

Низкотемпературная прокатка на сортовом стане для производства спецсталей на заводе Tianjin Iron & Steel.

Франческо Тоски (Francesco Toschi)

Ведущий инженер по технологии и металлургии
Danieli Morgårdshammar – Италия.

Ван Бинся (Wang Bingxia)

Заместитель главного инженера
Tianjin Iron&Steel Co – Китайская Народная Республика.

1. Введение

В начале 2006 года на заводе Tianjin Iron & Steel Co (КНР) был введен в строй и успешно работает на полную мощность один из последних сортовых станов фирмы Danieli, на котором предусмотрена Низкотемпературная Прокатка (LTR-процесс). Прокатный стан №1 – это часть более крупного проекта, включающего в себя аналогичный сортовой стан №2, также поставленный фирмой Danieli и предназначенный для производства товарной сортовой продукции. Стан №2 был построен в соседнем пролете и пущен в эксплуатацию одновременно со станом №1 (см. схему на Рисунке 1).

Несколько лет прошло с тех пор, как на прокатном стане для производства спецсталей завода ABS (Acciaierie Bertoli Safau) в Италии состоялись первые промышленные испытания, и были определены оптимальные параметры процесса низкотемпературной прокатки спецсталей, выпускаемых в прутках и бунтах. Вошли в строй многочисленные аналогичные агрегаты, что позволило оптимизировать процесс низкотемпературной прокатки в соответствии с требованиями и спецификациями заказчиков.

Научно-исследовательская работа была направлена, в основном, на снижение твердости низко- и среднелегированных сталей и всех марок сталей, которые подвергаются холодной резке и подвержены растрескиванию по причине твердости и концентрации напряжений. Данный процесс также испытывался для нержавеющей сталей в целях улучшения механических свойств горячекатаной продукции специального назначения. Изменения размеров зерна и аустенитной трансформированной структуры также представляли интерес с точки зрения контроля таких свойств, как прокаливаемость, ударная вязкость, температура перехода в хрупкое состояние.

Вообще, идея уйти от отжига как единственного способа снизить жесткость и заменить его на процесс низкотемпературной прокатки вызвала определенный интерес среди многих производителей сортового проката из качественных и специальных сталей.

На заводе Tianjin Iron & Steel основная задача заключалась в получении высококачественной стали в соответствии со спецификациями стандартов GB и выполнении требований заказчиков по пластичности и однородности металла в течение цикла термообработки. Процесс прокатки на стане, начиная с управления нагревом в печи и заканчивая конечной термообработкой, был оптимизирован в целях удовлетворения потребностей завода Tianjin и его заказчиков.

2. Описание агрегата

Новый сортопрокатный стан №1 для спецсталей (как и его «близнец» - стан №2) имеет 18 клеток с горизонтальной/вертикальной конфигурацией и контролем натяжения петли. Две камеры водяного охлаждения установлены между 14-й и 15-й клетками на соответствующем расстоянии для выравнивания температуры поверхности металла. Благодаря такой компоновке можно добиться общего снижения температуры на 260 градусов по Цельсию без изменения качества поверхности, т.е. без локального переохлаждения и фазовых изменений. Предусмотрена труба с высоким коэффициентом теплообмена для равномерного охлаждения прутка по сечению. Кроме того, система охлаждения DCS, управляемая контроллерами, обеспечивает нужные настройки водяных камер для контроля равномерности охлаждения по длине прутка. Пирометры на входе и выходе следят за фактической температурой раската и, при необходимости, изменяют базовые настройки в режиме «реального времени».

Благодаря применению данной технологии и продолжительным кампаниям прокатки можно управлять изменениями процесса нагрева заготовок в печи в зависимости от марок стали без изменения температуры прокатки в чистовой группе.

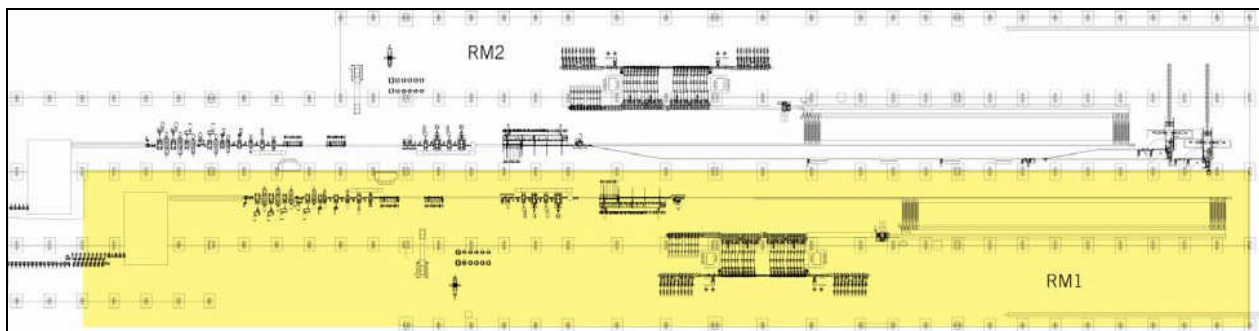


Рис. 1: Общий план расположения станов №1 и №2 на заводе Tianjin I&S.

3. Производственная программа

В таблице 1 ниже указаны марки стали и типоразмеры продукции сортового стана для прокатки спецсталей на заводе Tianjin I&S, а также области применения готовой продукции. В качестве подката используется заготовка 160x160 мм весом 2350 кг. Максимальная производительность прокатного стана при традиционной прокатке составляет 150 т/ч, при низкотемпературной прокатке – 100 т/ч. Диаметр выпускаемых качественных круглых прутков варьируется от 16 до 60 мм.

Таблица 1

ГРУППА	МАРКА	ПРИМЕНЕНИЕ
C, C-Mn	#45	Строительство
Si, Si-Mn	60Si2Mn	Пружины – закаленные и отпущенные
Si-Cr, Si-Cr-V	60Si2Cr	Пружины – закаленные и отпущенные
Cr, Cr-Mo	40Cr	Болты, валы, фланцы – закаленные и отпущенные
Mn-B	40MnB	Болты – холодная высадка – закаленные и отпущенные

4. Описание процесса

Температура прокатки – это один из трех базовых параметров, влияющих на все стадии измельчения зерна в процессе обработки горячего металла давлением.

В технологии низкотемпературной прокатки измельчение зерна и контроль роста зерна предусмотрены для влияния на трансформацию структуры стали в ходе процесса при изменении температуры (т.е., положение кривых охлаждения), из-за которых меняется длина межзеренных границ и, как следствие, точки образования кристаллов. В частности, температура – это тот параметр, который влияет на термодинамику всего процесса.

Формула (а) демонстрирует влияние температуры. Также можно увидеть, как предыдущий размер зерна определяет развитие зернистой структуры, и какое непосредственное влияние оказывают все деформации материала на окончательный размер зерна при низкотемпературной прокатке.

$$d_{\text{тех}} = K1 \times \ln\left(\frac{T}{973}\right) \times d_0^{K2} \times e^u \times \dot{\epsilon}^{K3} \quad (a)$$

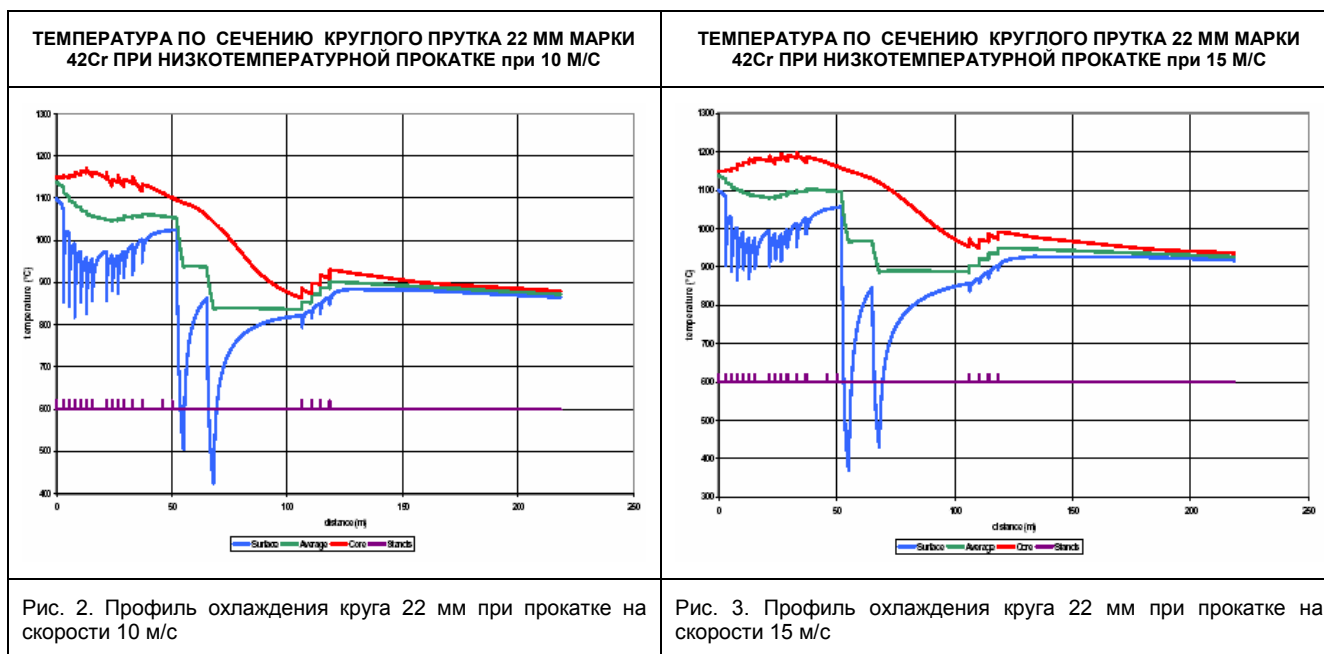
где K1, K2, K3 – константы в зависимости от марки стали.

Процесс измельчения зерна может подразделяться на разные стадии, хотя несколько стадий могут протекать одновременно.

Первоначальная деформация зерна имеет тенденцию к увеличению плотности дислокаций, делая возможным формирование новых межзеренных границ.

Аннигиляция и восстановление новых межзеренных границ строго привязаны к фактической температуре, и формирование и рост новых зерен представляют собой термодинамический процесс. На разных стадиях происходят восстановление, статическая рекристаллизация и динамическая рекристаллизация, которые влияют на изменение пластического течения. Наконец, рост зерна происходит как тенденция минимизации энергии межзеренных границ. Как уже было описано в различных известных теоретических моделях для разных химических составов стали, критическая температура определяет лимит между состоянием измельчения зерна и полностью рекристаллизованной структурой роста зерна. Как только уменьшится содержание углерода, эффект

проявляется более четко, и для таких марок стали, как 16MnCr, можно добиться измельчения более 40 %.



На графиках: ось X – расстояние (м), ось Y – температура (°C)

Кривые: синяя – поверхность
 зеленая – средняя
 красная – сердцевина
 фиолетовая – клетки

Для сталей специального назначения определенно важно поддерживать требуемую температуру по всему поперечному сечению проката. В частности, если температура поверхности прутка ниже критической, в то время как температура сердцевины выше, это может привести к образованию неоднородной конечной структуры с точки зрения размера зерна и фаз. На рисунках 2 и 3 показано охлаждение проката одного и того же размера при разных скоростях прокатки. Первая диаграмма характеризует хорошее состояние прокатки, в то время как на второй показана более сложная ситуация, когда разность температур поверхности/сердцевины превышает 50°C. Принимается нижний лимит охлаждения поверхности на уровне 400°C, при этом подходящая разница температур поверхности и сердцевины составляет 30°C, а максимальная - 50°C.

Более интенсивное охлаждение в отдельной водяной камере может привести к образованию закаленного и отпущенного слоя, неблагоприятно отражающегося на конечном качестве металла. В результате неконтролируемой разницы температур между поверхностью и сердцевиной может возникнуть неоднородная структура зерна, из-за которой во время конечной термообработки не удастся получить нужные механические свойства.

5. Проведенные испытания

Детальные исследования были проведены на двух марках стали.

>>> 60Si2Mn – высококремнистая пружинная сталь. Термообработка с низкотемпературным отпуском увеличивает предел текучести благодаря содержанию кремния.

>>> 40Cr – это сталь для закалки и отпуска, широко используемая для операций холодной высадки, в частности, для производства болтов.

В таблице 2 показан химический состав двух марок стали. Требования стандарта GB приведены в таблице 3.

Таблица 2

МАРКА	СТАНДАРТ	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
60Si2Mn	GB1222-84	0,56-0,64	0,6-0,9	1,5-2,0	<0,35	<0,35	<0,25	<0,035	<0,035
40Cr	GB3077-99	0,37-0,45	0,6-0,9	0,17-0,37	0,9-1,2	-	-	-	-

Таблица 3

МАРКА	СТАНДАРТ	ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ	ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ	A10	Z	ТВЕРДОСТЬ
		(МПа)	(МПа)	(%)	(%)	(НВ)
60Si2Mn	GB1222-84	>1176	>1274	>5	>25	<320
40Cr	GB3077-99	>785	>980	>9**	>45	<207

Технологические параметры (т.е., температура выдачи из печи, температура прокатки в чистовой группе, окончательное охлаждение) должны быть выбраны и оптимизированы в соответствии с конечными свойствами отдельной марки стали и назначением данной продукции.

Основными целевыми параметрами для пружинных сталей являются низкая твердость после прокатки, отсутствие обезуглероживания и высокое качество поверхности.

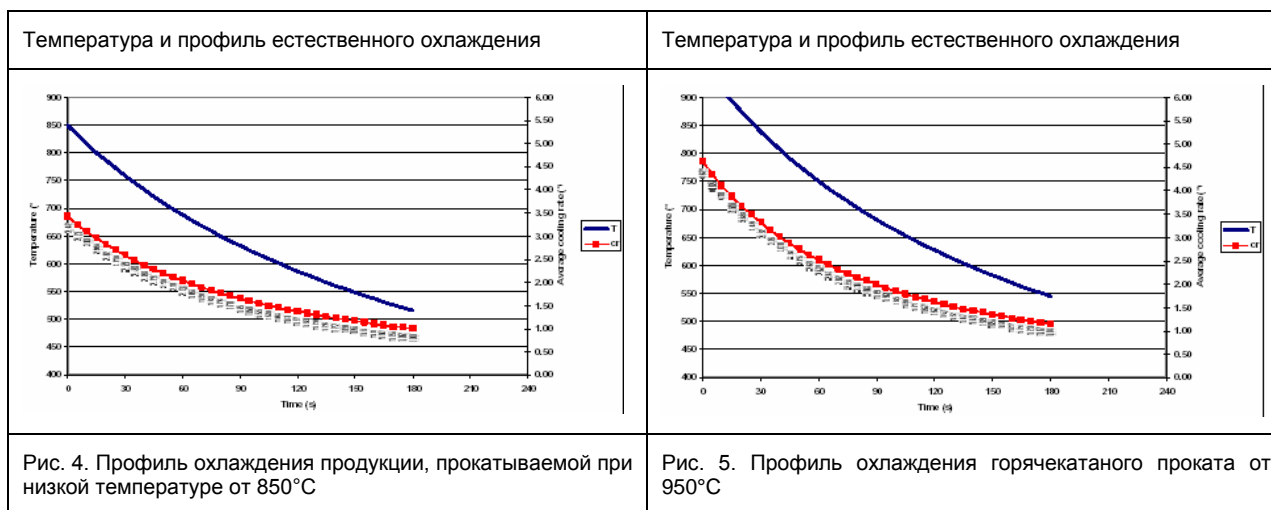
Особое внимание также нужно уделять размеру зерна. Слишком мелкие зерна могут повлиять на процесс закалки и снизить прокаливаемость, в то время как более крупные зерна увеличивают твердость после прокатки с возможностью растрескивания во время и после холодной резки.

Для обеих прокатываемых марок стали требуется поверхность без дефектов, поскольку дефекты могут нарушить ход таких процессов дальнейшей переработки проката, как волочение и холодная высадка. Большинство проблем возникает из-за качества заготовки, но также следует уделять внимание состоянию транспортных желобов во избежание царапин и дефектов вследствие контакта с металлом. Базовые технологические параметры показаны в таблице 4, где FRT – температура прокатки в чистовой группе, а СВТ – температура выдачи на холодильник.

Таблица 4

МАРКА	СТАНДАРТ	РАЗМЕР	СКОРОСТЬ	FRT	СВТ
		(мм)	(м/с)	(°C)	(°C)
60Si2Mn	GB1222-84	22	10	920 – 950	900 – 920
60Si2Mn	GB1222-84	22	10	850 -870	880 – 910
40Cr	GB3077-99	22	10	920 – 950	870 – 900
40Cr	GB3077-99	22	10	780 - 800	820 - 840

В ходе испытаний было прокатано по 30 заготовок из каждой марки стали в двух разных температурных диапазонах. В обоих случаях и для обеих марок использовалось естественное охлаждение, но после последней прокатной клетки применялось два разных типа охлаждения. На Рис. 4 показан профиль охлаждения кругов 22 мм на холодильнике. С каждой прокатанной заготовки было отобрано по три образца. Один образец использовался для контроля твердости и микроскопической оценки в состоянии после прокатки, а на двух других испытывались циклы термообработки.



На графике: горизонтальная шкала – время (с)

вертикальная шкала (слева) – температура (°C)

вертикальная шкала (справа) – средняя скорость охлаждения (°C)

Охлаждение на холодильнике влияет на конечные механические свойства, поскольку кривые температуры контролируемого охлаждения определяются, прежде всего, химическим составом и размером зерна, и потому режим охлаждения – это единственный фактор, фиксирующий окончательную структуру в зависимости от точки пересечения с кривыми температуры контролируемого охлаждения. В данном случае не требовалось использовать энкопанели на холодильнике для задержки структурной трансформации.

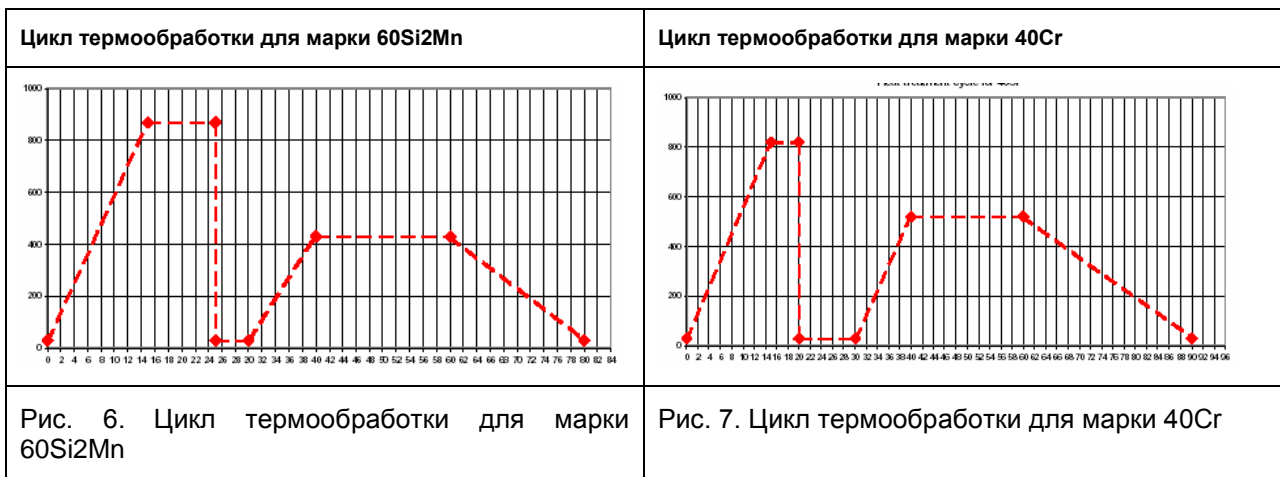
6. Термообработка

Во время испытаний, в частности, для марки 60Si2Mn, было выполнено несколько тестов для оптимизации температуры аустенитизации, учитывая уровень феррита, присутствующего в металле в состоянии после прокатки, и исходный размер зерна. На самом деле, если, с одной стороны, ферритная структура подходит для холодной резки без образования трещин, то с другой стороны, такая структура требует внимания в ходе фазы аустенитизации перед закалкой. Если не обеспечить надлежащий контроль за этой фазой, то после закалки могут остаться ферритные включения, что ухудшит конечные механические свойства. На следующих графиках показаны два цикла термообработки. Требования стандартов GB к температуре термообработки представлены в таблице 5.

Таблица 5

МАРКА	СТАНДАРТ	T аустенитизации	T отпуска
		(C)	(C)
60Si2Mn	GB1222-84	870	480
40Cr	GB3077-99	840	520

Мы определили, что целевая твердость после закалки должна быть 52HRC для 40Cr и 60HRC для 60Si2Mn. В обоих случаях стандарты требуют, чтобы в качестве закалочной среды использовалось масло. Три образца были помещены в лабораторную печь согласно требованиям стандарта. После отпуска для охлаждения образцов до комнатной температуры использовался воздух.

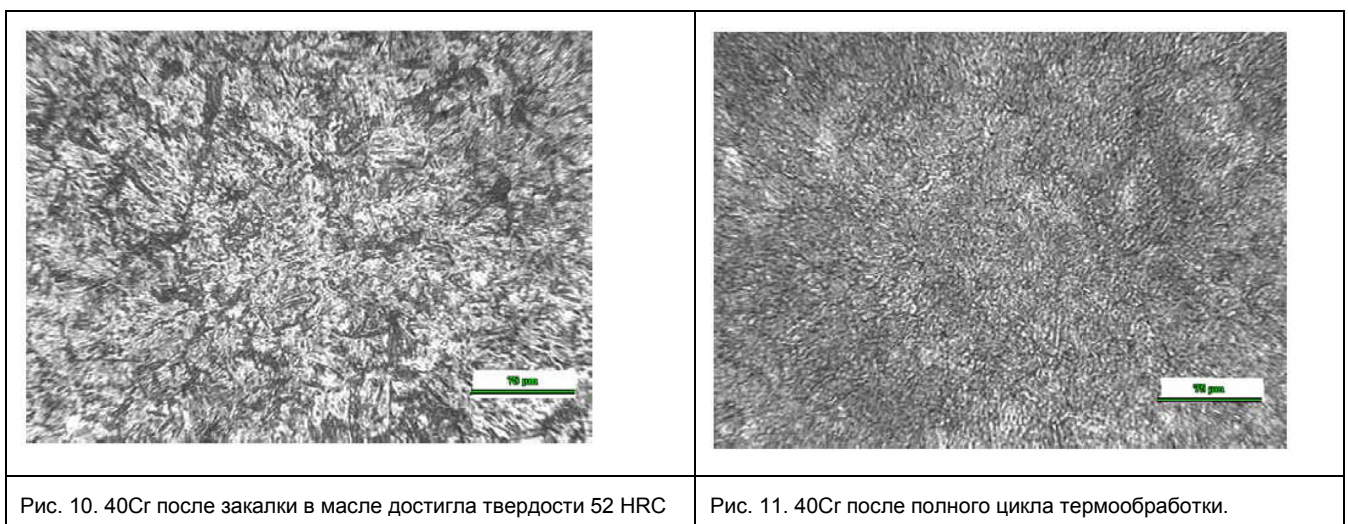
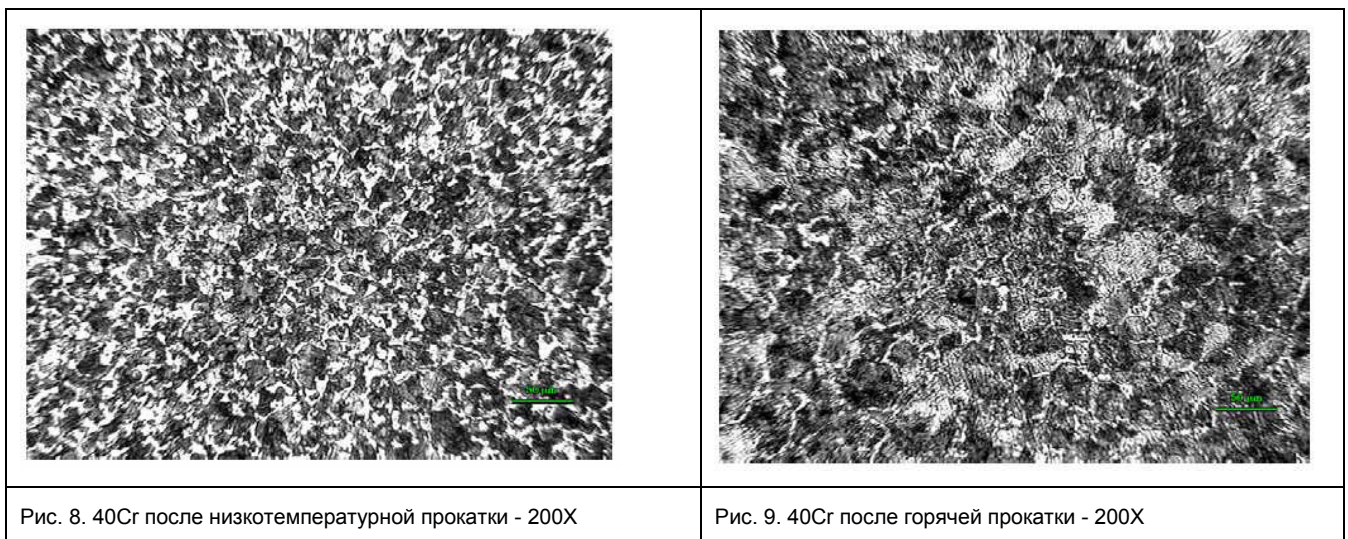


7. Анализ микроструктуры

В лаборатории завода Tianjin I&S был проведен анализ микроструктуры проката.

Подготовка образцов, термообработка, испытания на твердость и механические свойства были выполнены в строгом соответствии с установленной процедурой.

Термообработка проводилась в нескольких лабораторных печах, и специальная система закалки в масле была использована для обеспечения нужной равномерности охлаждения.



Исследование микроструктуры марки 40Cr показало, что металл после низкотемпературной прокатки

имеет очень равномерную ферритно-перлитную структуру (рис. 8). Ферритная фаза составляет более 30%, в то время как в горячекатаном металле она присутствует только в форме эвтектоидной фазы на границе зерен.

В металле после низкотемпературной прокатки размер зерна составляет ASTM 9, в то время как в горячекатаном металле - ASTM 7.

Если учесть твердость 190 HB, то очевидно, что измельчение зерна вызывает интенсивное образование ферритной фазы. Механические свойства представлены в таблице 6, которая показывает, как можно обрабатывать металл с сокращенным циклом отжига или вообще без отжига, в зависимости от назначения продукции.

Таблица 6

МАРКА	СТАНДАРТ	ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ	ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ	A	Z	ТВЕРДОСТЬ
		(МПа)	(МПа)	(%)	(%)	(HB)
40Cr	GB3077-99	455	690	27	47	190

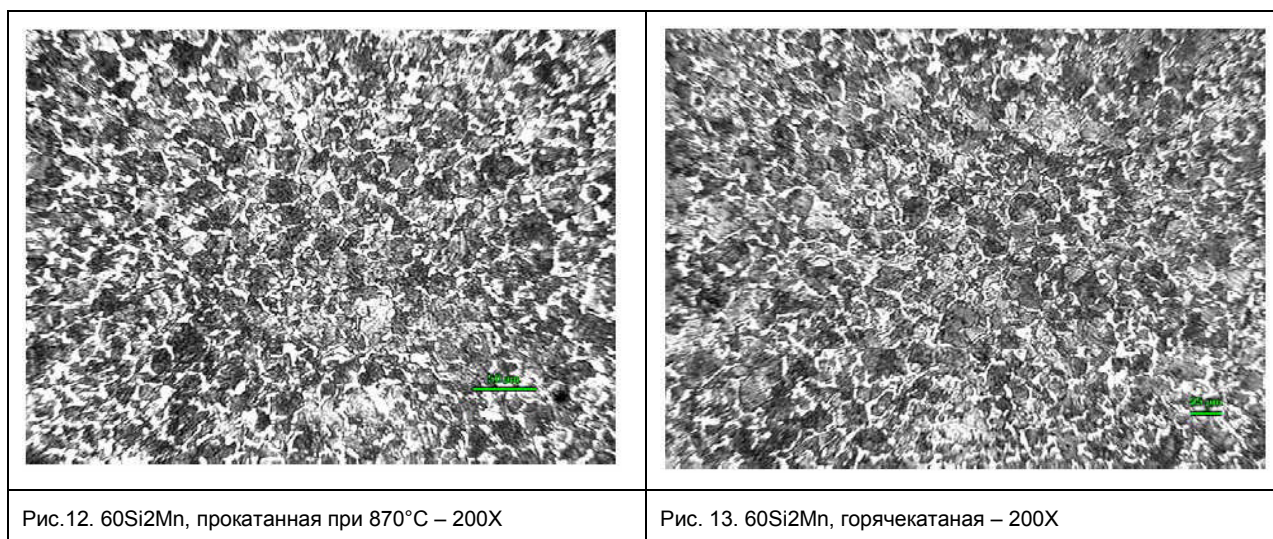


Рис. 12. 60Si2Mn, прокатанная при 870°C – 200X

Рис. 13. 60Si2Mn, горячекатаная – 200X

Более высокая температура прокатки в чистовой группе, выбранная для марки 60Si2Mn, показана на рис. 12, где ферритная фаза более сходна с эвтектоидной. В любом случае, если мы сравним металл, полученный методом низкотемпературной прокатки, с горячекатаным (рис. 13), разница будет заметна не только по размеру зерна (который изменяется с 9 до 8), но и в распределении данной фазы. Равномерность охлаждения обеспечивает однородность структуры металла по поперечному сечению и отсутствие крупных зерен.

В таблице 7 представлены механические свойства 7. Твердость достаточно низкая, поэтому при холодной резке металл не будет растрескиваться.

Таблица 7

МАРКА	СТАНДАРТ	ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ	ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ	A	Z	ТВЕРДОСТЬ
		(МПа)	(МПа)	(%)	(%)	(HB)
60Si2Mn	GB1222-84	580	925	9	12.5	255

8. Выводы

На новом сортовом стане №1 для спецсталей на заводе Tianjin I&S, вскоре после прокатки первой заготовки, был настроен процесс низкотемпературной прокатки, и у Заказчика появилась возможность выпускать качественные марки стали согласно стандарту GB. Продукция имеет высокое качество по структуре, по качеству поверхности и по соблюдению допусков. Процесс низкотемпературной прокатки показал, что можно изменять микроструктурные фазы низколегированных марок стали в определенном диапазоне и, таким образом, влиять на технологические свойства. Решение о применении данного процесса должно приниматься с учетом фактических требований к отдельной марке стали, последующей термообработки и конечного назначения продукции.

Библиография

- * “Новый литейно-прокатный модуль на заводе компании Baosteel Group Shanghai №5 (Китайская Народная Республика) производительностью 350,000 т/г для выпуска сортового проката из нержавеющей и специальных сталей” – доклад представлен на “3-м Китайском международном конгрессе по нержавеющей стали” – г. Шанхай
- * “Последние разработки и результаты в области прокатки и термообработки спецсталей в потоке” – доклад представлен на конференции “Thermomech”, Бельгия, 2004 г.
- * “Качество продукции и управление процессов на новом сортовом стане с прутковой линией на заводе CORUS Thybergh” – доклад представлен на Конференции “SMEA Conference and Exhibition Quality Steel - Advances in Process Control” – г. Шеффилд - Великобритания
- * “Литейно-прокатный модуль производительностью 350,000 т/г прутков, катанки и сортового проката в бунтах на заводе Baosteel Shanghai n°5 – Китайская Народная Республика” – доклад представлен на “4-м Международном форуме по никелевым, нержавеющей и специальным сталям” - Бильбао, Испания.