

Библиографический список

1. Goldratt Elyahu M. The haystack syndrome: sifting information out of the data ocean. NY.: North River Press, 1990. 262 p.
2. Реализация концепции производственного планирования на основе эффективного использования ограничений / Сеничев Г.С., Салганик В.М., Шмаков В.И. и др. М.: Экономика, 2006. 212 с.

УДК 621.771.237:621.771.23.016

М. И. Румянцев, Г. А. Завалищин, Н. Б. Орлов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОЙ СТАЛИ С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СЛУЖЕБНЫХ СВОЙСТВ ПРОДУКЦИИ И РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ**

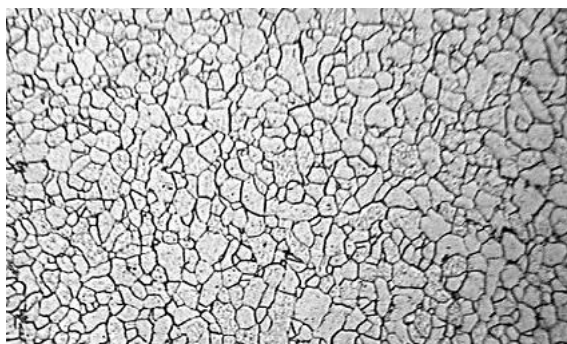
В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к росту производства холоднокатаного проката из низкоуглеродистой стали с содержанием углерода менее 0,02%, которая должна иметь повышенную штампуемость как без покрытия, так и с цинковым покрытием. Пониженные прочностные свойства горячекатаного проката из подобных сталей в некоторой степени облегчают задачу получения холоднокатаной полосы с высокой планшетностью, а также способствуют расширению возможностей производства горячекатаных листов и полос для замещения холоднокатаных.

В период освоения производства подобной продукции в ОАО «ММК» одной из проблем была значительная разнородность микроструктуры горячекатаного металла (5–7 балл в середине и 3–4 на поверхности), а также неравномерные выделения цементита по границам крупных зерен. При этом наблюдались благоприятные прочностные свойства ( $\sigma_t=240\text{--}290$  МПа,  $\sigma_b=320\text{--}350$  МПа), но пониженная пластичность ( $\delta_4=25\text{--}34\%$  при целевом значении не менее 36%).

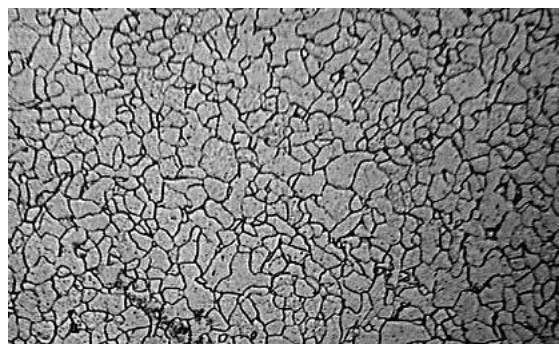
Для улучшения микроструктуры выполнили

исследования по совершенствованию процесса охлаждения полосы на отводящем рольганге широкополосного стана горячей прокатки (ШСП) 2000 ОАО «ММК» с использованием математической модели выбора первого приближения режима охлаждения [1–3]. Компьютерным моделированием, в частности, установили, что для обеспечения однородности структуры необходимо повысить температуру конца прокатки от 830°C по традиционной технологии до 930°C, а для предотвращения крупнозернистости процесс охлаждения водой следует начинать первыми секциями установки ускоренного охлаждения. Опытная прокатка, при которой  $t_{кн}$  колебалась в диапазоне от 925 до 930°C, показала, что применение нового режима охлаждения значительно улучшает однородность структуры, особенно по толщине полосы. Поверхностный слой с крупным зерном практически исчезает (рис. 1). При этом указанные выше прочностные характеристики остаются на том же уровне, а относительное удлинение увеличивается до 36–41%.

При разработке режимов последующей холодной прокатки необходима кривая упрочнения, но



а



б

Рис. 1. Микроструктура поверхности (а) и середины (б) полосы толщиной 2,8 мм из стали 08Ю (C=0,03%) после охлаждения по усовершенствованному режиму

для сталей с пониженным содержанием углерода такая кривая не известна. Для ее построения валками диаметром 500 мм прокатывали образцы исходной толщины 3,0–3,3 мм из стали с содержанием углерода 0,004–0,014% по схеме дробного накопления суммарной деформации. Затем проводили испытание на растяжение с записью индикаторной диаграммы. Результаты испытаний представлены на рис. 2 в виде приращения предела текучести  $\Delta\sigma = \sigma_H - \sigma_{02}(\varepsilon_\Sigma)$ , где  $\varepsilon_\Sigma$  – суммарное обжатие;  $\sigma_H$  – условный предел текучести в ненаклепанном состоянии, т.е. при  $\varepsilon_\Sigma = 0$ .

С учетом наиболее распространенных подходов к отображению кривых упрочнения для расчетов сопротивления деформации при холодной прокатке [4, 5], методом наименьших квадратов построили следующие аппроксимации:

$$\Delta\sigma = 10,1\varepsilon_\Sigma^{0,88}; \tag{1}$$

$$\Delta\sigma = 56,27\sqrt{\varepsilon_\Sigma} - 82,5. \tag{2}$$

Оба уравнения регрессии статистически надежны с доверительной вероятностью 95%, но в то время как для степенной зависимости (1) коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2=0,640$ , для зависимости (2)  $R^2=0,865$ . Из рис. 2 видно, что зависимость (2) действительно более точно описывает влияние обжатия на  $\Delta\sigma$ . Поэтому кривую упрочнения малоуглеродистых сталей с содержанием углерода 0,014–0,04% предпочтительнее отобразить в следующем виде:

$$\sigma_{02} = \sigma_H + 56,27\sqrt{\varepsilon_\Sigma} - 82,5. \tag{3}$$

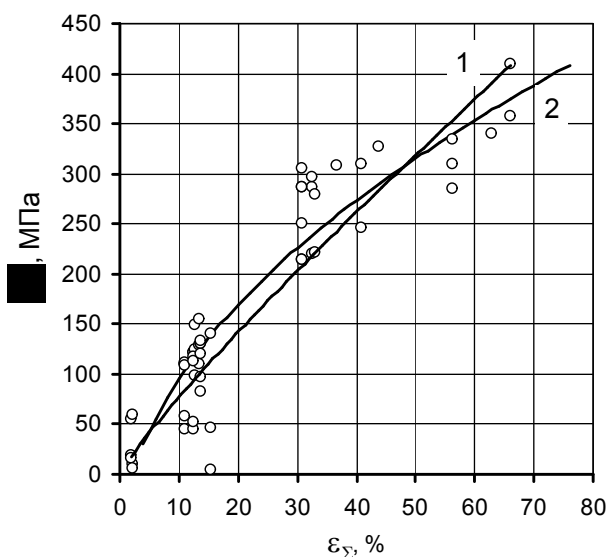


Рис. 2. Влияние суммарного обжатия сталей с пониженным содержанием углерода на приращение предела текучести: 1 – по формуле (1); 2 – по формуле (2)

Так как сталь с пониженным содержанием углерода обладает низким сопротивлением деформации, становится возможным увеличить толщину подката для производства холоднокатаной стали. Однако при этом эффект, заключающийся, например, в увеличении производительности ШСГП, может быть нивелирован трудностями переработки металла в цехе холодной прокатки. Так, увеличение толщины подката приведет к возрастанию вытяжки при холодной прокатке и соответственно длины полосы. При объективно существующих ограничениях на скорость холодной прокатки [6] следствием подобных изменений может стать увеличение машинного времени и снижение производительности стана холодной прокатки.

В ОАО «ММК» технологическая система для производства холоднокатаного металла с цинковым покрытием включает двухклетевой реверсивный стан 1700 [7]. Такие станы появились в 90-х годах 20 века как экономически эффективное решение для производства холоднокатаной листовой стали в количестве до 500–900 тыс. т/год и получили специфическое обозначение – ССМ (Compact

Таблица 1

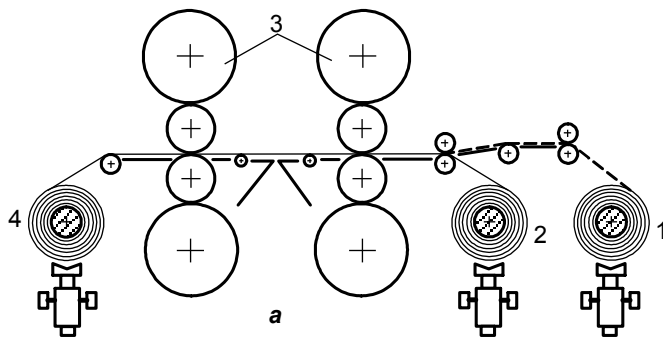
Операции при прокатке бесшовного рулона на стане ССМ за два прохода

Технологические операции	Участок тахограммы
1. Подача рулона к разматывателю	—
2. Установка рулона на барабан разматывателя	
3. Подача переднего конца полосы до моталки 1	
4. Транспортировка переднего конца полосы от моталки 1 до реверсивной моталки 2	$\tau_{0нк}^{(1)}$
5. Заправка полосы на реверсивную моталку 2	
6. Остановка стана, сведение валков	$\tau_{птк}$
7. Разгон стана до рабочей скорости	
8. Прокатка на установившейся скорости $V_{уст}^{(1)}$	$\tau_{уст}^{(1)}$
9. Замедление перед задним концом	$\tau_{тзк}$
10. Прокатка на заправочной скорости $V_0$ для выдачи заднего конца с разматывателя до моталки 1	$\tau_{0зк}^{(1)}$
11. Остановка стана, разведение валков	$\tau_{рев}$
12. Реверс	
13. Заправка полосы в моталку 1	
14. Остановка стана, сведение валков	
15. Разгон стана до рабочей скорости	$\tau_{рзк}$
16. Прокатка на установившейся скорости $V_{уст}^{(2)}$	$\tau_{уст}^{(2)}$
17. Торможение перед выпуском полосы из стана	$\tau_{тнк}$
18. Смотка конца полосы	$\tau_{0нк}^{(2)}$
19. Снятие рулона с моталки	—

cold mill) [8]. На подобном стане могут быть реализованы, по крайней мере, 3 стратегии прокатки: двукратная (рис. 3, б), четырехкратная (рис. 3, в) и шестикратная (рис. 3, г), что соответствует случаям прокатки на двухклетевом, четырехклетевом и шестиклетевом непрерывных станах. Методика оценивания производительности стана ССМ в литературе не описана и поэтому представляет значительный практический интерес.

Наблюдения за работой ССМ 1700 ОАО «ММК» показали, что процесс прокатки одного рулона может быть представлен как совокупность операций, указанных в табл. 1, а для расчета цикла прокатки допустимо рассматривать упрощенную тахограмму (рис. 4). Затраты времени на выполнение операций 1, 2 и 19 не учитываются, т. к. они выполняются с перекрытием.

Составляющие цикла прокатки (отдельные времена на тахограмме) легко определяются по



известным формулам [9]. Однако в расчетах необходимо использовать такие параметры скоростного режима, как  $V_{уст}$ , ускорение  $a_p$  и замедление  $a_m$ , а также время реверса  $\tau_{рев}$ . Расчеты ритма прокатки по формулам [9] при фактических значениях перечисленных параметров показали достаточно высокую сходимость с практическими данными (рис. 5). Таким образом, именно от обоснованности значений  $V_{уст}$ ,  $a_p$ ,  $a_m$  и  $\tau_{рев}$  зависят обоснованность и достоверность результатов расчета производительности стана.

Чтобы повысить объективность выбора значений  $a_p$ ,  $a_m$  и  $\tau_{рев}$ , рассмотрели их выборочные распределения вероятности. При этом, исходя из результатов предварительного анализа, ускорения и замедления в каждом проходе анализировали отдельно. Выборочные характеристики положения центров вариации приведены в табл. 2.

В связи с очевидным несоответствием полученных выборочных распределений нормальному закону в качестве наиболее подходящей оценки положения центра вариации каждого из параметров приняли выборочную медиану  $\tilde{x}$ , а ее доверительные границы определяли по формуле [10]:

$$\Delta_{\tilde{x}} = m_3 \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Рис. 3. Стан ССМ (а) и стратегии прокатки (б-г):

1 – разматыватель; 2 – моталка № 2; 3 – рабочие клетки; 4 – моталка № 1

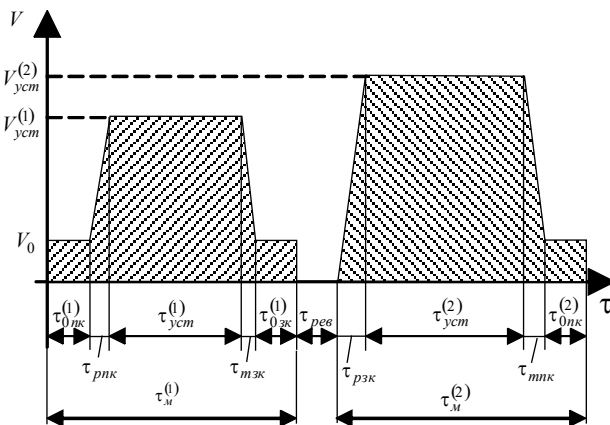


Рис. 4. Модель тахограммы прокатки бесшовного рулона на стане ССМ по стратегии рис. 2, в (обозначения – в табл. 1)

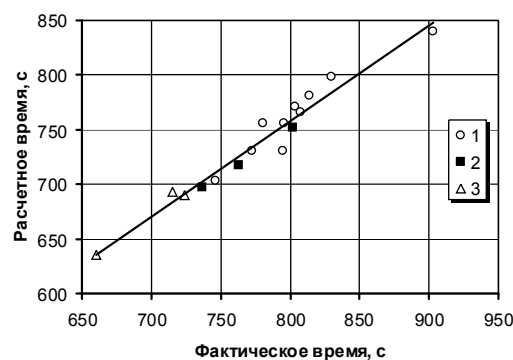
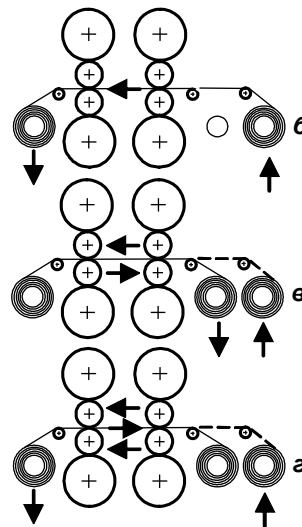


Рис. 5. Сравнение фактического и расчетного ритма прокатки на двухклетевом реверсивном стане: 1 – полосы 0,5?1250-1280 мм из подката толщиной 1,8 мм; 2 и 3 – полосы 0,58?1086 и 0,48?1250 мм из подката толщиной 2,0 мм

Таблица 2

**Выборочные характеристики распределений параметров скоростного режима стана ССМ и значения, рекомендуемые для использования в расчетах**

Характеристика	$a_p, \text{M/C}^2$		$a_m, \text{M/C}^2$		$\tau_{рев}, \text{C}$
	1*	2	1	2	
Минимум	0,26	0,23	0,26	0,30	40,0
Максимум	0,45	0,42	0,70	0,58	87,0
Среднее	0,37	0,35	0,42	0,43	64,7
Медиана	0,40	0,37	0,39	0,40	62,0
Стандартное отклонение	0,07	0,06	0,15	0,09	13,0
Доверительные границы медианы	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,04$	$\pm 0,02$	$\pm 3,2$
Диапазон рекомендуемых значений	0,38–0,42	0,35–0,39	0,35–0,43	0,38–0,42	58,8–65,2

\* Номер прохода.

где  $s$  – выборочное стандартное отклонение соответствующего параметра;  $m_3 > 1$  – коэффициент, величина которого зависит от объема выборки  $n$  [9].

Найденные из указанных предпосылок диапазоны значений ускорения, замедления и времени реверса стана ССМ также приведены в табл. 2.

Таким образом, модель скоростного режима в виде тахограммы, изображенной на рис. 2, известные зависимости [9] для расчета отдельных временных интервалов данной тахограммы, выбор значений ускорения, замедления а также времени реверса из диапазонов, указанных в табл. 2, позволяют выполнять расчет производительности реверсивного многоклетевого стана холодной прокатки, результаты которого обладают достоверностью и обоснованностью.

Для повышения служебных свойств тонколистового проката из малоуглеродистых сталей с содержанием углерода не более 0,02% и результативности технологии его производства выполнено компьютерное моделирование охлаждения на отводящем рольганге широкополосного стана горячей прокатки, результаты которого позволили усовершенствовать режим охлаждения и улучшить пластические свойства металла. Выполнен эксперимент по определению влияния дробного суммарного обжаривания на предел текучести сталей

указанного класса, результаты которого позволили впервые построить кривую упрочнения для расчета их сопротивления деформации при холодной прокатке. Выполнено исследование и разработана модель скоростного режима двухклетевого реверсивного стана холодной прокатки, на основе которой впервые разработана достоверная методика расчета его производительности.

**Библиографический список**

1. Моделирование охлаждения на отводящем рольганге ШСГП 2000 ОАО ММК / В.М. Салганик, М.И. Румянцев, Г.А. Завалищин, Р.А. Исмагилов // *Материаловедение и термическая обработка металла: Междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 32–44.*
2. Салганик В.М., Румянцев М.И., Завалищин Г.А. Моделирование охлаждения на отводящем рольганге ШСГП // *Теория и практика производства листового проката: Сб. научн. трудов. Липецк: ЛГТУ, 2005. С. 19–25.*
3. Салганик В.М., Румянцев М.И., Завалищин Г.А. Выбор режимов охлаждения на отводящем рольганге ШСГП для сталей с различным содержанием углерода // *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. С. 70–76.*
4. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: *Металлургия, 1973. 224 с.*
5. Грудев А.П., Сигалов Ю.Б. Методика определения предела текучести металла при холодной прокатке с учетом влияния основных факторов деформации // *Обработка металлов давлением: Науч. тр. Днепропетровского металлург. ин-та. М.: *Металлургия, 1971. № 56. С. 47–55.**
6. Методы выбора режимов и расчета параметров при автоматизированном проектировании тонколистовой прокатки / Салганик В.М., Медведев Г.А., Румянцев М.И. и др. // *Труды третьего конгресса прокатчиков. М.: АО «Черметинформация», 2000. С. 180–187.*
7. Создание и освоение двухклетевого реверсивного стана холодной прокатки / В.Ф. Рашников, Р.С. Тахаутдинов, А.И. Антипенко и др. // *Сталь. 2003. № 7. С. 41–45.*
8. ССМ – Compact Cold Mills // SMS DEMAG AG, Hot and Cold Rolling Mills Division. Hilchenbach, Germany, 2001. 8 p. Англ.
9. Оптимальная производительность станов холодной прокатки / Г.Л. Химич, А.В. Третьяков, Э.А. Гарбер и др. М.: *Металлургия, 1970. 90 с.*
10. Статистическое управление процессами. SPC / В.А. Липидус, А.В. Глазунов, И.Н. Рыбаков и др. Н. Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2004. 181 с.