

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ЧЕРНОВОЙ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ

В.М. Салганик, А.М. Песин, А.А. Перехожих, Д.О. Пустовойтов, Д.Н. Чикишев

ФГБОУ ВПО Магнитогорский Государственный Технический Университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

При термомеханической прокатке черновая стадия является важным технологическим этапом, обеспечивающим формирование оптимальной структуры. Целью черновой стадии прокатки является максимальное измельчение зерна аустенита до 30-40 мкм [1]. Задачей данной работы является исследование влияния температурно-деформационных режимов черновой прокатки на размер зерна аустенита низколегированной стали.

Структура толстых листов является неравномерной по толщине, что связано прежде всего с неравномерностью деформации и температурным градиентом. Поэтому важным этапом является выбор рациональных температурно-деформационных режимов черновой стадии.

Решали симметричную неизотермическую задачу. При моделировании процесса прокатки учитывали влияние деформационного разогрева металла, теплопередачу валкам в очаге деформации, теплоотдачу конвекцией и излучением. Теплофизические коэффициенты взяты из базы данных [DEFORM](#) для микролегированных сталей. Трение описывали по закону Зибеля. Показатель трения m принят равным 0,8 [2].

Исследовали влияние режимов обжатий при черновой прокатке на размер зерна аустенита. Рассматривали три варианта прокатки сляба толщиной 300 мм (табл. 1):

- режим 1 – с обжатиями 10,23-15,13% за шесть проходов;
- режим 2 – с обжатиями 13,88-17,90% за пять проходов;
- режим 3 – с обжатиями 18,18-21,03% за четыре прохода.

Табл. 1 – Режимы черновой прокатки по различным вариантам

| Вариант | Температура нагрева сляба, 0С | Номер прохода | | | | | |
|---------|-------------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | | Степень деформации ε , % | | | | | |
| 1 | 1200 | 13,33 | 10,23 | 11,45 | 12,49 | 13,88 | 15,13 |
| 2 | 1200 | 13,90 | 13,88 | 15,51 | 17,90 | 14,26 | - |
| 3 | 1200 | 18,33 | 20,41 | 21,03 | 18,18 | - | - |

Начальный размер зерна аустенита после нагрева в печи приняли 200 мкм [3]. Время междудеформационных пауз выдерживали в интервале 1,6-15,0 с. Соппротивление деформации низколегированной описывается уравнением [4]:

$$\sigma_s = 1530u^{0,1019}\varepsilon^{0,1344}\exp(-0,00253 T), \quad (1)$$

где u - скорость деформации, c^{-1} ; ε – истинная деформация; T – температура металла, °С.

Размер зерна аустенита d_0 низколегированной стали в зависимости от начального размера зерна d_0 , времени выдержки t и температуры T описывается уравнением [5]:

$$d_\gamma = \left[d_0^3 + 5,47 \cdot 10^{20} t \exp\left(-\frac{460000}{RT}\right) \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (2)$$

Для толстолистовой прокатки характерным является прохождение метадинамической или статической рекристаллизации [3].

Одним из методов моделирования рекристаллизации являются выражения «Johnson – Mehl – Avrami – Kolmogorov» (JMAK).

Для статической рекристаллизации низколегированной стали рекристаллизованный объём [6]:

$$X_{srex} = 1 - \exp\left[-0,693\left(\frac{t}{t_{0,5}}\right)^{0,5}\right]. \quad (3)$$

Время, необходимое для прохождения 50% статической рекристаллизации низколегированной стали [6]:

$$t_{0,5} = 4,92 \cdot 10^{-17} d^1 \varepsilon^{-2} \dot{\varepsilon}^{-0,33} \exp\left(\frac{338000}{RT}\right). \quad (4)$$

После статической рекристаллизации низколегированной стали размер зерна аустенита [6]:

$$d_{rex} = 12000 d_0^{0,33} \varepsilon^{-0,79} \exp\left(-\frac{88000}{RT}\right). \quad (5)$$

На основе математического моделирования получили, что при прокатке по режимам 1 и 2 в первых трёх проходах, обжатия в которых составляют 10,23-15,13%, размер зерна аустенита практически одинаков для обоих вариантов прокатки и составляет около 100 мкм на поверхности (рис. 1, 2). При прокатке по режиму 3 с обжатиями 18,18-21,03% за четыре прохода размер зерна уменьшился с 200 до 36 мкм. Таким образом, реализация более высоких единичных обжатий (не менее 18,0%) позволяет эффективнее измельчать зерно на поверхности (с 200 до 36 мкм).

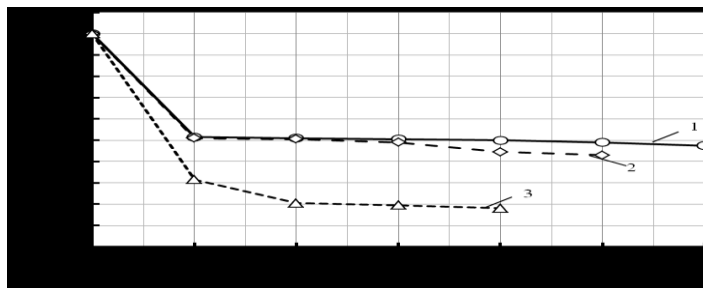


Рис. 1 - Изменение размера зерна аустенита на поверхности раската при черновой прокатке по различным режимам

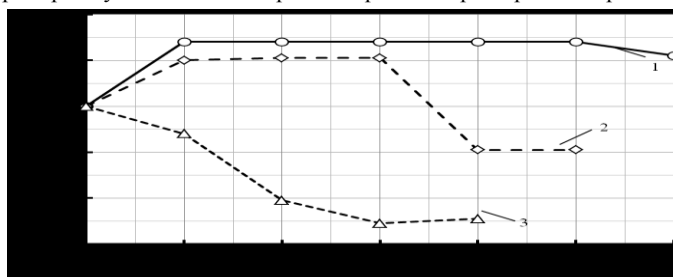


Рис. 2 - Изменение размера зерна аустенита в центре раската при черновой прокатке по различным режимам

Из рис. 2 следует, что измельчение зерна в центре при прокатке по режимам 1 и 2 (с высокой температурой нагрева и относительно небольшими обжатиями) является неэффективным. Размер зерна в центре листа после черновой прокатки составляет 220 и 180 мкм соответственно.

При прокатке по режимам 1 и 2 крупное зерно в центре листа обусловлено сохранением высокой температуры (1200-1220⁰С) и низкой деформационной прорабатываемостью центральных слоёв на всей стадии черновой прокатки (рис. 3).

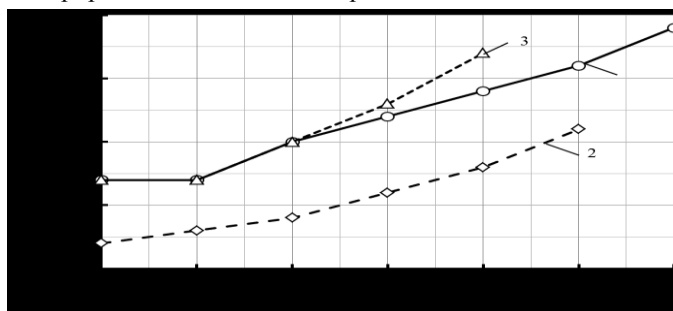


Рис. 3 - Изменение температуры в центре раската при черновой прокатке по различным режимам

С увеличением единичных обжатий (режим 3) происходит уменьшение размеров зерна в центре до 151 мкм (рис. 2). Таким образом, для более эффективного измельчения зерна в центре листа необходимо применение более высоких единичных обжатий (не менее 18,0% за проход).

Измельчение зерна аустенита на поверхности листа достигается благодаря тому, что здесь локализуется максимальная деформация и минимальная температура (рис. 4).

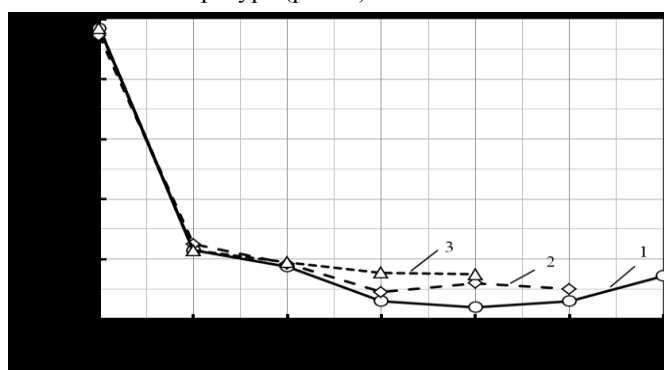


Рис. 4 - Изменение температуры на поверхности раската при черновой прокатке по различным режимам

Адекватность полученных результатов оценивали по отклонениям расчётных и действительных значений температуры поверхности раската и усилий при черновой прокатке низколегированной стали (табл. 2).

Таблица 2 - Сравнение результатов расчёта и промышленного эксперимента

| Режим | Номер прохода | Температура поверхности раската, 0С | | | Усилие прокатки, МН | | |
|-------|---------------|-------------------------------------|---------|-----------|---------------------|---------|-----------|
| | | действит. | расчет. | ошибка, % | действит. | расчет. | ошибка, % |
| 1 | 1 | 1066 | 1067 | 0,09 | 36,2 | 35,3 | 2,48 |
| | 2 | 1055 | 1046 | 0,85 | 43,0 | 42,8 | 0,46 |
| | 3 | 1032 | 1026 | 0,58 | 43,3 | 42,2 | 2,54 |
| | 4 | 1028 | 1022 | 0,58 | 41,6 | 41,4 | 0,48 |
| | 5 | 1032 | 1026 | 0,58 | 42,7 | 41,0 | 3,98 |
| | 6 | 1049 | 1049 | 0,00 | 50,7 | 54,2 | 6,90 |
| 2 | 1 | 1071 | 1070 | 0,09 | 36,5 | 35,7 | 2,19 |
| | 2 | 1050 | 1057 | 0,67 | 32,8 | 32,2 | 1,83 |
| | 3 | 1039 | 1038 | 0,09 | 32,9 | 31,6 | 3,95 |
| | 4 | 1035 | 1044 | 0,86 | 33,1 | 32,2 | 2,72 |
| | 5 | 1039 | 1040 | 0,09 | 48,6 | 46,8 | 3,70 |

Выводы:

- На основании численного моделирования получено:
 - при единичных обжатиях 10-17,9% размер зерна аустенита уменьшается с 200 до 86 мкм на поверхности и до 181 мкм в центре раската;
 - при единичных обжатиях 18-21% средний размер зерна аустенита уменьшается с 200 до 36 мкм на поверхности и до 151 мкм в центре раската.
- Крупное зерно в центре обусловлено сохранением высокой температуры (1200-1220⁰С) и низкой деформационной прорабатываемостью центральных слоёв раската при черновой прокатке.
- Для получения зерна аустенита размером 30-40 мкм на поверхности раската необходимо:
 - черновую прокатку вести при единичных обжатиях не менее 18%;
 - время пауз между проходами должно быть достаточным для прохождения статической рекристаллизации (5-15 с).

Список литературы

- Шабалов И.П., Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И. Стали для труб и строительных конструкций с повышенными эксплуатационными свойствами. М.: Металлургиздат, 2003. 520 с.
- Kobayashi S., Oh S. I., Altan T. *Metalfforming and the Finite-Element Method*. Oxford University Press, 1989. 377 p.
- Jonsson M. An Investigation of Different Strategies for Thermo-mechanical Rolling of Structural Steel Heavy Plates // *ISIJ International*, Vol. 46 (2006), No. 8, pp. 1192-1199.
- Салганик В. М., Денисов С.В., Крайнов В.И. Сопrotивление деформации ниобийсодержащих сталей новых марок // *Производство проката*. 2007. №6. С. 15-18.
- Némethová L., Kvačakaj T., Mišičko R. Structural Changes Of C-Mn-Nb-V Steel During The Reheating // *Acta Metallurgica Slovaca*. 15. 2009. 3 pp. 173-179.
- Brimacombe J.K., Samarasekera I.V., Hawbolt E.B. *Microstructure engineering in hot strip mills: Integrated Mathematical Model* // Report, AISI. 1998, 90 p.