

УДК 621. 771.23: 621.78.08

Остапенко А. Л., Бейгельзимер Э. Е., Кузьмин А. В., Егоров Н. Т., Гончаров Н. В., Козленко Д. А., Гриценко С. А., Елецких В. И., Кожевников Г. В., Вакуленко А. М.

## РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ РОЛИКОВОЙ ЗАКАЛОЧНОЙ МАШИНЫ

Новые совместные разработки ЗАО «НКМЗ» и НПО «ДОНИКС» по совершенствованию конструкции роликовых закалочных машин (РЗМ), технологии термообработки листов, автоматизации процессов расчета и реализации рациональных режимов закалки направлены, прежде всего, на расширение технологических возможностей РЗМ, снижение массы оборудования и сроков выхода на проектные показатели [1–3].

Разработанная методика решения технологических аспектов этой задачи реализована при создании РЗМ для металлургического завода HSW – HSJ Sp. A. (Stalowa Wola, Польша) и включает следующие основные элементы:

1. Разработка технологии закалки, математической модели и программы расчета изменения теплового состояния листа в процессе закалки.

2. Разработка технологических требований к системе подачи охлаждающей воды на верхнюю и нижнюю поверхности обрабатываемого в РЗМ листа с целью достижения критических скоростей охлаждения [1].

3. Разработка концепции управления работой РЗМ, математического и программного обеспечения ее реализации.

4. Экспериментальное исследование изменения температуры по толщине листа в процессе его обработки в РЗМ с целью получения исходных данных для адаптации математической модели расчета режимов закалки [2].

5. Расчет режимов закалки и формирование режимных карт, включающих всю информацию, необходимую для реализации заданного (расчетного) режима [3].

Целью данной работы является разработка режимов работы роликовой закалочной машины, а также оценка полученных результатов.

Технология закалки разработана для листов толщиной (3–30) мм марочного сортамента, типовые представители которого следующие: 18G2AV, S690QL, P285QH, 18HGT, 40HM, 15B28H, 45, OH18N9, X10CRAL7.

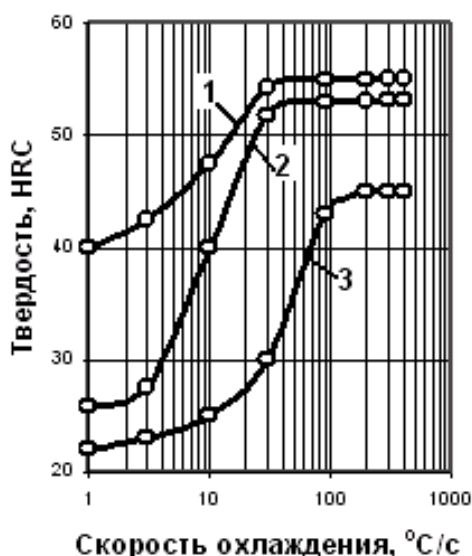


Рис. 1. Скорость охлаждения и твердость сталей 40HM (1), 15B28H (2), 18HGT (3)

Первым шагом на пути разработки технологии закалки, а, следовательно, и формирования технологических требований к параметрам РЗМ, было определение необходимой температуры нагрева листа и скорости его охлаждения в РЗМ, обеспечивающих получение мартенситной или мартенситно-бейнитной структур при плоскостности, отвечающей требованиям зарубежных стандартов на готовую продукцию.

Анализ диаграмм распада переохлажденного аустенита для сталей заданного сортамента показывает, что для получения мартенситной структуры наиболее высокие скорости охлаждения (170–360) °С/с в интервале от 800 °С до 400 °С требуют стали типа 18G2AV, S69QL 18HGT, P285QH, т. е. стали, обладающие малой устойчивостью аустенита и низкой прокаливаемостью. Вместе с тем, максимальная твердость в этих сталях достигается при скоростях охлаждения (60–90) °С/с, обеспечивающих получение мартенситно-бейнитной структур без избыточного феррита, а в сталях типа 40HM и 15B28H – при скоростях охлаждения более 30 °С/с, обеспечивающих получение мартенситной структуры (рис. 1).

Быстрое охлаждение сталей ниже 400 °С, т. е. ниже мартенситной точки  $M_H$ , влияния на их структуру не оказывает, но приводит к возникновению значительных структурных и термических напряжений, которые неблагоприятно сказываются на плоскостности листов. В этой связи охлаждение ниже точки  $M_H$  следует осуществлять с меньшими скоростями.

Таким образом, закаливать листы следует по схеме двухстадийного охлаждения. На первой стадии в интервале (800–400) °С скорость охлаждения листов должна обеспечивать получение необходимых структур закалки мартенсита или мартенсита с небольшим количеством бейнита, а на второй, ниже точки  $M_H$ , – минимальных структурных и термических напряжений и температуры листа на выходе из РЗМ не более (50–70) °С (табл. 1).

Таблица 1

Температурные режимы обработки листов

Группы стали	Типовые представители по стандартам		Температура, °С		Скорость охлаждения, °С/с	
	DIN	СНГ	нагрева	входа в РЗМ	800–400 °С	> 400 °С
I	18G2AV	18Г2СФ	880–890	880	60–90	> 20
	S69QL	20ХГ2Н2СМ	860–880	860		
	P285QH	17ГС	860–940	860		
	18HGT	18ХГТ	850–880	850		
II	40HM	40ХМ	820–860	820	> 30	> 20
	15B28H	30ГР	860–870	860		
	C45	45	820–860	820		
III	30PM		860–900	860	10–15	> 10
IV	OH18N9	10X18H9	1020–1070	1020	30–40	> 20
V	X10CRAL7	10X7CЮ	750–850	750	30–40	> 20

Для расчета требований к параметрам РЗМ и режимам ее работы разработаны математическая модель процесса охлаждения листа и программа расчета, позволяющие в диалоговом режиме определить технологические требования к конструкции машины, а именно: количество коллекторов для подачи воды на нижнюю и верхнюю поверхности листа и распределение их по управляемым зонам; способ подачи воды, ее количество общее и по зонам управления; количество форсунок в коллекторах, их расположение в коллекторе и относительно направления движения листа; скорость роликов; технологически необходимые диапазоны изменения указанных характеристик.

Эта же программа использована для расчета в диалоговом режиме оптимальных параметров установок расходов воды на верхнее и нижнее охлаждение листов в каждой

управляемой зоне и скорости роликов, обеспечивающих технологически необходимые скорости охлаждения табл. 1 для каждой позиции размерного и марочного сортамента.

Адекватность разработанного матобеспечения подтверждена экспериментально. Для получения массива экспериментальных данных были подготовлены листы с зачеканенными в них двумя термопарами. Рабочий спай одной из термопар располагался на глубине 3,5 мм от верхней поверхности, а второй на глубине 4 мм от нижней. Схема комплекса сбора данных показана на рис. 2.

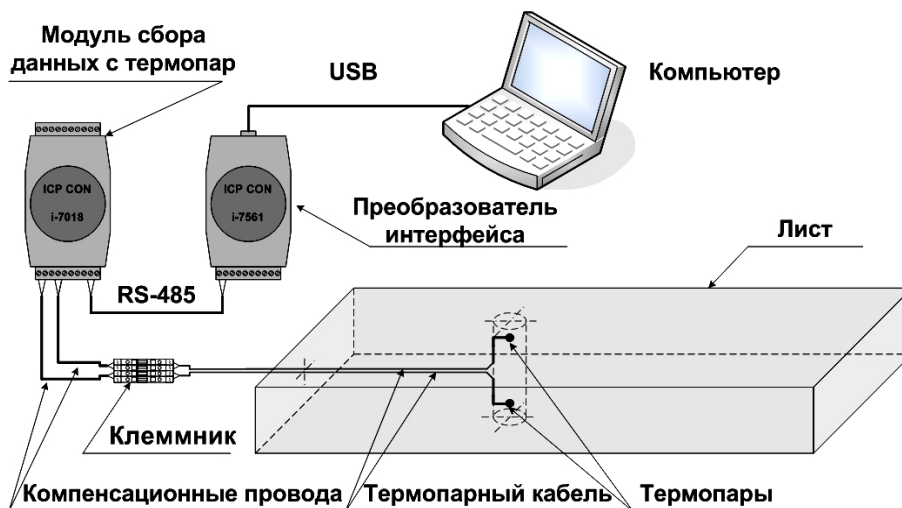


Рис. 2. Упрощенная схема измерительного комплекса

Листы с термопарами нагревали в проходной роликовой печи, а затем пропускали через РЗМ, работающую в определенном режиме при непрерывной записи показаний термопар вплоть до выхода листа из РЗМ. Таким образом, получены экспериментальные графики изменения температуры листов при работе РЗМ в девяти режимах.

На рис. 3, в качестве примера, приведены экспериментальные и расчетные значения температуры листа в различные моменты процесса его обработки в РЗМ.

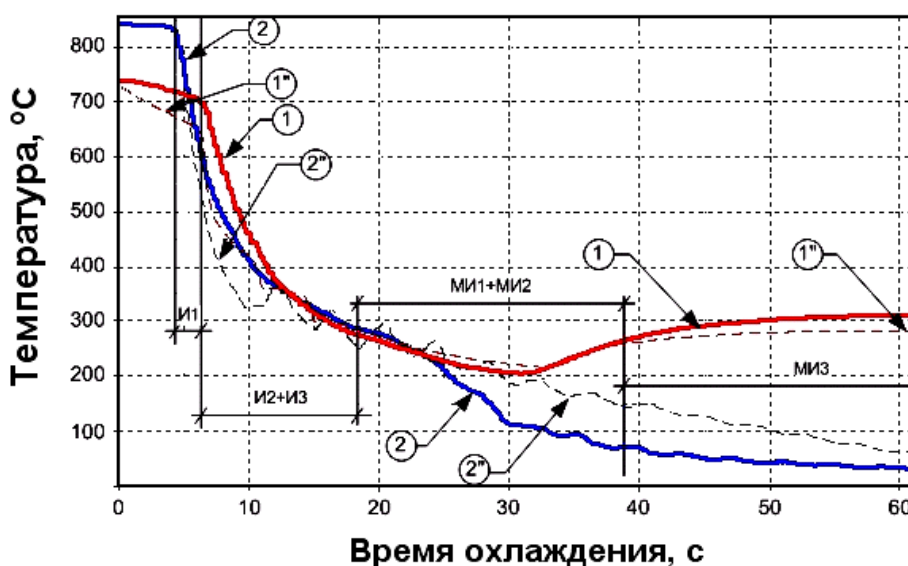


Рис. 3. Экспериментальные (1 и 2) и расчетные (1'' и 2'') температуры листов за время их прохождения зоны РЗМ (И1 и И2 + И3 – зоны интенсивного охлаждения; МИ1 + МИ2 и МИ3 – зоны малоинтенсивного охлаждения; толщина листа – 30 мм, скорость его движения через РЗМ – 0,1 м/с, сталь 45)

На рис. 3 цифрами 1 и 2 обозначены номера режимов охлаждения: 1 – включены только коллектора зоны (И2 + И3) с расходом воды 220 м<sup>3</sup>/ч на верхнюю поверхность листа и 322 м<sup>3</sup>/ч на нижнюю; 2 – включены коллектора зоны (И1), (И2 + И3), МИ2 и МИ3 с расходами воды 350, 221, 171, 197 м<sup>3</sup>/ч и 402, 322, 251, 301 м<sup>3</sup>/ч на верхнюю и нижнюю поверхности листа соответственно. Экспериментальные данные использованы для адаптации матобеспечения к условиям работы РЗМ.

Выполненные эксперименты позволили получить представление о фактических технологических возможностях РЗМ по экспериментальным оценкам скорости охлаждения листа в точках, отстоящих от верхней и нижней поверхностей на 3,5 мм и 4,0 мм (рис. 4).

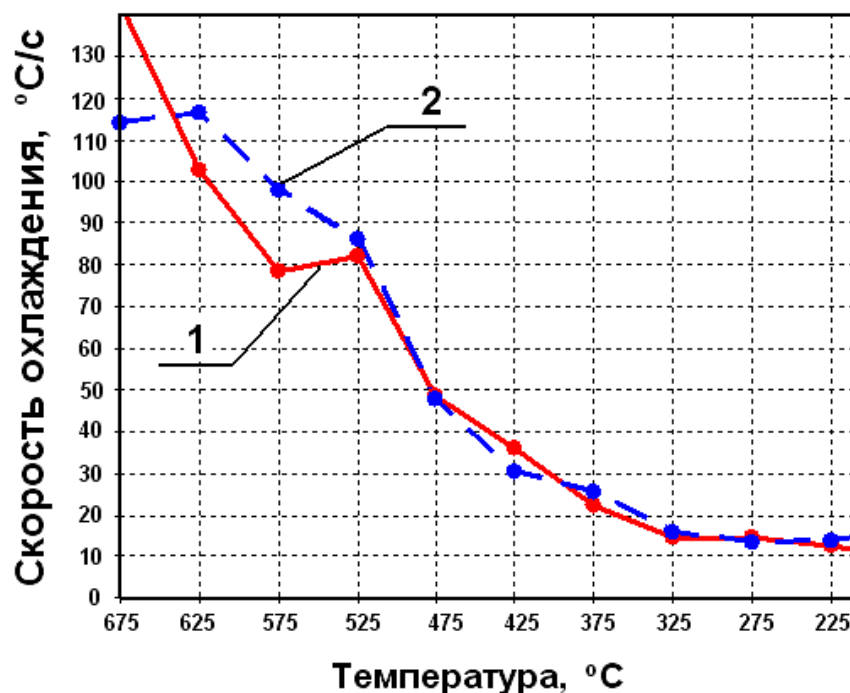


Рис. 4. Скорость охлаждения листа в различных температурах:

1 – в точке, отстоящей от верхней поверхности на 4,0 мм; 2 – на 3,5 мм от нижней; температура начала охлаждения 750 °C; скорость перемещения листа в зоне РЗМ 0,1 м/с; суммарный расход воды 2220 м<sup>3</sup>/ч (944 м<sup>3</sup>/ч на верхнее охлаждение и 1276 м<sup>3</sup>/ч на нижнее); толщина листа 30 мм; температура охлаждающей воды 18 °C

Математическая модель процесса охлаждения является ключевым технологическим элементом программного обеспечения автоматизированной системы управления (ПО АСУ) РЗМ и предназначена для формирования задания на управление процессом закалки, включающего: скорость прохождения листом зоны РЗМ, номера включенных коллекторов верхнего и нижнего охлаждения и расходы воды в них, зазор между роликами прижимных секций. Параметры задания сконцентрированы в режимных картах.

Функция расчета параметров задания на управление процессом закалки и заполнения режимных карт возложена в ПО автоматизированного рабочего места технолога (АРМ технолога) на компонент «MODEL», где предусмотрена возможность выполнения расчета в двух режимах: в диалоговом и автоматическом.

В диалоговом режиме пользователь самостоятельно задает расходы воды по секциям охлаждения РЗМ и в результате единичного расчета получает скорость охлаждения металла в двух регламентированных диапазонах температур. После этого пользователь может либо скорректировать расходы воды и повторить расчет, либо, если результаты расчета его устраивают, сохранить их в виде режимной карты в базе данных.

В автоматическом режиме программа решает обратную задачу и самостоятельно рассчитывает расходы воды, обеспечивающие заданные скорости охлаждения. Фрагмент окна программы с панелью «Режимная карта» показан на рис. 5.

Автоматизированное рабочее место технолога роликовой закалочной машины																										
Файл Настройка Справка															11:42:08		Администратор									
Главное			Режимные карты			Технологич. карты			Коллектора			Марки стали			Журнал		Модель		Выход							
База режимных карт																										
Обновить Фильтр Печать Иск. данные Редактировать Сделайте активной История																										
№ карты	Группа	Размеры листа, мм			Температура воды, ±5°C	Температура нагрева, °C		Скорость охлаждения листа по диапазонам, °C/с				Скорость листа, м/с	Зазор между роликами, мм	Ширина окл., мм	Расходы воды по секциям, м <sup>3</sup> /ч								Расход воды общ. м <sup>3</sup> /ч	Карта принята		
		В	Hmin	Hmax		min	max	Зад. 1	Расч. 1	Зад. 2	Расч. 2				И1	И2	И3	МИ1	МИ2	МИ3	МИ4	Дата		Время	Признак	
0111	1	<=1500	3.0	4.0	25	830	850	40	40	20	20	0.40	H + 2	1600	0	70	0	100	0	120	130	1020	2007.06.22	12:37:47	модель ок.	
0112	1	>1500	3.0	4.0	25	830	850	40	40	20	20	0.40	H + 2	2200	0	100	0	140	0	160	160	1380	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0113	1	<=1500	3.0	4.0	35	830	850	40	40	20	20	0.40	H + 2	1600	0	70	0	100	0	120	130	1020	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0114	1	>1500	3.0	4.0	35	830	850	40	40	20	20	0.40	H + 2	2200	0	100	0	140	0	160	160	1380	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0121	1	<=1500	4.1	5.0	25	830	850	40	40	20	20	0.30	H + 2	1600	0	70	0	100	0	120	130	1020	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0122	1	>1500	4.1	5.0	25	830	850	40	40	20	20	0.30	H + 2	2200	0	100	0	140	0	160	160	1380	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0123	1	<=1500	4.1	5.0	35	830	850	40	40	20	20	0.30	H + 2	1600	0	70	0	100	0	120	130	1020	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0124	1	>1500	4.1	5.0	35	830	850	40	40	20	20	0.30	H + 2	2200	0	100	0	140	0	160	160	1380	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0131	1	<=1500	5.1	7.0	25	830	850	40	40	20	20	0.25	H + 2	1600	0	90	0	110	0	130	120	1100	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0132	1	>1500	5.1	7.0	25	830	850	40	40	20	20	0.25	H + 2	2200	0	120	0	150	0	180	170	1500	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0133	1	<=1500	5.1	7.0	35	830	850	40	40	20	20	0.25	H + 2	1600	0	90	0	110	0	130	120	1100	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0134	1	>1500	5.1	7.0	35	830	850	40	40	20	20	0.25	H + 2	2200	0	120	0	150	0	180	170	1500	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0141	1	<=1500	7.1	9.0	25	830	850	40	40	20	20	0.20	H + 2	1600	0	100	0	110	0	130	120	1130	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0142	1	>1500	7.1	9.0	25	830	850	40	40	20	20	0.20	H + 2	2200	0	130	0	150	0	180	170	1560	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0143	1	<=1500	7.1	9.0	35	830	850	40	40	20	20	0.20	H + 2	1600	0	100	0	110	0	130	120	1130	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	
0144	1	>1500	7.1	9.0	35	830	850	40	40	20	20	0.20	H + 2	2200	0	130	0	150	0	180	170	1560	2007.06.22	12:37:48	модель ок.	

Рис. 5. Фрагмент окна ПО АРМ технолога с панелью «Режимная карта»

Хотелось бы обратить внимание на выполнение АРМ одной важной функции, в значительной мере определившей успешный ввод в эксплуатацию РЗМ, которая заключается в представлении информации о качестве нагрева листа, поступающего на закалку (рис. 6).

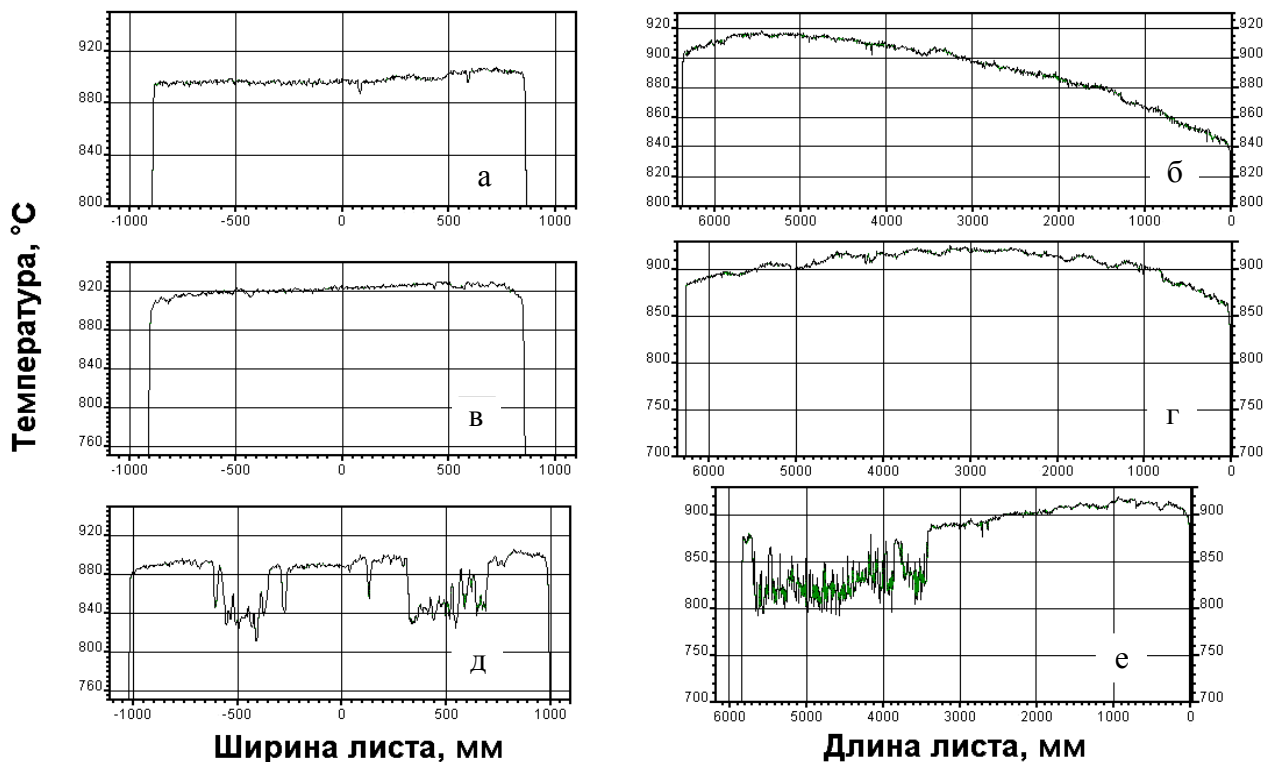


Рис. 6. Наблюдаемые нарушения требований к температуре нагрева и качеству поверхности листа, поступающего на закалку в РЗМ

Представленные на рис. 6 диаграммы показали на технологически недопустимую нестабильность температуры по длине листа (позиции «б» и «г»), обусловленную нестабильностью теплового профиля печи по ее длине. Стабильность нагрева по ширине печи удовлетворительна (позиции «а» и «в» рис. 6). Поперечная и продольная нестабильность, зафиксированная позициями «д» и «е» рис. 6, объясняется загрязнением поверхности поступающего в проходную печь листа, в том числе наличием на ней отслоившейся окалины.

Исследования, проведенные на стали 10ХСНД, показали, что наличие окалины толщиной 0,1 мм на 30–50 % снижает закаливаемость стали, а при толщине окалины 0,4 мм эффект закалки вообще отсутствует из-за более низкой теплопроводности окалины в сравнении со сталью [1].

Документация качества нагрева позволила привести режимы нагрева листов в проходной роликовой печи в соответствии с требованиями к качеству нагрева, а именно: неравномерность температуры по площади листа перед РЗМ не должна превышать 15 °С при полном отсутствии на ней отслоившейся окалины.

Листы после закалки характеризовались достаточно высокой равномерностью структуры и свойств по их площади и сечению. Колебания твердости по длине и ширине листов не превышали 2 % от их средних значений. Неплоскостность листов составляла, как правило, (0–8) мм/м при максимальных значениях до 11 мм/м. Качественное представление о достигнутой планшетности листов дают фотографии, представленные на рис. 7.



а



б

Рис. 7. Фотографии листов после закалки (не обрез.):

а – листы 3 × 1250 × 1600 мм, сталь 30PM; листы 4 × 1250 × 2500 мм, сталь S690QL; листы 6 × 1250 × 2500 мм, сталь X10CrAl7; б – листы 20 × 2000 × 6000 мм, сталь S690QL

## ВЫВОДЫ

Закалка стали 15B28H обеспечила сквозную прокаливаемость листов толщиной до 30 мм с образованием мартенситной структуры по всему сечению. При закалке листов из высокопрочных сталей марок S690QL и S890QL, требующих высоких критических скоростей закалки (не менее 60 °С/с), обеспечивалось формирование мартенситно-бейнитной структур 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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров Н. Т. Влияние условий охлаждения при закалке на прокаливаемость толстолистовых низколегированных сталей / Н. Т. Егоров, В. Г. Оноприенко, В. Г. Катрич // *Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XIV международной конференции в г. Севастополь – Донецк: ДонНТУ, 2007.* – Т. 2. – С. 30–33.
2. Целиков А. И. Теория прокатки / А. И. Целиков, А. И. Гришков. – М.: *Металлургия*, 1970. – 358 с.
3. *Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением / Яловой Н. И., Тылкин М. А., Полухин П. И. и др. – М.: Высшая школа, 1973. – 631 с.*