

УДК 620.186.8:539.38:548.53

Шкатов В. В.
Шаршаков М. И.
Шкатов М. И.

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

При горячей прокатке сталей на широкополосном стане точность начальной настройки клетей чистовой группы стана в значительной мере зависит от точности расчета сопротивления деформации прокатываемого металла, величина которой определяется не только параметрами деформации (величиной, скоростью и температурой деформации), но зависит также от химического состава стали (в том числе от колебаний содержания элементов в пределах марки), структурных превращений проката во время деформации и за время пауз между обжатиями. В зависимости от химического состава стали и параметров прокатки полосы возможны следующие варианты развития рекристаллизации, приводящие к разупрочнению или упрочнению металла:

- разупрочнение за счет динамической рекристаллизации в ходе деформации;
- разупрочнение во время междеформационных пауз за счет метадинамической или статической рекристаллизации;
- упрочнение за счет суммирования наклепа в соседних клетях при отсутствии или частичном развитии процессов рекристаллизации во время междеформационных пауз.

В настоящее время известны математические модели расчета сопротивления деформации сталей при горячей прокатке на широкополосных станах [1–3], учитывающие в той или иной мере влияние процессов рекристаллизации. Основным недостатком этих моделей – отсутствие учета влияния содержания химических элементов в стали на процессы рекристаллизации, что снижает точность прогноза сопротивления деформации и ограничивает область применения моделей.

Целью работы является разработка математической модели прогноза сопротивления деформации углеродистых и низколегированных сталей при горячей прокатке в чистовой группе клетей широкополосного стана, оценка влияния процессов рекристаллизации (динамической, метадинамической и статической) на сопротивление деформации.

Для расчета сопротивления деформации углеродистых сталей (среднее напряжение течения в очаге деформации, рис. 1) в зависимости от параметров горячей прокатки и содержания углерода в стали использовали соотношение Misaka [1]:

$$\sigma_s^M = 9,8 \exp\{0,126 - 1,75[C] + 0,594[C]^2 + (2851 + 2968[C] - 1120[C]^2)/T\} \times \varepsilon^{0,21} \dot{\varepsilon}^{0,13}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где T – средняя абсолютная температура металла в очаге деформации, К; ε – истинная деформация, доли; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, с^{-1} ; $[C]$ – содержание углерода в стали, % (масс.).

При расчете сопротивления деформации низколегированных сталей σ_s^M умножали на поправочные коэффициенты, отражающие влияние легирующих элементов.

Процессы рекристаллизации металла, получающие развитие в ходе многократной деформации в клетях чистовой группы непрерывного широкополосного стана, накладывают ряд ограничительных условий на использование уравнения (1). Так, при деформации полосы в клетки выше определенного критического значения ε_c (зависит от состава стали, температуры и скорости деформации) получает развитие динамическая рекристаллизация, приводящая к разупрочнению металла в ходе деформации. Значение сопротивления деформации в этом случае определяется не величиной деформации в клетях ε , а величиной остаточного наклепа металла, зависящего от степени развития динамической рекристаллизации.

При прокатке полосы в чистовой группе клетей стана время между отдельными обжатиями изменяется от нескольких секунд до долей секунды. В этих условиях в зависимости от химического состава стали и параметров прокатки возможны несколько вариантов развития рекристаллизации в межклетьевых промежутках, приводящих к разупрочнению или упрочнению металла.

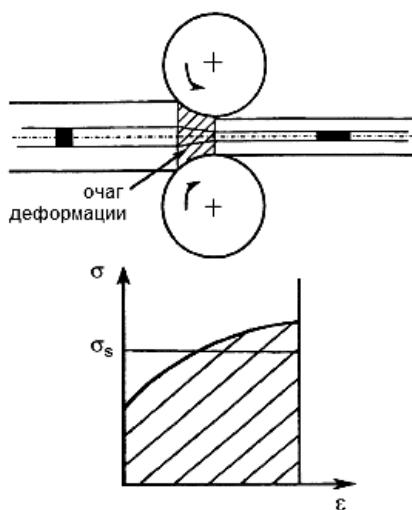


Рис. 1. Схема деформации и упрочнения металла в очаге деформации:

σ_s – сопротивление деформации (среднее напряжение течения в очаге деформации)

Если деформация в клети меньше критической для начала динамической рекристаллизации ($\varepsilon < \varepsilon_c$), то снятие наклепа в деформированной полосе за время движения в межклетьевом промежутке происходит путем статической рекристаллизации деформированного аустенита.

При деформация в клети больше критической для начала динамической рекристаллизации ($\varepsilon > \varepsilon_c$) снятие наклепа в деформированной полосе за время движения в межклетьевом промежутке происходит путем метадинамической рекристаллизации деформированного аустенита, получающей развитие сразу же после окончания деформации (без инкубационного периода).

В случае, если за время между деформациями i -ой и $(i+1)$ -ой клетях рекристаллизация завершилась не полностью или не началась, то после деформации в i -ой клети сохраняется остаточный наклеп, который суммируется с деформацией в следующей клети. Величина «накопленной» суммарной деформации для расчета сопротивления деформации в $(i+1)$ -ой клети определяется из выражения:

$$\varepsilon_{i+1}^a = \varepsilon_{i+1} + K_a(1 - X_i)\varepsilon_i, \quad (2)$$

где X_i – степень рекристаллизации (статической или метадинамической) после деформации в i -ой клети; K_a – константа, характеризующая степень развития возврата в деформированном металле.

Кинетику статической рекристаллизации описывали уравнением Аврами-Джонсона-Мела-Колмогорова:

$$X = 1 - \exp \left[-B \left(\frac{\tau}{\tau_{0,5}} \right)^n \right], \quad (3)$$

где X – степень статической рекристаллизации, доли; $\tau_{0,5}$ – время, за которое рекристаллизация проходит на 50 % при заданных параметрах деформации и размере исходного (до деформации) зерна аустенита, с; τ – текущее время, с; $B = -\ln 0,5$; n – коэффициент.

Для расчета $\tau_{0,5}$ использовали полученную авторами [4] зависимость, учитывающую наряду с параметрами деформации содержание химических элементов в стали:

$$\tau_{0,5} = 3,754 \cdot 10^{-4} \exp(-7,869 \cdot 10^{-5} Q_{rec}) \varepsilon^{-4,3} d_0^{-0,169} \dot{\varepsilon}^{-0,53} d_0^{1,09} \exp\left(\frac{Q_{rec}}{RT}\right), \quad (4)$$

где ε – истинная деформация, доли; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, s^{-1} ; T – температура, К; d_0 – размер зерна аустенита перед деформацией, мкм.

Энергия активации рекристаллизации Q_{rec} зависит от содержания химических элементов в стали и рассчитывается как:

$$Q_{rec} = 148636,8 - 71981,3 [C] + 56537,6 [Si] + 21180 [Mn] + 121243,3 [Mo] + 64469,6 [V] + 109731,9 [Nb]^{0,15}. \quad (5)$$

Кинетику рекристаллизации металла во время деформации рассчитывали по модели динамической рекристаллизации углеродистых и низколегированных сталей [5], основанную на пересчете кинетики статической рекристаллизации (уравнения (3)–(5)) к условиям монотонного роста степени деформации в ходе деформации. Для расчета структурных превращений динамически рекристаллизованного металла при последующей междеформационной паузе использовали модель метадинамической рекристаллизации [6], в основу которой положены те же принципы, что и для модели динамической рекристаллизации.

Модель расчета сопротивления деформации проката в клетях чистовой группы широкополосного стана была программно реализована средствами языка OBJECT PASCAL в среде разработки приложений DELPHI. В качестве входной используется следующая информация: химический состав стали, типоразмер готовой полосы, размер зерна аустенита на входе раската в чистовую группу клетей, температурный и деформационно-скоростной режим прокатки металла в чистовой группе клетей стана. Выходными параметрами являются степень рекристаллизации металла в клетях и межклетевых промежутках, сопротивление деформации прокатываемого металла σ_s .

Проверку адекватности модели и оценку влияния процессов рекристаллизации на сопротивление деформации проводили на массиве экспериментальных данных, содержащем информацию о деформационно-скоростных параметрах прокатки и величине сопротивления деформации в клетях чистовой группы непрерывного широкополосного стана 2000 для 100 полос толщиной 1,6–12 мм из 16 марок углеродистых и низколегированных сталей.

Таблица 1

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных значений σ_s

№ клетки чистовой группы	Средняя относительная ошибка расчета σ_s , %		
	Схема 1	Схема 2	Схема 3
1	11,81	9,32	5,97
2	6,66	4,9	2,37
3	4,37	4,1	3,65
4	4	3,92	2,46
5	4,01	12,65	3,6
6	7,64	4,18	2,69
7	12,37	5,02	9,77
Средняя по клетям	7,27	6,30	4,36

Расчеты с использованием разработанной модели показали, что при прокатке в чистой группе клетей углеродистых и низколегированных сталей динамическая рекристаллизация получает развитие в ходе деформации раската в первых двух-трех клетях. Остаточный наклеп металла после выхода из клетки затем полностью снимается метадинамической рекристаллизацией за время движения раската в межклетьевом промежутке. Дальнейшая деформация в клетях чистой группы сопровождается статической рекристаллизацией деформированного металла в межклетьевых промежутках, степень развития которой зависит от состава стали и режима прокатки.

С целью оценки влияния процессов рекристаллизации на точность прогноза σ_s расчет сопротивления деформации сталей в клетях чистой группы проводили по трем схемам:

- 1) без учета процессов рекристаллизации деформированного аустенита;
- 2) с учетом только статической рекристаллизации;
- 3) с учетом всех видов рекристаллизации (динамической, метадинамической и статической).

Результаты расчета σ_s сопоставлены с экспериментальными данными в табл. 1. Использование второй схемы позволило снизить среднюю относительную ошибку расчета σ_s в 1,2 раза по сравнению с первой схемой. При учете всех видов рекристаллизации (третья схема) средняя относительная ошибка расчета σ_s уменьшилась в 1,7 раза.

ВЫВОДЫ

Предложена математическая модель расчета сопротивления деформации углеродистых и низколегированных сталей при горячей прокатке на непрерывном широкополосном стане. Проведена оценка влияния динамической, метадинамической и статической рекристаллизации на сопротивление деформации сталей. Показано, что учет процессов рекристаллизации деформированного металла позволяет существенно повысить точность расчета величины сопротивления деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mathematical Modeling of the Mean Flow Stress, Fractional Softening and Grain Size during the Hot Strip Rolling of C–Mn Steels* / K. Minami, F. Siciliano, T. M. Maccagno, J. J. Jonas // *Iron Steel Inst. Jpn. Int.* – 1996. – Vol. 36. – P. 1500–1506.
2. *Siciliano F. Mathematical Modeling of the Hot Strip Rolling of Microalloyed Nb, Multiply-Alloyed Cr–Mo, and Plain C–Mn Steels* / F. Siciliano, J. J. Jonas // *Metallurgical and Materials Transactions A.* – 2000. – Vol. 31A. – P. 511–529.
3. *Jonas J. J. The Hot Strip Mill as an Experimental Tool* / J. J. Jonas // *Iron Steel Inst. Jpn. Int.* – 2000. – Vol. 40. – P. 731–738.
4. *Medina S. F. Improved Model for Static Recrystallization Kinetics of Hot Deformed Austenite in Low Alloy and Nb/V Microalloyed Steels* / S. F. Medina, A. Quispe // *Iron Steel Inst. Jpn. Int.* – 2001. – Vol. 41. – P. 774–781.
5. Шкатов В. В. Моделирование кинетики динамической рекристаллизации низколегированных сталей при горячей деформации / В. В. Шкатов, М. И. Шкатов // *Современная металлургия начала нового тысячелетия : сборник научных трудов четвертой международной научно-технической конференции. Ч. 1 – Липецк : ЛГТУ, 2007. – С. 131–136.*
6. Шкатов В. В. Математическое моделирование кинетики метадинамической рекристаллизации низколегированных сталей / В. В. Шкатов, М. И. Шкатов // *Современная металлургия начала нового тысячелетия : сборник научных трудов пятой международной научно-технической конференции. Ч. 1. – Липецк : ЛГТУ, 2008. – С. 97–101.*

Шкатов В. В. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ЛГТУ;
Шаршаков М. И. – аспирант ЛГТУ;
Шкатов М. И. – инженер ОАО «НЛМК».

ЛГТУ – Липецкий государственный технический университет, г. Липецк;
ОАО «НЛМК» – ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», г. Липецк.

E-mail: skatov@stu.lipetsk.ru