



ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 621.771

ОБОРУДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПАО НКМЗ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ЛИСТА

Суков Геннадий Сергеевич, кандидат экономических наук

Действительный член Академии экономических наук Украины Украинской технологической академии, Председатель Правления, генеральный директор ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», ул. Орджоникидзе, 5, г. Краматорск, Донецкая область, Украина, 84305
E-mail: ztm@nkmz.donetsk.ua

Тиунов Владимир Николаевич

Директор производства прокатного оборудования, ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», ул. Орджоникидзе, 5, г. Краматорск, Донецкая область, Украина, 84305
E-mail: tiunov@nkmz.donetsk.ua

Гриценко Сергей Анатольевич

Главный инженер проекта производства прокатного оборудования, ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», ул. Орджоникидзе, 5, г. Краматорск, Донецкая область, Украина, 84305
E-mail: bhps@nkmz.donetsk.ua

Наведено дані про вдосконалення конструкції машини роликового типу, що забезпечує можливість роботи в режимах загартування і перерваного охолодження (РЗМ) в технології листової прокатки. Описано результати експериментально-промислових досліджень в цехових умовах, що дозволяє зробити висновок про розширення технологічних можливостей і керованості такого типу машин при зниженні маси обладнання та скороченні термінів виходу на проектні показники.

Приведены данные о совершенствовании конструкции машины роликового типа, обеспечивающей возможность работы в режимах закалки и прерванного охлаждения (РЗМ) в технологии листовой прокатки. Описаны результаты экспериментально-промышленных исследований в цеховых условиях, позволяющий сделать вывод о расширении технологических возможностей и управляемости такого типа машин при снижении массы оборудования и сокращении сроков выхода на проектные показатели.

1. Введение

Производство толстого листа как продукта проката занимает существенную долю в общем сегменте производства проката — до 26 % [1]. Специфические особенности эксплуатации такого типа продукции металлургического производства в последние десятилетия стимулирует повышение требований к качеству толстолистовой стали. В частности, с развитием автоматизации сварочных операций актуальной становится потребность в толстолистовой стали с хорошей свариваемостью, а для снижения массогабаритных характеристик металлоконструкций необходима сталь повышенной прочности. Для стальных нефте- и газопроводов, работающих в условиях низких температур, возрастает потребность в стальных листах с повышенной ударной вязкостью. Все эти обстоятельства обуславлива-

ют необходимость разработки новых технологий прокатного производства. Причем обязательным условием эффективного производства листового проката является наличие в структуре цеха и линии прокатного стана средств принудительного охлаждения листа, реализующих широкий спектр режимов термообработки, как с прокатного, так и с печного нагрева.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Исследования в области совершенствования технологий листовой прокатки носят многовекторный характер — от рассмотрения вопросов, связанных с управлением формированием структуры стали в технологическом процессе, до системного представления процесса как части функционирования

единого металлургического комплекса. В контексте последнего подчеркивается необходимость более гибкого подхода к планированию металлургического производства, частью которого является процесс прокатки [2], предполагающего математическое моделирование для оценивания влияния входных переменных процесса на параметры качества готового проката. Учитывая особенность металлургического производства, связанную с наличием существенной неопределённости в оценивании входных переменных технологических процессов, возможно применение многомерного регрессионного анализа [3] или нелинейного программирования (MINLP), позволяющего строить модель процесса для оптимального планирования с учетом ограничений, накладываемых производством и возможностями стана. В последнем случае предложены две стратегии решения задачи: первая заключается в преобразовании первоначальной формулировки MINLP к приближенному целочисленному линейному программированию с использованием классического метода линеаризации, второй заключается в разложении исходной модели, используя метод ветвей и границ на основе итерационного метода [2].

В работе [4] была выполнена попытка увязать технологию процесса с усталостью материала и ростом трещины в сталях холодного проката с различной микроструктурой при комнатной температуре, а в работе [5] с целью повышения механических свойств листового проката исследовалось влияние легирующих элементов на свойства стальных высокопрочных листов. При этом особое внимание уделялось мартенситному превращению и его поведению при авто-отпуске. Стальные листы нагревали до 1093 К и выдерживали в течение 180 с, затем охлаждали со скоростью 10 К/с до 773 К и выдерживали в течение 90 сек с последующим охлаждением со скоростью 10 К/с до комнатной температуры. Выбранный режим обеспечил получение структуры стали, состоящей в основном из мартенсита и феррита. Дополнительное легирование обеспечило увеличение прочности при растяжении стали Fe-0,15C-1,5Si-2,3Mn с 1050 МПа до более чем 1180 МПа. При этом было установлено, что изменение величины предела прочности на растяжение коррелирует с твердостью мартенсита и зависит от температуры начала мартенситного превращения (M_s), а увеличение содержания углерода снижает M_s и вызывает серьезное ухудшение коэффициента линейного расширения. В противоположность этому, Cr и/или V, добавленные в сталь, значительно повышают прочность на растяжение [5].

Вопросы развития методов термической обработки, совмещенной с процессом прокатки, нашли отражение в работе [6], в которой, в частности, описано сочетание ультра-быстрого прямого процесса

охлаждения с коротким интервалом многоходовой горячей прокатки для производства наноструктурированных стальных листов. Реализация такого подхода позволила измельчить зерно в микроструктуре, что обусловлено, по мнению авторов, статической трансформацией аустенита в феррит.

Задача повышения пластичности сталей при одновременном сохранении высоких прочностных свойств решалась авторами работы [7], при этом техническим решением для достижения цели предлагалось применение лазерных технологий. Было установлено, что один лазерный луч подходит для термической обработки листов с толщиной поперечного сечения до 6 мм. В случае толстых листов, максимальная температура в поперечном сечении зависит от глубины, при этом микроструктура и механические свойства отличаются между поверхностью и центром поперечного сечения. В результате проведенного анализа результатов было установлено, что лазерной термообработкой может быть достигнуто улучшение прочности на изгиб без значительных потерь других показателей прочности. Существует взгляд относительно того, что получение металла с мелкозернистой ферритной структурой стали в технологии прокатки возможно реализацией технологии контролируемой прокатки толстых листов без последующей термической обработки в печах [1].

Все это позволяет сделать заключение о том, что представляется перспективным использование термообработки, однако непосредственно за счет совмещения с процессом проката. Иными словами, в условиях высокопроизводительных толстолистовых станов с развитым размерным и марочным сортаментом поставленную задачу целесообразно решать применением оборудования, которое обеспечивает контролируемый процесс термообработки в процессе перемещения раската без изменения направления движения при достаточно равномерном по его площади охлаждении, исключающем нарушение плоскостности. К такому оборудованию относятся машины роликового типа, конструкция которых позволяет работать в режимах закалки и прерванного охлаждения (РЗМ).

3. Цель и задачи исследования

Цель работы состояла в совершенствовании режимов закалки и прерванного охлаждения в процессе листовой прокатки. Для достижения данной цели необходимо было решение двух задач в условиях реального промышленного производства:

- ➔ совершенствование конструктивной схемы машины роликового типа;
- ➔ экспериментально-промышленная отработка рациональных режимов закалки и прерванного охлаждения.

4. Совершенствование конструкции машины роликового типа

Разработки ПАО НКМЗ по совершенствованию РЗМ, направлены, прежде всего, на расширение их технологических возможностей и управляемости при снижении массы оборудования и сокращении сроков выхода на проектные показатели.

РЗМ ПАО НКМЗ отличается от аналогов: простотой, компактностью, высокой надёжностью базовых узлов, применением гидропривода в блоках их настройки, перемещения, а также силового воздействия на листы; автоматизированной системой управления с программным обеспечением автоматизированного рабочего места технолога; высокоэффективной системой охлаждения листа, отличающейся рядом оригинальных технических решений [8, 9].

Фрагмент схемы РЗМ конструкции ПАО НКМЗ показан на **рис. 1**.

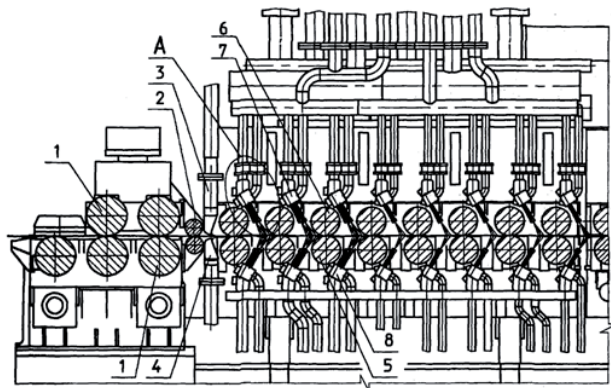


Рис. 1. Фрагмент схемы РЗМ конструкции ПАО НКМЗ
 1 — ролики задающие, 2 — ролики отжимные, 3(4) — верхний (нижний) щелевой коллектор, 5(6) — нижний транспортировочный (верхний прижимной) ролики, 7(8) — верхний (нижний) коллекторы с плоскофакельными форсунками

По ходу движения обрабатываемого раската РЗМ разделена на зоны интенсивного и малоинтенсивного охлаждения. Максимальная скорость охлаждения (более 120 град/с) достигается в зоне интенсивного охлаждения благодаря применению коллектора щелевого типа с факелом струи, направленным на поверхность раската под углом не более 25° и двухкамерных коллекторов с плоскофакельными форсунками с факелом струи, направленным на поверхность раската под углом не более 60° (**рис. 2**).

Применение двухкамерных коллекторов существенно повысило управляемость процесса термообработки, поскольку диапазон изменения расхода воды увеличился не менее чем в 1,9 раза.

Конструкция системы охлаждения в совокупности с автоматизированной системой управления подачей воды позволяет оптимально распределять

ее потоки по ширине и длине листа, а также устанавливать благоприятные соотношения расходов воды сверху и снизу в каждой охлаждающей секции.

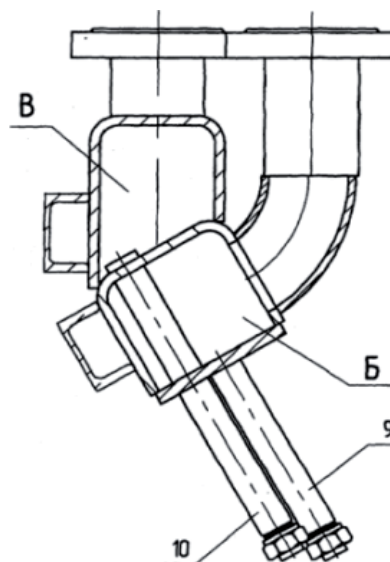


Рис. 2. Двухкамерный коллектор с плоскофакельными форсунками (вид по А **рис. 1**) В и Б камеры коллектора с форсунками фирмы «Lechler». 9 и 10 соответственно

Требуемый уровень качества термообработки обеспечивается системой автоматизированного управления технологическими процессами, с помощью которой реализуются заданные режимы работы ее систем, осуществляется контроль входных и выходных параметров управляемых объектов.

РЗМ легко адаптируется к термообработке нового размерного и марочного сортамента благодаря автоматизированному рабочему месту технолога (АРМ). АРМ технолога включает автономную математическую модель и программу расчета режима закалки листов нового сортамента [10, 11].

РЗМ конструкции ПАО НКМЗ установлены на металлургическом заводе HSW — Huta Stali (Польша, 2007 год) и ОАО «Северсталь» (Россия, 2013 год). Основные технические характеристики РЗМ, определяющие их технологические возможности, приведены в **табл. 1**.

5. Оценка технической эффективности предложенной схемы РМЗ

Оценка технической эффективности РМЗ конструкции ПАО НКМЗ выполнена по следующим показателям: скорость охлаждения, плоскостность, качество закалки.

Скорость охлаждения. В качестве оценки скоростью охлаждения при термообработке принята скорость охлаждения подповерхностных слоев листа (на глубине $3,5 \pm 0,5$ мм) в диапазоне температур 800–700 °С.

Таблица 1

Характеристики исследованных РЗМ конструкции НКМЗ

№ пп	Характеристика		Предприятие		
			HSW – Huta Stali (Stalowa Wola), Польша	ОАО «Северсталь», Россия	
1	Размеры обрабатываемых листов, мм	толщина	3–30	8–50	
		ширина	1000–2100	1500–2500	
		длина	2000–13000	4000–12000	
2	Технологическая длина машины*, м		9,33	10,11	
3	Расстояние от окна выдачи печи до оси первого коллектора, м		1,7	4,95	
4	Ширина зоны орошения, мм		2200	2700	
5	Скорость движения листа в РЗМ, м/с		0,05–1,2	0,05–1,2	
6	Расход воды максимальный, м ³ /ч		2400	3400	
7	Давление воды максимальное, бар		8	6	
8	Число зон охлаждения**		5/5	7/7	
9	Число коллекторов по зонам охлаждения**	интенсивного охлаждения (И)	№ 1	1/1	1/1
			№ 23	3/3	4/4
		малоинтенсивного охлаждения (МИ)	№ 12	5/5	5/5
			№ 3	7/7	3/3
			№ 4	8/8	5/5
			№ 5	–	4/4
		№ 6	–	4/4	
Всего	24/24	26/26			
10	Расход воды по зонам охлаждения**, м ³ /ч	интенсивного охлаждения (И)	№ 1	(100–450)/(100–450)	(250–650)/(250–650)
			№ 23	(65–250)/(90–340)	(90–410)/(115–510)
		малоинтенсивного охлаждения (МИ)	№ 12	(70–250)/(80–290)	(80–320)/(90–360)
			№ 3	(80–220)/(80–320)	(85–190)/(95–215)
			№ 4	(80–240)/(80–350)	(85–205)/(115–255)
			№ 5	–	(70–165)/(90–205)
		№ 6	–	(70–165)/(90–205)	
11	Плотность орошения по зонам охлаждения**, м ³ /м ² ч	и интенсивного охлаждения (И)	№ 1	(57–256)/(57–256)	(116–300)/(116–300)
			№ 23	(25–95)/(34–129)	(21–95)/(27–119)
		малоинтенсивного охлаждения (МИ)	№ 12	(16–55)/(18–64)	(15–59)/(17–67)
			№ 3	(13–36)/(13–55)	(27–59)/(30–67)
			№ 4	(11–33)/(11–49)	(16–38)/(21–47)
			№ 5	–	(16–38)/(21–48)
№ 6	–	(16–38)/(21–48)			

* расстояние в осях первого и последнего коллекторов;
** числитель – верхнее охлаждение, знаменатель – нижнее охлаждение

Изменение температуры по толщине листа экспериментально зафиксировано в процессе его прохождения через активную зону РЗМ. Методика эксперимента разработана и реализована совместно со специалистами НПО ДОНИКС [12]. Суть методики заключается в подготовке и использовании термопарных комплектов, каждый из

которых представляет собой лист с зачеканенными в пробку термопарами, подключенными к системе сбора и регистрации их показаний.

На рис. 3 в качестве примера показан процесс охлаждения листа одного из термопарных комплектов за время его обработки в РЗМ Северстали.

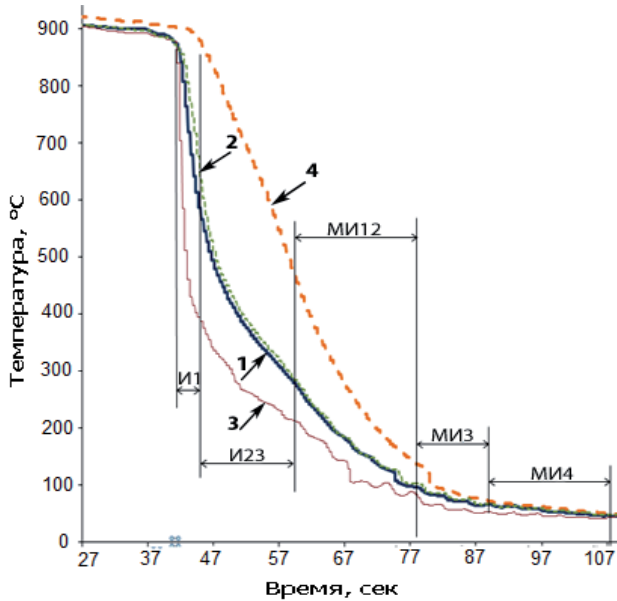


Рис. 3. Процесс охлаждения листа за время его обработки в РЗМ ОАО «Северсталь» (координаты участков измерения температуры на середине листа: 1 — верх, 2 — верх у края листа, 3 — низ, 4 — центр)

Экспериментальные значения скорости охлаждения листа в РЗМ HSW — Huta Stali при различных режимах ее работы (в интервале температур $t_i \pm 50$ °C) показана на **рис. 4**, а в РЗМ ОАО «Северсталь» — на **рис. 5**.

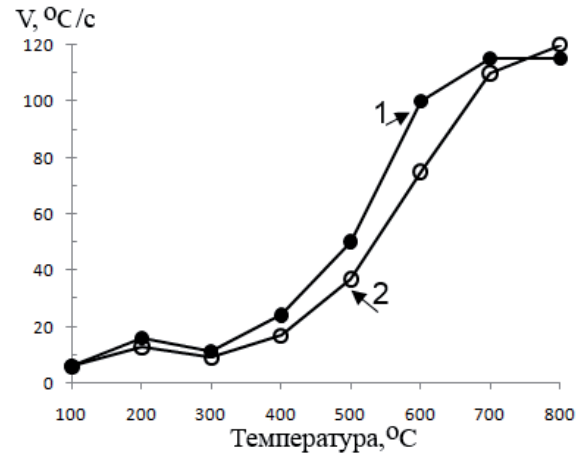


Рис. 4. Скорость охлаждения (V) в РЗМ HSW — Huta Stali листа термопарного комплекта в точках, отстоящих от нижней поверхности на 4 мм (1) и верхней — на 3,5 мм (2)

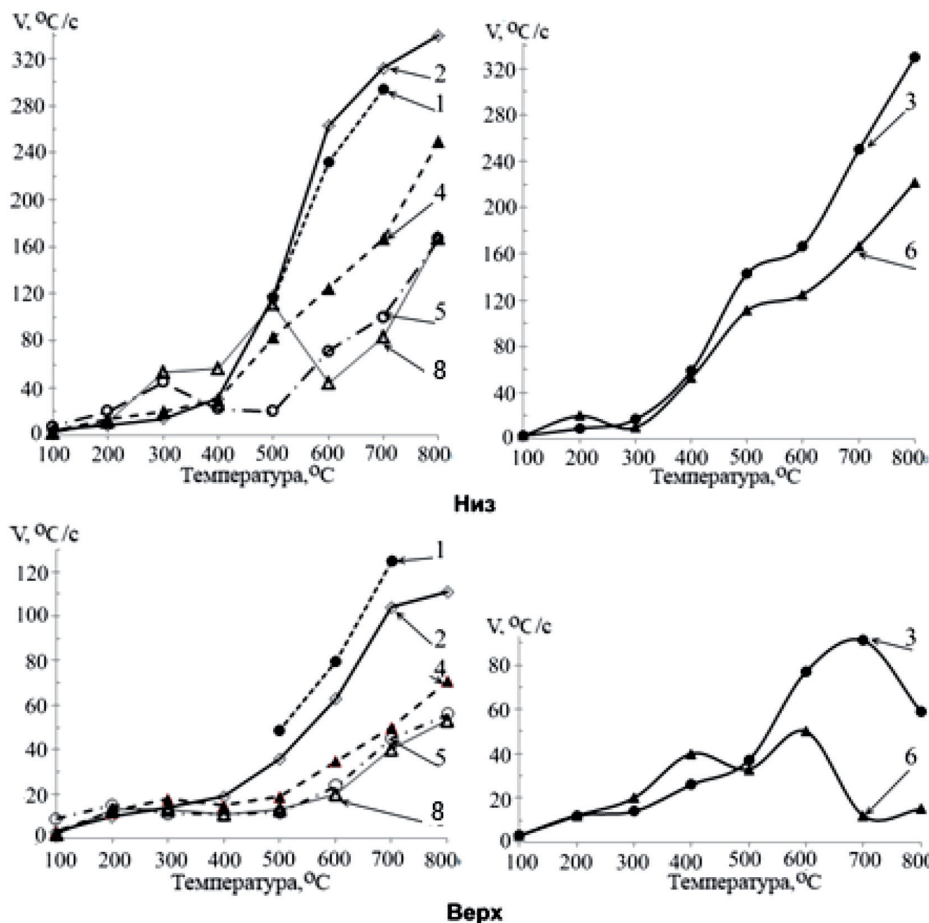


Рис. 5. Скорость охлаждения (V) в РЗМ ОАО «Северсталь» листа термопарного комплекта в точках, отстоящих от верхней (Верх) и нижней (Низ) поверхностей на 3 мм

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет утверждать, что обе РЗМ при закалке листа толщиной 30 мм обеспечивают его охлаждение со скоростью более 100 °С/с в точках, отстоящих от его поверхностей на 3–4 мм, даже при расходах воды ниже максимального допустимого на ≈20 % в зоне И1 и на ≈30 % в зоне И23.

Расчеты по модели [10], адаптированной по полученным экспериментальным данным, показали, что при работе РЗМ ОАО «Северсталь» с предельными расходами воды в зонах интенсивного охлаждения скорость охлаждения не менее 100 (60 °С/с по всему сечению листа имеет место при закалке листа толщиной до 12 (16) мм. Скорость охлаждения не менее 60 °С/с при закалке листов толщиной 20 и 30 мм распространяется на глубину 5–6 мм.

Плоскостность. РЗМ HSW – Huta Stali. Отклонения от плоскостности листов, как правило, находились в диапазоне (0–8) мм/м при максимальных значениях до 11 мм/м (оценка – по EN 10029). Качественное представление о достигнутом уровне плоскостности дают фотографии, представленные на **рис. 6**.



лист 4x1250x2500мм, сталь S690QL



лист 20x2000x6000мм, сталь S690QL

Рис. 6. Фотографии листов после закалки (на поверхности листа толщиной 4 мм видны мокрые пятна)

ОАО «Северсталь». Детальные исследования плоскостности проведены на 9 листах из 5 партий стали 10ХСНД толщиной от 8 до 50 мм. На всех контрольных листах отклонения от плоскостности после закалки по методике ГОСТ 19903 составляли от 2 до 12 мм/м, что полностью соответствуют уровню ПО-ПН, по методике EN 10029 – от 1 до 8 мм/м, что отвечает уровню нормальной плоскостности (класс N) по этому стандарту.

Качество закалки. РЗМ HSW – HutaStal I [8]. Листы после закалки характеризовались достаточно высокой равномерностью структуры и свойств по их площади и сечению. Колебание твердости по длине и ширине листов не превышало 2 % от их средних значений.

Закалка стали 15В28Н обеспечивала сквозную прокаливаемость листов толщиной до 30 мм с образованием мартенситной структуры по всему сечению. При закалке листов из высокопрочных сталей марок S690QL и S890QL, характеризующихся малой устойчивостью переохлажденного аустенита и требующих высоких критических скоростей закалки (не менее 60 °С/с), обеспечивалось формирование мартенситно-бейнитной структуры без избыточного феррита. Появление бейнита наблюдалось в центральной части (по сечению) листов толщиной свыше 25 мм. После закалки и отпуска все листы удовлетворяли требованиям стандартов на их поставку.

ОАО «Северсталь». Микроструктуру исследовали на шлифах от пяти листов из стали 10ХСНД. Образцы отбирали в 9 точках по площади каждого листа. Структура закалки (мартенсит + бейнит) обнаружена на следующей глубине от поверхности: на листах толщиной 8 мм – по всему сечению, толщиной 30 мм – на глубине 4,7–8,7 мм, толщиной 50 мм – на глубине 5,8–8,7 мм. При этом отмечена достаточно высокая однородность микроструктуры по длине и ширине листа. Например, на листе толщиной 30 мм мартенситно-бейнитная структура наблюдалась: в головной части – на глубине 5,2–8,5 мм, в средней части – на глубине 4,7–8,1 мм, в хвостовой части – на глубине 5,8–8,7 мм.

6. Выводы

Роликовые закалочные машины конструкции ПАО НКМЗ обеспечивают высокое качество закалки листов по скорости охлаждения, микроструктуре и плоскостности, что подтверждают экспериментальные исследования и опыт их промышленной эксплуатации на предприятиях HSW – HutaStali (Польша) и ОАО «Северсталь» (Россия). Широкие технические возможности указанных РЗМ реализованы посредством АСУ процессом закалки на базе математической модели и технологического обеспечения НПО «ДОНИКС».

В зонах интенсивного охлаждения средняя скорость охлаждения не менее 60 °C/с при закалке листов толщиной до 16 мм распространяется по всему сечению, при закалке листов толщиной 30 мм — на глубину 5–6 мм.

Отклонения от плоскостности листов толщиной 8–50 мм после закалки полностью соответствуют требованиям нормальной плоскостности по ГОСТ 19903 и EN 10029.

Литература

1. Авдеев, В. А. Основы проектирования металлургических заводов [Текст] / В. А. Авдеев, В. М. Друян, Б. И. Кудрин. — М.: Интермет Инжиниринг, 2002. — 464 с.
2. Lu, S. Modeling and optimization methods of integrated production planning for steel plate mill with flexible customization [Text] / S. Lu, H. Su, C. Johnsson, Y. Wang, L. Xie // Chinese Journal of Chemical Engineering. — 2015. doi: 10.1016/j.cjche.2015.10.003
3. Seraya, O. V. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data [Text] / O. V. Seraya, D. A. Demin // Journal of Automation and Information Sciences. — 2012. — Vol. 44, Issue 7. — P. 34–48. doi: 10.1615/jautomatinfscien.v44.i7.40
4. Li, S. Effects of microstructure on fatigue crack growth behavior in cold-rolled dual phase steels [Text] / S. Li, Y. Kang, S. Kuang // Materials Science and Engineering: A. — 2014. — Vol. 612. — P. 153–161. doi: 10.1016/j.msea.2014.06.002
5. Matsuda, H. Effects of auto-tempering behaviour of martensite on mechanical properties of ultra high strength steel sheets [Text] / H. Matsuda, R. Mizuno, Y. Funakawa, K. Seto, S. Matsuoka, Y. Tanaka // Journal of Alloys and Compounds. — 2013. — Vol. 577, Suppl. 1. — P. S661–S667. doi: 10.1016/j.jallcom.2012.04.108
6. Tomida, T. 24 – Nanostructured plain carbon-manganese (C-Mn) steel sheets prepared by ultra-fast cooling and short interval multi-pass hot rolling [Text] / T. Tomida, K. Miyata, H. Nishibata // Nanostructured Metals and Alloys. — Woodhead Publishing Limited, 2011. — P. 747–786. doi: 10.1533/9780857091123.4.747
7. Järvenpää, A. Local Laser Heat Treatments of Steel Sheets [Text] / A. Järvenpää, M. Jaskari, M. Nietala, K. Mäntyjärvi // Physics Procedia. — 2015. — Vol. 78. — P. 296–304. doi: 10.1016/j.phpro.2015.11.040
8. Пристрій для термообробки горячекатаного листа. Патент України № 26892 МПК С21D1/62 [Текст] / Суков Г. С., Білобров Ю. М., Гриценко С. А., Кожевников Г. В., Ивахін А. С., Остапенко А. Л., Єгоров М. Т. — u200705924; заявл. 29.05.2007; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 16.
9. Устройство для термообработки горячекатаного листа. Патент России № 2382087 [Текст] / Суков Г. С., Белобров Ю. Н., Гриценко С. А., Кожевников Г. В., Ивахин А. С., Остапенко А. Л., Егоров Н. Т. — заявл. 21.12.2007; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5.
10. Бейгельзимер, Э. Е. Математическая модель охлаждения листового металла в роликовой закалочной машине [Текст] / Э. Е. Бейгельзимер // Черная металлургия. — 2008. — № 8. — С. 49–54.
11. Остапенко, А. Л. Программное обеспечение автоматизированного рабочего места роликовой закалочной машины [Текст] / А. Л. Остапенко, А. В. Кузьмин, Э. Е. Бейгельзимер, Д. А. Козленко, С. А. Цололо, С. А. Гриценко, В. И. Елецких, Г. В. Кожевников, А. М. Вакуленко // Черная металлургия. — 2008. — № 8. — С. 39–43.
12. Остапенко, А. Л. Экспериментальные исследования охлаждения листов в роликовой закалочной машине [Текст] / А. Л. Остапенко, Н. В. Гончаров, А. В. Кузьмин, Э. Е. Бейгельзимер, Е. Н. Ведерников, С. А. Гриценко, В. И. Елецких, Г. В. Кожевников, А. М. Вакуленко // Черная металлургия. — 2008. — № 8. — С. 43–49.

Abstract. It is shown that improving the design of the roller-type machine towards providing the quenching and interrupted cooling modes (RQM) in the sheet rolling technology allows to expand the technological capabilities and manageability of the process. This provides decreased equipment weight and reduced time to reach the design performance. The feature of the process is that during the movement of the processed rolled stock, the RQM is divided into intensive and low-intensive cooling zones. The maximum cooling rate (over 120 deg/s) is achieved in the intensive cooling zone using the slit-type collector with the jet torch directed to the surface of the rolled stock at an angle of no more than 250 and the two-chamber collectors with flat-flame nozzles with the jet torch directed to the surface of the rolled stock at an angle of no more than 600. Using dual-chamber collectors significantly increased the manageability of the heat treatment process since the water consumption variation range has increased by at least 1,9 times. It is shown that the cooling system design in conjunction with the automated water supply control system allows to optimally distribute flows along the length and width of the sheet, and also establish favorable water supply ratios in the top and bottom of each cooling section. Due to the proposed technical solutions, the average cooling rate in intensive cooling zones extends throughout the section and amounts to at least 60 °C/s in quenching of sheets with the thickness of up to 16 mm, and to a depth of 5–6 mm in quenching of 30 mm thick sheets. Flatness deviation of 8–50 mm thick sheets after quenching is fully compliant with the requirements of normal flatness in accordance with GOST 19903 and EN 10029.