

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ЧЕРНОВОЙ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ

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

*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 $\varepsilon$ , %					
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. Сопротивление деформации низколегированной описывается уравнением [4]:

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

где  $u$  - скорость деформации, с<sup>-1</sup>;  $\varepsilon$  – 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» (ЖМАК).

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).

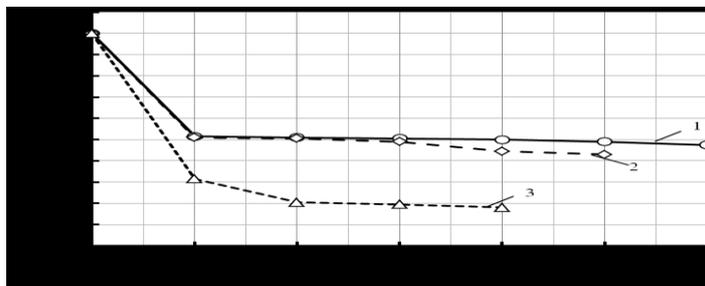


Рис. 1 - Изменение размера зерна аустенита на поверхности раската при черновой прокатке по различным режимам

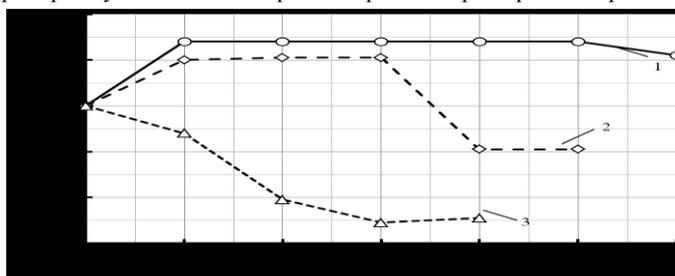


Рис. 2 - Изменение размера зерна аустенита в центре раската при черновой прокатке по различным режимам

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 (1200-1220<sup>0</sup>С) и низкой деформационной прорабатываемостью центральных слоёв на всей стадии черновой прокатки (рис. 3).

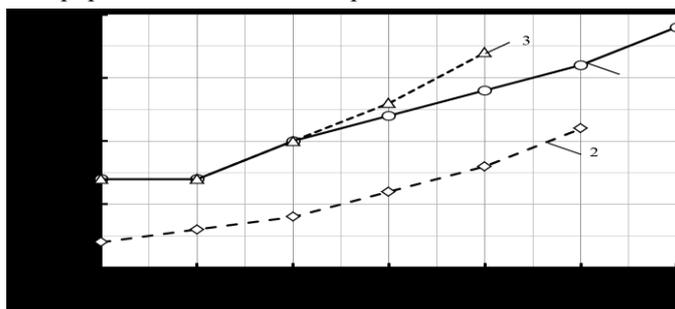


Рис. 3 - Изменение температуры в центре раската при черновой прокатке по различным режимам

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).

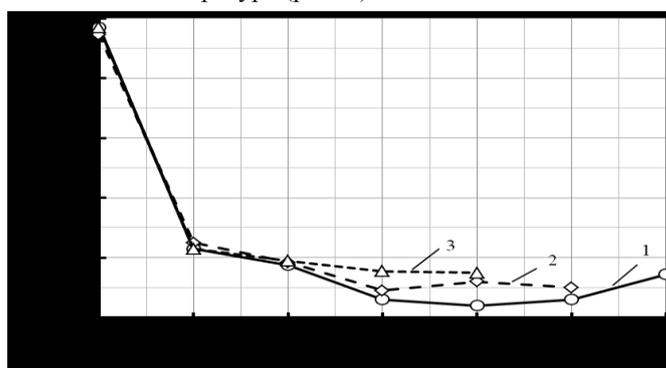


Рис. 4 - Изменение температуры на поверхности раската при черновой прокатке по различным режимам

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 (1200-1220<sup>0</sup>С) 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. Metalforming 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., Kvačkaj 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.