000; 3-1200

Таблица 2 - Сопротивление деформации сталей, содержащих марганец при значениях термодинамических коэффициентов равных 1

Марка стали	Значение σ_{S0} , МПа
1. Легированная Mn конструкционная сталь (C<0,2%)	
10Г2	124,7
15Г	118,7
20Г	135,5
2. Легированная Mn, Cr- цементируемая сталь (C≈0,2%)	
18ХГР	120,6
18ХГ	131,0
3. Легированная Mn, Si, V- улучшаемая сталь (C<1%)	
09Г2ФБ	147,4
20ГФ2	110,8
30Г	150,5
30Г2	153,0
40Г	159,3
40Г2	167,0
40ГФ2	131,3
50ГС	158,6
50Г2	170,6
60Г	168,0
90ГФ2	132,4
4. Легированная Si-Mn пружинная сталь	
55С2	133,5
60С2	155,3
65С2	133,0

Можно показать, что к формуле (1) сводятся и используемые в отечественной практике формулы Андreyка Л.В. и Тюленева Г.Г.

$$\sigma_S = S \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon^a \cdot (10\xi)^b \cdot (\theta/1000)^c, \quad (2)$$

где σ_0 - сопротивление деформации испытанных сталей в базисной точке, ($\varepsilon = 0,1$, $\xi = 1c^{-1}$, $\theta = 1000^0 C$), S , a , b , c - расчетные коэффициенты. И формула Мигачева Б. А.:

$$\sigma_S = A \cdot \varepsilon^\alpha \cdot \xi^\beta \cdot \exp(-\gamma \cdot \theta), \quad (3)$$

где A , α , β , γ – эмпирические коэффициенты, значения которых предназначены для расчета сопротивления деформации более узких групп сталей, определяемых рамками действующих ГОСТов.

Рассмотренные в этой части статьи формулы хорошо описывают возрастающие кривые, но их нельзя использовать для описания выпуклых кривых, отражающих преобладания процесса разупрочнения над упрочнением. Причем при малых скоростях деформации максимальное значение сопротивления деформации может наступить при $\varepsilon=0,2$.

Невозможность описать семейства экспериментальных кривых текучести [1] про-

стейшими формулами (1..3), а также простейшими полиномиальными зависимостями вида

$$S = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} x_i x_j + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (4)$$

привело к отказу конструировать зависимости сопротивления деформации для всей области определения трех факторов $\theta=(800...1200)^0 C$, $\varepsilon=(0,02...0,67)$, $\xi=(0,03...140)c^{-1}$, а ограничиться зависимостями с двумя факторами $\sigma_S=\sigma_S(\xi, \varepsilon)$ или $\sigma_S=\sigma_S(\theta, \varepsilon)$. Обработка рассматриваемых семейств кривых показала, что для того, чтобы зависимости с двумя факторами были адекватными они должны строиться на основе полного полинома 5-ой степени включительно для двух переменных, т.е.

$$\begin{aligned} S = & b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2 + b_4 x_1^2 + b_5 x_2^2 + b_6 x_1^2 x_2 + \\ & + b_7 x_1 x_2^2 + b_8 x_1^3 + b_9 x_2^3 + b_{10} x_1^3 x_2 + b_{11} x_1 x_2^3 + b_{12} x_1^2 x_2^2 + \\ & + b_{13} x_1^4 + b_{14} x_2^4 + b_{15} x_1^4 x_2 + b_{16} x_1^3 x_2^2 + b_{17} x_1^2 x_2^3 + b_{18} x_1 x_2^4 + \\ & + b_{19} x_1^5 + b_{20} x_2^5, \end{aligned} \quad (5)$$

где $S = \ln \sigma_S$, $x_1 = \ln \varepsilon$, $x_2 = \ln \xi$, $x_3 = \bar{\theta}$, $\bar{\theta} = \theta/1000$.

При подборе аппроксимирующих полиномов (5) наряду со статистическими критериями значимости и адекватности использовалось визуальное сравнение совпадения расчетных и экспериментальных кривых в двух областях: $\sigma_s - \xi - \varepsilon$ (деформационные кривые) и $\sigma_s - \varepsilon - \dot{\xi}$ (кинематические кривые сопротивления деформации). Коэффициенты, приведенные в табл. 3, отвечают всем трем критериям. Некоторые коэффициенты дают высокие значения среднеквадратичного отклонения, но удовлетворительное на наш взгляд совпадение расчетных и исходных кривых, как например, на рис. 2. На рис. 3 показан результат полного совпадения расчетных и экспериментальных деформационных и кинематических кривых.

При решении задач аппроксимации на основе полинома, обнаружилось, что хорошее совпадение расчетных (по формуле) и экспериментальных деформационных кривых не является основанием даже для удовлетворительного совпадения кинематических кривых. При построении кинематических кривых с помощью полинома (5), т.е. при $\varepsilon = const$, обнаруживается явление осцилляции полиномиальной кривой. Так, невозможной оказалась аппроксимация кинематических кривых при данном уровне значений скоростей деформации при температурах 1000...1200°C для стали 20Г и при температурах 900...1200°C для стали 40Г.

В заключение отметим, что построение рис. 2 и 3, а также расчет коэффициентов в табл. 3 производится с помощью разработанных нами программ.

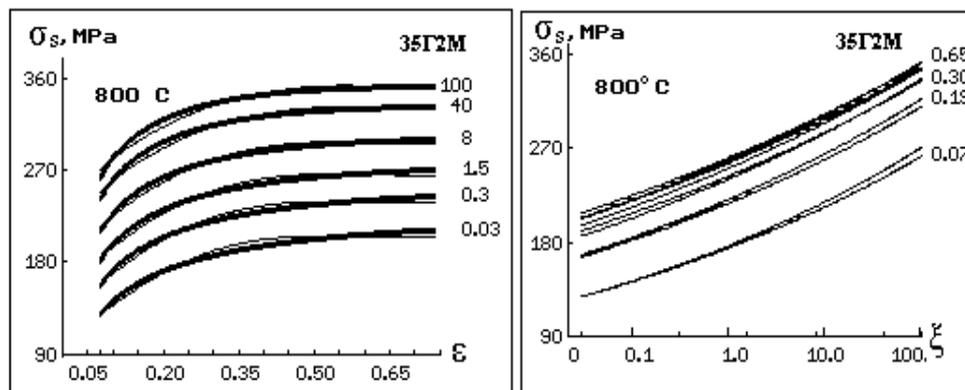


Рисунок 2 - Расчетные и экспериментальные деформационные и кинематические кривые текучести стали 35Г2М при температуре 800°C и различных скоростях деформирования

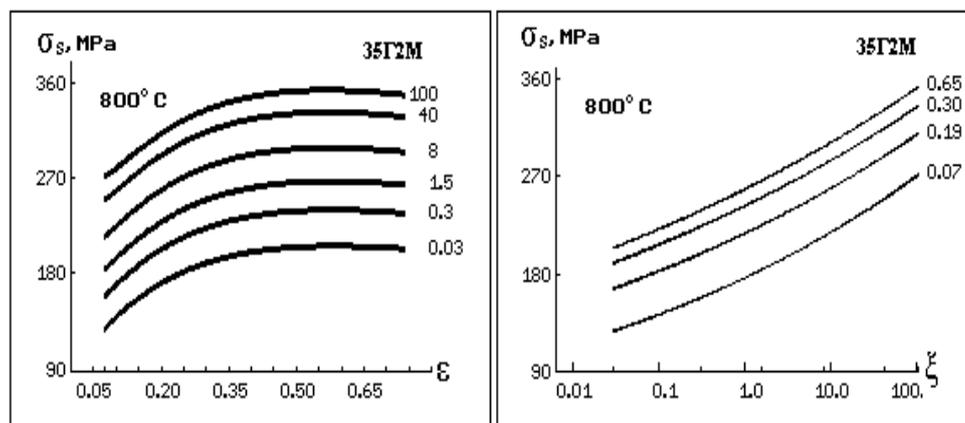


Рисунок 3 - Расчетные и экспериментальные деформационные и кинематические кривые текучести стали 35Г2М при температуре 800°C и различных скоростях деформирования

Таблица 3 - Коэффициенты полинома, описывающего кривые упрочнения некоторых сталей при различных температурах

Марка стали	Температура, °С	Остаточная дисперсия	Коэффициенты полинома
20Г	800	1,428	$b_1=5,08511; b_2=0,02148; b_3=0,03938; b_4=0,1274; b_5=-0,08372; b_6=0,01739; b_7=0,03105; b_8=-0,08096; b_9=-0,00893; b_{12}=0,01071; b_{13}=-0,01389; b_{18}=0,00159.$
	900	3,935	$b_1=4,8072; b_2=-0,2921; b_3=0,2674; b_4=0,2186; b_5=-0,0845; b_6=-0,0723; b_7=0,0383; b_8=-0,0615; b_9=0,1196; b_{13}=-0,0101; b_{14}=0,0523; b_{15}=0,0022; b_{17}=0,0009; b_{18}=0,0021; b_{19}=0,0014; b_{20}=0,0061.$
40Г	800	2,122	$b_1=5,19305; b_2=-0,17449; b_3=0,16037; b_4=0,11141; b_5=-0,082717; b_6=-0,003732; b_7=0,016136; b_8=-0,030894; b_9=0,0305; b_{12}=0,00273; b_{14}=0,00722; b_{16}=-0,00055; b_{17}=-0,00067; b_{18}=-0,00059.$
95Г	800	2,715	$b_1=4,75587; b_2=-0,78017; b_3=0,26158; b_4=0,0872; b_5=-0,51935; b_6=-0,00024; b_7=0,00757; b_8=0,00813; b_9=-0,08644; b_{10}=-0,00175; b_{11}=-0,00257; b_{12}=-0,00281; b_{13}=0,01336; b_{15}=0,00053; b_{17}=0,00303; b_{19}=0,00083.$
	900	3,329	$b_1=4,4255; b_2=-1,0323; b_3=0,2074; b_4=0,1853; b_5=-0,8138; b_6=0,0131; b_7=0,0942; b_9=-0,2153; b_{10}=0,0049; b_{11}=0,0159; b_{14}=-0,0201; b_{15}=-0,0014.$