



The article gives a description of production technology of rod with different hydrocarbon content

В. В. ФИЛИППОВ, РУП "БМЗ",
А. Б. СТЕБЛОВ, БГПА, С. А. ИСАКОВ, РУП "БМЗ"

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ

УДК 621.778.078

Одной из наиболее объемных позиций в ассортименте проката стана 150 РУП "БМЗ" является катанка диаметром 5,5 и 6,5 мм. При годовом плане производства стана в 2001 г. 350 тыс. т доля низкоуглеродистой катанки из Ст.1сп, 3сп составит 23,2%, высокоуглеродистой с содержанием углерода более 0,7%—52,3 и катанки для металлокорда — 23,5%. Низкоуглеродистая катанка диаметром 6,5 мм производится и отгружается потребителям как товарная, а катанка диаметром 5,5 мм используется в основном как подкат для производства проволоки В-1 диаметром 3, 4 и 5 мм для армирования железобетонных изделий. Высокоуглеродистая катанка производится только диаметром 5,5 мм и служит подкатом для сталепроволочных цехов БМЗ при производстве металлокорда и высокопрочной проволоки. В зависимости от назначения катанки формируются и различные требования по показателям качества.

В настоящей работе обобщены результаты многолетних заводских исследований в области

совершенствования технологии производства катанки:

- низкоуглеродистой повышенной деформируемости из Ст.1сп;
- низкоуглеродистой для армирования железобетонных изделий из Ст.3сп;
- высокоуглеродистой для производства металлокорда.

Данные по химическому составу и механическим свойствам катанки с различным содержанием углерода приведены в табл. 1, 2.

Основное внимание в работе уделено технологии производства катанки для металлокорда. Несмотря на то что сегодня БМЗ выпускает лучшую в странах СНГ высокоуглеродистую катанку, работы по совершенствованию технологии ее производства продолжают. Это связано не только с объемом производства (181 тыс. т в год), высокой ценой конечной продукции (более 2000 у.е. за 1 т), но и с ростом объема экспорта металлокорда и высокоуглеродистой проволоки.

Таблица 1. Химический состав углеродистой стали

Марка стали	Содержание химических элементов, %									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N ₂
Ст.1сп	0,07-0,15 0,10	0,13-0,24 0,16	0,3-0,48 0,41	0,004-0,014 0,003	0,008-0,02 0,015	0,12-0,21 0,17	0,12-0,21 0,17	0,24-0,5 0,31	0,003-0,004 0,0035	0,003-0,11 0,0087
Ст.3сп	0,14-0,25 0,17	0,13-0,33 0,19	0,38-0,65 0,53	0,018-0,046 0,34	0,008-0,03 0,14	0,08-0,27 0,14	0,08-0,22 0,14	0,21-0,4 0,28	0,003-0,04 0,005	0,003-0,11 0,0087
Ст.70К	0,71-0,75 0,73	0,15-0,25 0,21	0,4-0,7 0,56	0,008-0,015 0,011	0,003-0,015 0,009	0,02-0,05 0,034	0,03-0,05 0,037	0,02-0,05 0,033	0,002-0,004 0,0031	0,002-0,004 0,0026
Ст.80К	0,81-0,87 0,84	0,15-0,25 0,19	0,4-0,7 0,56	0,008-0,013 0,01	0,003-0,015 0,01	0,02-0,05 0,03	0,01-0,03 0,027	0,01-0,03 0,02	0,002-0,004 0,0029	0,002-0,003 0,0021

Примечание: В числителе — минимум — максимум, в знаменателе — среднее значение.

Таблица 2. Механические свойства углеродистой катанки

Марка стали	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	φ , %	Характеристика микроструктуры катанки
Ст.1сп, диаметр 6,5 мм	375 — 491 423	300 — 372 330	Не нормируется	60 — 76 70,1	Феррит + перлит, балл зерна — 7—8
Ст.3сп, диаметр 5,5 мм	435 — 630 465	305 — 435 388	17 — 43 33	60 — 71 62	Феррит + перлит, балл зерна — 9—10
Ст.70К, диаметр 5,5 мм	1050 — 1120 1056	Не нормируется	14 — 20 17	40 — 45 42	Сорбитообразный перлит — 1—2 балла Действительное зерно № 8—9
Ст.80К, диаметр 5,5 мм	1115 — 1170 1140	Не нормируется	9 — 14 11	30 — 35 32	Сорбитообразный перлит — 1—2 балла

Примечание. В числителе — минимум — максимум, в знаменателе — среднее значение.

Основные аспекты технологии производства низкоуглеродистой катанки

Низкоуглеродистая Ст.1сп и 3сп для производства катанки диаметром 6,5 и 5,5 мм производится в электросталеплавильном цехе №1. Сталь выплавляется из углеродистого лома 1А-5А в 100-тонных дуговых электропечах мощностью 75 МВ. Разливка на заготовки сечением 125×125 мм осуществляется на двух 6-ручьевых машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Технология разливки обеспечивает макроструктуру заготовки с осевой рыхлостью 1—3 балла. Осевая химическая неоднородность на поперечных темплатах выявляется слабо и обычно не превышает 1—2 балла. В отдельных случаях наблюдаются угловые диагональные ликвационные полосы и трещины не более 2-го балла, образование которых связано с настройкой машины непрерывной разливки. Кроме диагональных, иногда возникают трещины и ликвационные полосы 1—2 балла перпендикулярно граням. На серных отпечатках непрерывнолитых заготовок со стороны малого радиуса встречается точечная неоднородность. Кроме того, на глубине 5—10 мм от поверхности заготовки наблюдаются скопления шлаковых включений, расположенных преимущественно со стороны малого радиуса изгиба кристаллизатора. Исследования показали [1], что это многофазные оксидные включения, образование которых происходит в кристаллизаторе на границе раздела металл—воздух.

Макроструктурный анализ выявил два типа неметаллических включений: недеформирующиеся глобулярной формы диаметром 0,003—0,02 мм, что соответствует 2-му баллу по ГОСТ 1778-70 и деформируемые, сечением 0,01—0,02 мм, вытянутые вдоль направления прокатки. В обоих случаях — это силикаты марганца с оболочкой из оксида железа, различие в деформируемости которых объясняется соотношениями составляющих их компонентов [2]. Микроструктура заготовок из низкоуглеродистой стали — ферритно-перлитная с ярко выраженным ферритным характером. Перлит располагается в междуветвях, а феррит — в осевых участках дендритных ветвей. К центру заготовки структура укрупняется, а феррит выделяется в виде равновесных зерен.

Производство катанки повышенной деформируемости из Ст.1сп

Катанка диаметром 6,5 мм из Ст.1сп отружается потребителям для дальнейшей перетяжки на метизную продукцию по ТУ РБ 04778771.032-96. По данным Речицкого метизного завода [1], передельная катанка, производимая БМЗ, имеет недостаточно высокую технологическую пластичность при волочении. Сравнение ее с деформируемостью катанки из кипящей Ст.1кп, производимой комбинатом "Криворожсталь", показывает, что износ волок при волочении катанки из Ст.1сп в среднем выше на 20%. При этом технологические операции при заправке

катанки в волочильные станы затруднены. При волочении катанки до диаметра 3,5 мм наблюдается повышенная обрывность проволоки. Это происходит по нескольким причинам. При равном среднем содержании углерода (0,1%), марганца (0,41%) содержание кремния в Ст.1сп в среднем составляет 0,16%, а в Ст.1кп — 0,038%. Известно, что кремний как упрочнитель в 2 раза сильнее марганца и образует в стали хрупкие недеформируемые включения [3], которые приводят к повышенному износу волок. Кремний существенно понижает пластичность металла при накопленной в процессе волочения деформации. Кроме кремния, на снижение пластичности стали влияет азот.

В работе В. В. Пичугина [4] показано, что содержание азота в сталях спокойных марок всегда выше, чем в сталях кипящих марок. Общеизвестно, что повышенное содержание азота при выплавке в электродуговых печах объясняется процессами, идущими в зоне горения дуг при интенсивном расплавлении. ГОСТ 380 регламентирует повышенное содержание азота (до 0,012%) для сталей, выплавленных в электродуговых печах. Исследования, проводимые на БМЗ, позволили получить регрессионное уравнение, устанавливающее количественную зависимость относительного сужения от содержания азота:

$$\varphi = 74,6 - 1993,4 N_2 \quad (1)$$

Кроме того, были выполнены сравнительные расчеты зависимости запаса пластичности от содержания окисленности (FeO) и основности (CaO/SiO₂) шлака по методике [5].

Установлено, что использование запаса пластичности на катанке из Ст.1кп—3кп в среднем на 37,2 % выше, чем на катанке из Ст.1сп. Следует учитывать, что суммарный коэффициент вытяжки при получении катанки диаметром 6,5 мм из непрерывнолитой заготовки сечением 125×125 мм в 53 раза меньше, чем при получении катанки в условиях комбината "Криворожсталь", где сталь разливается в слитки сечением 860×840 мм и более. При последовательной прокатке имеющиеся микродефекты в макроструктуре стали завариваются и раскатываются на более значительную длину, что положительно сказывается при последующей деформации на волочильных станах. Работы, направленные на повышение деформируемости катанки из Ст.1сп, показывают, что существенного повышения пластических свойств трудно ожидать, тогда как затраты по металлургическим переделам неоправданно возрастают.

Производство катанки для армирования из Ст.3сп

Технология выплавки и разливки заготовок из Ст.3сп аналогична технологии производства Ст.1сп. Химический состав стали, приведенный в табл. 1, свидетельствует о более высоком содержании основных элементов С, Mn и Si, что обеспе-

чивает и более высокие механические свойства в катанке (см. табл. 2). По выборке данных за период 1988—2000 г. были получены регрессионные уравнения для расчета механических свойств катанки:

$$\begin{aligned}\sigma_b &= 493,9 + 686,2C + 345Si + 148,5Mn - 41,18d, \\ \sigma_T &= 423,3 + 656,4C + 144,5Si + 72,8Mn - 31,8d, \\ \delta_5 &= 31,7 - 42,1C - 19,6Si + 2,9Mn + 0,78d, \\ \varphi &= 72,7 - 55,3C - 21,4Si + 1,899Mn + 0,98d.\end{aligned}\quad (2)$$

Проверка уравнений по данным плавочного химического состава подтвердила адекватность в пределах ошибки уравнений регрессии с достоверной вероятностью 0,95 по каждому из показателей.

Прокатка катанки осуществляется на непрерывном стане 320/150, имеющем участок производства проката, сматываемого в бунты (мотки), который оснащен высокоскоростным блоком чистовых клетей, обеспечивающим точность геометрических размеров катанки и практически полное отсутствие прокатных дефектов поверхности [6]. После прокатки катанка и бунтовая сортовая сталь подвергаются двухстадийному охлаждению. Выходящая из чистового блока катанка охлаждается водой в четырех последовательно расположенных охлаждающих секциях длиной 5,8 м. Между охлаждающими секциями предусмотрены участки выравнивания температуры по сечению катанки длиной 2,26 м между первой, второй и третьей секциями и длиной 12 м между третьей и четвертой секциями. На охлаждающие устройства и отсечные форсунки поступают технически чистая вода под давлением 6—12 бар и воздух для отсечки воды под давлением 6 бар. После водяного охлаждения катанка сворачивается виткообразователем через тянущие ролики в витки плоской спирали и укладывается на роликовый транспортер, где подвергается воздушному охлаждению. Плоские витки спирали катанки перемещаются в специальном тоннеле с теплоизолирующими боковыми стенками и поднимающимися крышками. Затем витки катанки собираются в мотки при помощи специального устройства. Термическая линия имеет 16 зон охлаждения. Под охлаждающими зонами 1—8, 15 и 16 смонтированы нагнетающие вентиляторы производительностью 6500 м³/ч. Прокат, уложенный на транспортере, может охлаждаться в разных режимах с открытыми и закрытыми крышками, с работающими или отключенными вентиляторами по зонам. Скорость перемещения витков регулируется в пределах 0,05—1,3 м/с. Для обеспечения беспрепятственного прохождения конца раската через участок водяного охлаждения предусмотрено автоматическое отключение подачи воды в охлаждающие устройства до момента захвата переднего конца раската тянущими роликами. Было установлено, что при производстве катанки с содержанием углерода до 0,35%

и скорости движения витков на роликовом транспортере в пределах 0,2—0,5 м/с скорость охлаждения на второй стадии не оказывает существенного влияния на уровень механических свойств катанки.

Согласно рекомендациям Полоцкого государственного университета, катанка диаметром 5,5 мм может эффективно использоваться взамен монтажной гладкой арматуры 6,0 мм того же класса прочности или в соответствии с ТУ РБ 400074854.047-2001 как эффективная арматура класса Ат500С. При этом экономия металла в народном хозяйстве составляет 16—20 %. Требуемые механические свойства могут быть обеспечены при содержании углерода 0,22—0,25%, марганца $\geq 0,75$, кремния $\geq 0,25\%$, при повышенных скоростях охлаждения катанки после прокатки на блоке. При охлаждении арматурной катанки на первой стадии до 900—750°C сталь приобретает ферритно-перлитную структуру. Величина зерна феррита при охлаждении водой до 900—800°C соответствует № 8—9, а при охлаждении до 750°C и ниже ферритное зерно измельчается до № 10. В неохлажденных водой частях раската по сравнению с охлажденными частями вследствие большого развития собирательной рекристаллизации образуется более крупное аустенитное зерно, что приводит к изменению соотношения феррита и перлита. При охлаждении до 720°C в поверхностных слоях катанки образуется структура отпущенного мартенсита. Исходя из условия равнопрочности охлажденных и неохлажденных частей катанки по длине бунта, рекомендовано раскладывать катанку на линии Стелмор при 800—820°C. Механические свойства катанки по длине раската изменяются незначительно [7].

Нельзя не учитывать влияние прокатного передела на деформируемость проволоки при волочении из катанки. В работе [2] приводятся данные, полученные на катанке из Ст.3сп, 1сп стана 320/150. Наблюдающиеся в заготовках осевые рыхлости и трещины завариваются на начальной стадии прокатки, однако неметаллические включения прослеживаются на всех стадиях процесса вплоть до катанки диаметром 5,5—6,5 мм, располагаясь параллельно поверхности металла на глубине 0,3—2,0 мм. При наличии указанных внутренних дефектов прокат полностью удовлетворяет требованиям стандартов как для катанки, так и для арматурной стали класса А-1.

Производство высокоуглеродистой катанки для металлокорда

Катанка для металлокорда должна обеспечивать значительно более высокий уровень механических свойств, что достигается высоким содержанием углерода 0,7—0,85% и микроструктурой стали (табл. 1, 2). В процессе волочения катанка вытягивается до толщины 0,15—0,35 мм и поэтому должна иметь высокую деформируемость. Одна из

основных причин обрывности кордовых нитей при волочении и свивке — недеформируемые включения. Обрывы проволоки по неметаллическим включениям происходят в основном из-за твердых включений корунда, муллита и других алюминатов, так как они являются концентраторами напряжений при деформации металла. Совершенствование технологии производства стали для металлокорда идет в направлении снижения в металле концентраций алюминия и кислорода до пределов, исключающих образование недеформируемых включений, а также модификаций включений — перевод состава включений из недеформируемой области в деформируемую.

Существующая технология производства кордовой стали на передовых металлургических заводах мира не гарантирует получение металла без неметаллических включений, но жестко регламентирует содержание вредных примесей и газов. Особенно большое внимание уделяется содержанию алюминия и кислорода. Включения глинозема могут образовываться в металле при 0,0004% [Al] и 0,00025% [O₂]. По требованиям ТУ 14-1-4752-89 на катанку для металлокорда БМЗ концентрация [O₂] должна быть не менее 0,005%, [Al] — не более 0,004%. Поэтому для гарантированного производства металлокорда без включений корунда массовые доли алюминия и кислорода в металле должны быть ниже указанных пределов и технология выплавки должна отвечать этим требованиям.

Влияние технологии сталеплавильного передела на качество катанки

Кордовая сталь в условиях БМЗ производится в следующей последовательности.

Выплавка осуществляется в ДСП-100, которая реконструирована на эркерный выпуск металла [8], что позволяет полностью отсекай печной шлак. Струя металла при этом более компактна и короче, время выпуска значительно сокращается, следовательно, снижается вторичное окисление и насыщение стали азотом. Полупродукт перед выпуском содержит в среднем 0,022% N₂, 0,02% Cr, 0,003% Al, не более 0,010% S и P. Продолжительность плавки определяется в основном скоростью процесса плавления и обезуглероживания непрерывно присаживаемых металлизированных окатышей. Снижение содержания фосфора и серы обеспечивается за счет постоянной присадки извести, шпата, кокса и обновления шлака. Регулярная присадка кокса необходима также для образования пенного шлака, экранирующего футеровку стен и свода от прямого излучения длинных дуг. Шлак также препятствует насыщению металла азотом во время плавления окатышей и за счет экранизации дуги повышает активную мощность трансформатора.

При выпуске плавки сталь раскисляют ферросилицием с низким содержанием алюминия и

продувают в ковше аргоном. Для снижения количества твердых неметаллических включений с высоким содержанием алюминатов и хрупких силикатов предложена новая технология ковшевого рафинирования кордового металла с помощью синтетического шлака, обладающего высокой ассимилирующей способностью к оксиду алюминия. Новая технология [9] для снижения запороченности стали недеформируемыми включениями предусматривает раскисление и легирование стали пироуглеродом при сливе из расчета получения в металле 0,55% углерода, после чего присаживается ферросилиций. Эффект повышения пластичности включений получен в результате того, что химический состав включений изменяется при обработке металлов кислым шлаком, приближаясь по составу к синтетическому низкоосновному шлаку, который имеет более низкую температуру плавления. При дальнейшей переработке катанки диаметром 5,5 мм с использованием новой технологии выплавки и внепечной обработки стали количество обрывов по неметаллическим включениям снизилось с 700 до 2000 км на обрыв. Полученные результаты показывают, что новая технология производства стали для металлокорда позволяет эффективно снижать загрязненность стали относительно крупными недеформируемыми включениями и модифицировать оставшиеся мелкие алюминатные включения.

Эффективной мерой повышения качества катанки является обработка стали на циркуляционном (РН) вакууматоре. В работе [10] приведены результаты, которые позволили получить содержание N₂ ≤ 0,002 % и недеформируемых включений не более 15 мкм. Технология дегазации регламентирует температурный режим и длительность обработки стали в вакууматоре. Обработанный в ковше металл поступает на МНЛЗ, где разливается в заготовки сечением 250×300 мм. МНЛЗ оборудована устройствами для защиты струи металла от вторичного окисления, автоматического поддержания уровня металла в кристаллизаторах и системой электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины заготовки в зоне вторичного охлаждения.

Влияние электромагнитного перемешивания (ЭМП)

В связи с тем что углерод неограниченно растворим в жидком железе, но ограниченно растворим в твердом, при кристаллизации стали для металлокорда получают развитие ликвационные процессы. Степень ликвации углерода, которую определяли в проволоке как металлографическим способом по ГОСТ 10243-75, так и с помощью электронного микроскопа, ранее достигала до 28% (содержание углерода в сердцевине заготовки — 1,08% при среднем содержании—0,84%), или 2 баллов по шкале оценки подусадочной ликвации в катанке. Такая неоднородность слитка приводила

к большим потерям металла при получении кордовых нитей (расслоение катанки при волочении, высокая обрывность). Поэтому были проведены исследования влияния факторов на ликвацию углерода в непрерывнолитом слитке и установление оптимальных параметров разливки кордовой стали, обеспечивающих минимальную ликвацию углерода по сечению слитка. Было определено [11], что повышение скорости разливки и температуры металла в промежуточном ковше увеличивает степень ликвации. При этом скорость разливки рекомендуется поддерживать в интервале 0,5–0,6 м/мин, а температуру металла в промковше на 20–30°C выше температуры ликвидуса. Однако выполнение указанных выше рекомендаций не гарантировало уровень ликвации в катанке, всегда удовлетворяющей заводским техническим условиям (ЗТУ). Катушки ЭМП устанавливали по большому радиусу разливочной дуги во второй зоне вторичного охлаждения, а на одном ручье — вторую катушку по малому радиусу на 20 см ниже первой и на расстоянии 5 см от заготовки. Наиболее оптимальную макроструктуру получили при установке катушки по большому радиусу и использовании немагнитных роликов диаметром 90 мм при следующем режиме: ток $I = 550\text{--}660$ А, $U = 300\text{--}320$ В, режим вниз — 360 с, пауза — 5 с. На макротемплетах получен слабый контур обратной ликвации, а в равноосной зоне — равномерное распределение ликвирующих примесей без ярко выраженного центрального ликвационного пятна. Более мягкое охлаждение также увеличивает зону равноосных кристаллов. При анализе структуры литого образца отмечено, что зона транскристаллизации не имеет четкой границы и ориентировочная ее толщина составляет 70 мм, а толщина зоны мелких равноосных кристаллов — 15 мм. Осевая химическая неоднородность рассредоточена по всей центральной зоне. При оценке образцов обжатой заготовки сечением 125×125 мм осевая рыхлость и общая ликвация рассредоточены по всему центральному сечению, где отмечаются следы влияния электромагнитного перемешивания. Подсадочная ликвация снижена в среднем на 22 %.

Совершенствование защиты при непрерывной разливке кордовой стали

Известно, что на участке сталеразливочный ковш—кристаллизатор происходит окисление расплавленного металла и насыщение стали азотом. В работе [12] приведены данные по изменению содержания N_2 в стали 70К при разливке на БМЗ. Если в сталеразливочном ковше содержание азота $(0,0026\text{--}0,0042)/(0,0034\pm 0,0016)\%$, то уже в промежуточном ковше — $(0,004\text{--}0,005)/(0,0046\pm 0,0018)\%$, а в кристаллизаторе оно возрастает до $(0,0042\text{--}0,0025)/(0,0058\pm 0,0018)\%$. В числителе (минимум-максимум) — пределы изменения содержания азота, в знаменателе — средние значения

содержания азота по результатам 10 проб из каждой плавки. Установлено, что содержание N_2 в стали возрастает более чем на 0,002%. Известны различные способы защиты металла от окисления в процессе разливки. В некоторых случаях [13] под крышку промежуточного ковша подается пропан-бутановая смесь. На БМЗ для снижения степени азотации металла в процессе разливки стали в настоящее время используется система защиты струи металла на участке стальной-промежковш — защитные трубы с подачей аргона, а на участке промковш-кристаллизатор — погружные стаканы. При этом содержание азота в металле снизилось и по переделам изменяется следующим образом: перед выпуском из печи — $0,0035\pm 0,0010\%$; в сталеразливочном ковше — $0,0037\pm 0,0011$; в промежуточном ковше и катанке — $0,0041\pm 0,0009\%$.

Прокатный передел.

Получение катаной заготовки для металлокорда

Непрерывнолитые заготовки сечением 250×300 мм нагреваются в печах с шагающими балками и прокатываются на стане 850 на заготовку сечением 125×125 мм. Основные требования на этом переделе предъявляются к качеству поверхности катаной заготовки. Оптимизация режимов нагрева с точки зрения обеспечения требуемой температуры прокатки и градиента температуры достаточно подробно описана в работе [14].

При поиске оптимального решения при нагреве, по нашему мнению, предпочтение следует отдать минимизации обезуглероженного слоя заготовки при технологически допустимой толщине окалины. Несмотря на то что часть дефектов на поверхности выгорает и удаляется с окалиной, остается необходимость выявить допустимую глубину дефектов на поверхности катаной заготовки после механизированной зачистки. Эти дефекты удаляются с окалиной при последующем нагреве в печи и выкатываются на стане 320/150.

Выкатываемость дефектов поверхности

При контроле качества поверхности заготовок с целью уменьшения объемов зачистки металла настройку приборов на линии дефектоскопии выполняют с учетом снижения дефектов в результате угара металла и вытяжки при прокатке. Исследования позволили получить уравнение [15] для расчета допустимой глубины дефектов на заготовке для катанки под холодную высадку по ГОСТ 10702, которое справедливо и для катанки для металлокорда:

$$h_{дз} \leq 0,4h_{дп}\sqrt{\mu_z} + 0,31K_y a_z, \quad (3)$$

где $h_{дз}$, $h_{дп}$ — соответственно глубина дефектов на заготовке и допускаемая глубина дефектов на прокате, мм; μ_z — суммарный коэффициент вытяжки на сортовом стане; K_y — величина угара при нагреве заготовок, %, a_z — размер стороны

квадратной заготовки. Как установлено, выкатываемость дефектов при прокатке можно считать удовлетворительной, если технология прокатки обеспечивает остаточную глубину дефекта на готовом прокате примерно в 2,5 раза меньшую, чем допускается по ЗТУ 840-03-97 (не более 0,1 мм для подката диаметром до 20 мм). Полученная величина глубины дефектов $h_{дз}$ является оптимальной для настройки приборов линии дефектоскопии на стане 850. Глубина дефекта на поверхности заготовки при прокатке катанки на стане 320/150 не должна превышать 1,17 мм.

Прокатка катанки на стане 320/150

Заготовка сечением 125×125 мм после удаления дефектов поверхности и контроля макроструктуры нагревается в печи с шагающим подом. Нагретые до необходимой температуры заготовки прокатываются в 20-клетьевом стане до подката диаметром 17 мм, а затем на проволочном блоке до диаметра 5,5 мм. Технологические операции по прокатке заготовки на катанку из стали 70К—80К аналогичны катанке из Ст.1сп, 3сп. В отличие от низкоуглеродистой стали заготовки из стали 70К нагреваются в печи по режиму, обеспечивающему снижение обезуглероживания поверхности.

Термодеформационная модель проката

Формирование основных показателей качества горячекатаного проката во многом определяется схемой калибровки и изменением температуры раската в процессе прокатки. Для дальнейшей оптимизации качества необходима математическая модель описываемого процесса прокатки. Модель должна позволять получать расчетные данные, адекватные реальной технологии в установленных пределах изменения основных параметров. Известные модели, как правило, двух- и трехмерные, однако они требуют больших затрат машинного времени. Процесс моделирования прокатки катанки может быть предельно упрощен за счет использования одномерного варианта тепловой задачи для установившегося процесса прокатки в системе простых овальных и круглых калибров [16]. При решении задачи теплообмена в очаге деформации овальные калибры можно заменить круглыми с эквивалентными диаметрами.

Так как по длине очага деформации эквивалентный радиус прокатываемой заготовки $R(x)$ изменяется, то целесообразно произвести замену переменных

$$(x, r) \rightarrow \left(x, \eta = \frac{r}{R(x)}\right). \quad (4)$$

При неизменной области решения задачи ($0 \leq \eta \leq 1$) в новых переменных тепловую задачу можно записать в виде

$$\begin{aligned} v_n \rho_n C_n \left(\frac{\partial T_n}{\partial x} - \frac{\eta}{R(x)} \frac{\partial R}{\partial x} \frac{\partial T_n}{\partial \eta} \right) = \\ = \frac{1}{R^2(x)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\lambda_n \eta \frac{\partial T_n}{\partial \eta} \right) + W, \end{aligned} \quad (5)$$

$$T_n|_{x=0} = T_{n0}(\eta), \quad \frac{\partial T_n}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} = 0, \quad (6)$$

$$\lambda_n \frac{1}{R(x)} \frac{\partial T_n}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1} = q_0 / (1 + K) - \alpha (T_n - T_b) \Big|_{\eta=1}, \quad (7)$$

где T_n , T_b — температура полосы и валка; ρ , C_n , λ — изменяющаяся плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность; $W = m \sigma \ln(\lambda) v_n / l$ (W — выделение тепла; m — коэффициент выхода тепла; σ — сопротивление деформации, зависящее от средней температуры раската в очаге деформации; v_n — скорость прокатки; l — длина очага деформации); $q_0 = Q_{тр} v_n / l F$ (q_0 — суммарный поток тепла трения; F — площадь контактной поверхности; $Q_{тр} = V_0 \ln(\lambda) m (P_{ср} - \sigma)$ — количество тепла за счет граничного трения; $P_{ср}$ — среднее удельное давление, рассчитываемое на основе известных мето-

дик [17]); $K = \frac{\lambda_n \sqrt{a_b/a_n}}{\lambda_b}$, a_n , a_b — коэффициенты температуропроводности; V_0 — объем очага деформации; α — коэффициент контактного теплообмена через окалину.

Уравнения для процесса теплопередачи через валки можно записать в виде

$$\omega \rho_b C_b \frac{\partial \bar{T}_b}{\partial \varphi} = \frac{2 R_s}{R_s^2 - R_l^2} (q_b - \alpha (T_n - T_b)), \quad (8)$$

где R_s — эквивалентный катающий радиус; $R_l = R_s - d$; φ — угол захвата при установившемся

процессе прокатки; $d = 2,8 \sqrt{\frac{l V_b}{a_b}}$ (V_b — объем валка; d — глубина проникновения тепла в тело валка).

Модель строилась путем введения усредненной по площади поперечного сечения температуры металла

$$\bar{T}_n = \frac{2}{R^2(x)} \int_0^{R(x)} T(r) r dr. \quad (9)$$

Охлаждение раската в межклетевых промежутках находили из решения задачи

$$\rho_n c_n V_n \frac{\partial T_n}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial r} \right), \quad (10)$$

$$T_n|_{r=l} = T_n(r), \quad \frac{\partial T_n}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (11)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = -\alpha_c (T_n - T_c) \Big|_{r=R_0}, \quad (12)$$

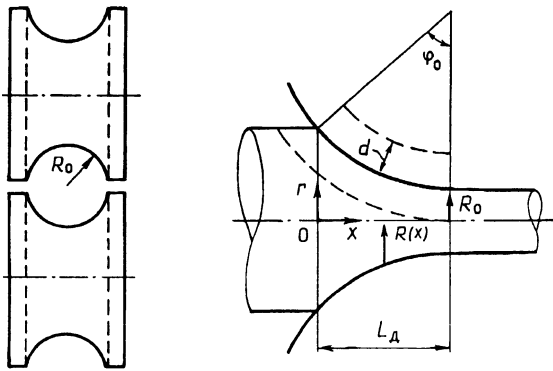


Рис. 1. Схема очага деформации

где T_c — температура окружающей среды; α_c — эффективный коэффициент теплообмена со средой. Расчет выполняли с учетом изменения $R(x)$ в соответствии с условием замены переменных по (4). На основе разработанной модели были выполнены численные расчеты на ЭВМ методом конечных разностей. Шаги по χ и φ согласовывались в соответствии с геометрией области решения задачи (рис. 1).

Подробно методика расчета описана в работе [16]. Задача решалась методом Рунге—Кутты 4-го порядка. В технологически допустимом диапазоне изменения температур (100—300°C) погрешность составляла не более 3°C. Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 2 (участок А).

Расчеты позволяют сделать вывод, что в первых клетях стана, когда толщина раската достаточна большая, а скорости прокатки невелики, в контактом теплообмене превалирует передача тепла в валки. Несмотря на интенсивное тепловыделение от трения и пластической деформации, происходит снижение среднemasсовой температуры раската. Однако уже после 5-й клетки выделяющееся количество тепла превышает потери тепла при охлаждении и происходит разогрев прокаты-

ваемой полосы. Неравномерностью температурного поля в последних клетях можно пренебречь.

Разработанный комплекс математических моделей и энергосиловых процессов обладает достаточной универсальностью и служит основой для оптимизации технологических режимов прокатки на стане 320/150 БМЗ.

Требования к структуре катанки для металлокорда

Технологичность углеродистой катанки на метизном переделе, служебные свойства металлокорда и стальных канатов определяются при прочих равных условиях микроструктурой и относительной глубиной обезуглероженного слоя поверхности катанки (О.С.), которая нормируется в ОСТ 14-15-37-85 по относительной глубине распространения в поверхностных слоях металла видимого различия микроструктуры и более низкого содержания углерода в сравнении с сердцевиной проката. Оптимальной структурой катанки признан сорбитообразный перлит [18]. Относительная глубина (О.С.) в углеродистой катанке, подвергнутой двухстадийному охлаждению, может быть уменьшена по сравнению с исходной заготовкой вследствие действия двух основных факторов: ускоренного перераспределения углерода по сечению при горячей деформации (благодаря взаимодействию образующихся и движущихся дислокаций с атомами углерода); увеличения в поверхностной зоне катанки объема структур квазиэвтектоида в процессе ускоренного охлаждения после деформации. Величина аустенитного зерна, формируемого в процессе термдеформационной обработки стали, влияет на дисперсность перлита и интенсивность диффузионных процессов.

Установлено, что при температуре 850°C и выше происходит процесс повторной рекристаллизации, что обусловлено повышенной плотнос-

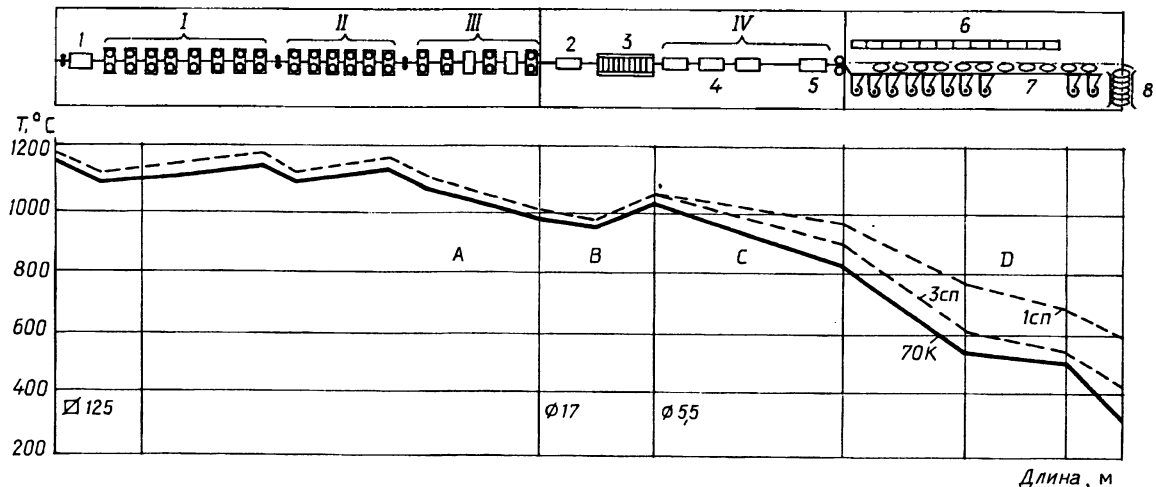


Рис. 2. Расчет изменения средней температуры раската на стане 320/150: I — гидросбив окалины; 2 — водяное охлаждение; 3 — Морган-блок; 4, 5 — секции водяного охлаждения; 6 — изолирующие крышки; 7 — трасса воздушного охлаждения (Стелмор); 8 — бунтоприемник: I — черновая группа клетей; II — промежуточная группа клетей; III — чистовые клетки; IV — трасса водовоздушного охлаждения

тью дефектов кристаллической решетки аустенита после процесса динамической и метадинамической рекристаллизации. При выдержке металла при температуре менее 850°C метадинамическая рекристаллизация получает все меньшее развитие, а повторная — отсутствует полностью. Обнаруженное явление аномального изменения величины аустенитного зерна по мере снижения температуры при ускоренном охлаждении после горячей деформации в некоторой степени аналогично процессу измельчения аустенита, наблюдаемому при нагреве крупнозернистой стали до определенной температуры (точки Чернова). Было установлено, что при температуре 750°C зерно крупнее, чем при температуре 950°C, причем при выдержках различной длительности (5–120 с). С учетом результатов исследований в потоке мелкосортно-проволочного стана БМЗ были сделаны выводы по изменению временного сопротивления (σ_b), глубины (О.С.), величины аустенитного зерна (D) и дисперсности перлита (D_p) в катанке из стали 70К в зависимости от среднemasсовой температуры после ускоренного охлаждения (рис. 3). Получены следующие выражения, которые с технологической точностью описывают процесс изменения структуры охлаждаемой катанки:

$$\sigma_b = 1000 \left[39,6 \left(\frac{T}{1000} \right)^4 - 150,3 \left(\frac{T}{1000} \right)^3 + 211,6 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 - 130,7 \left(\frac{T}{1000} \right) + 30,9 \right], \quad (13)$$

$$O.C. = 0,07 \left(\frac{T}{100} \right)^2 - 1,58 \left(\frac{T}{100} \right) + 9,63, \quad (14)$$

$$D = 0,49 \left(\frac{T}{100} \right)^4 - 17,6 \left(\frac{T}{100} \right)^3 + 23,4 \left(\frac{T}{100} \right)^2 - 1369 \left(\frac{T}{100} \right) - 3008,5, \quad (15)$$

$$D_p = 8,7 \left(\frac{T}{1000} \right)^3 - 23,6 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 + 20,9 \left(\frac{T}{1000} \right) - 5,85. \quad (16)$$

Ускоренное охлаждение водой после горячей прокатки приводит к формированию в поверхностных слоях катанки цементита глобулярной формы и пластинчатой морфологии, что обуславливает изменение видимого обезуглероживания в стали. С учетом влияния фазовых и структурных превращений, происходящих в катанке после горячей деформации и ускоренного охлаждения, видимая глубина обезуглероженного слоя возрастает по мере снижения среднemasсовой температуры катанки после охлаждения водой. Для формирования оптимальной структуры катанки из стали 70К при двустадийном регулируемом охлаждении температура конца охлаждения должна

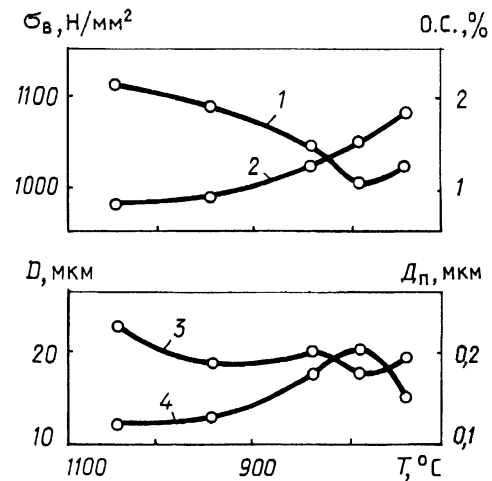


Рис. 3. Зависимость σ_b (1), (О.С.) (2), D (3), D_p (4) в катанке из стали 70К от среднemasсовой температуры после ускоренного охлаждения

составлять 900–950°C, что обеспечивает при последующем охлаждении на воздухе образование наиболее дисперсной структуры сорбитообразного перлита и минимальной глубины (О.С.). На основании дальнейших исследований были сделаны выводы, которые отражены в [19]. С целью повышения дисперсности перлита и снижения (О.С.) был предложен способ прокатки. Предлагаемый способ изготовления проката включает в себя горячую прокатку катанки диаметром d при температуре 900–1100°C, выдержку после выхода из чистой клетки стана, определяемую по выражению: $\tau = (0,5–1,5)d^2$, циклическое охлаждение водой до 800–950°C, после которого производят дополнительную выдержку в течение $\tau_2 = (10–15)d^2$ и последующее регулируемое охлаждение на воздухе. Дополнительная выдержка τ_2 дает возможность после циклического охлаждения водой при 800–950°C в большей мере развиваться процессам собирательной рекристаллизации, что укрупняет зерно и позволяет повысить дисперсность перлита, а также уменьшить глубину обезуглероженного слоя в прокате. Требуемый параметр структуры отражен в заводских технических условиях ЗТУ 840-03-87.

Важным требованием, предъявляемым к пердеальной катанке, является стабильность механических свойств в партии и по длине мотка [20]. Для проверки правильности выбора технологических режимов прокатки и двустадийного охлаждения катанки была изучена стабильность механических свойств готового проката. По принятой на заводе схеме образцы для определения свойств отбирают от мотков, расположенных в начале, середине и конце плавки-партии; от контролируемого мотка — в его начале и конце. По каждому варианту отбора образцов по длине мотка (начало и конец) и расположению мотков в плавке (начало, середина и конец) составляли выборки большого объема (1600 значений) для определения временного сопротивления (σ_b), относитель-

ного удлинения (δ) и сужения (φ). В процессе анализа полученных выборок установлено, что во всех случаях эмпирическое распределение в них подчиняется нормальному закону. Было показано, что наименьший разброс значений σ_b наблюдается на мотках, расположенных в середине плавки, значений δ — в конце, а значений φ — в начале плавки.

Статистические методы позволяют объективно судить о характере явления, получать математические зависимости и решать задачи оптимизации, однако внутреннего механизма явления эти методы не вскрывают и для исчерпывающего объяснения требуется дополнительный качественный анализ. В связи с этим были проведены эксперименты для оценки стабильности механических свойств катанки по окружности витка и длине мотка. Исследования не выявили четкой зависимости величины относительного удлинения катанки от качества макроструктуры металла, температуры прокатки и режима двустадийного охлаждения. По-видимому, значение полностью определяется химическим составом металла и не может быть определяющим при корректировке технологических режимов прокатки и термической обработки катанки. Косвенно это подтверждается тем, что, например, в стандартах ISO, а также в Японии, ФРГ, Франции и Англии для высокоуглеродистой передельной катанки относительное удлинение не нормируется.

Установлено, что на механические свойства катанки влияют также скорость прокатки и температура металла после блока чистовых клетей. Наиболее значимыми параметрами обработки являются температура металла перед блоком и после каждой стадии охлаждения и разность температур металла, характеризующих скорость охлаждения на первой (водой) и второй (воздухом) стадиях. Указанные параметры выбраны в качестве управляющих, при воздействии на которые достигаются требуемые показатели качества катанки для металлокорда. Для оценки влияния химического состава металла на механические свойства исследовали 900 плавов непрерывнолитых заготовок стали 70. При изучении распределения свойств по длине окружности витка от пяти мотков одной плавки от каждого из пяти передних витков (после удаления неохлажденной части) отбирали образцы по схеме, показанной на рис. 4. Для установления характера распределения использовали значения математических ожиданий указанных характеристик в каждой точке измерения последовательно расположенных витков. Распределение значений σ_b , δ и φ по окружности витка показано на рис. 5.

Представленные данные свидетельствуют о равномерном распределении механических свойств по окружности витка (различие между значениями и в каждой точке находится в пределах ошибки измерения). Для исследования свойств по длине мотка от трех последовательно прокатанных мотков одной плавки отбирали образцы от каждого из 40 последовательно расположенных витков.

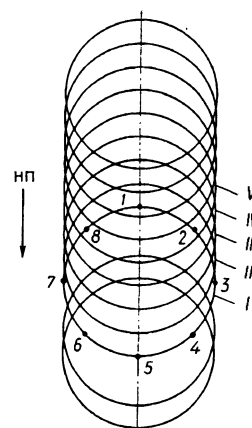


Рис. 4. Схема отбора образцов по длине окружности витка: I—V — витки, от которых отбирали пробы; 1—8 — точки отбора; НП — направление прокатки

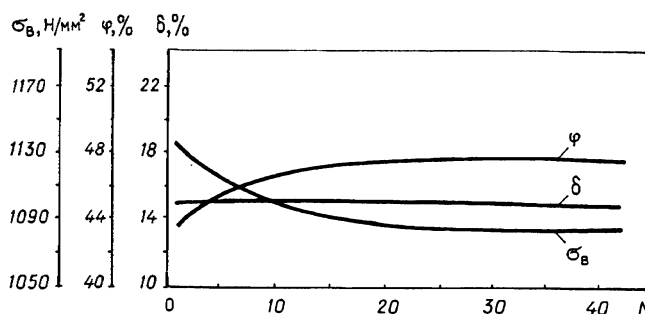


Рис. 5. Распределение механических свойств катанки по длине лотка. N — номер витка от начала мотка

Место отбора проб от каждого витка во всех случаях было постоянным. Из рисунка видно, что временное сопротивление уменьшается, а относительное сужение соответственно увеличивается на первых 15—20 витках, но в дальнейшем оно стремится к стабилизации, а характер изменения относительного удлинения остается постоянным. Изменение значений σ_b и φ на первых 15—20 витках связано с более высокой температурой их раскладки на конвейере, так как они не охлаждаются при прохождении участка водяного охлаждения. Сравнение полученных данных с результатами аналогичных исследований на зарубежных станах показало, что стабильность механических свойств катанки для металлокорда, производимой на стане 320/150, соответствует мировому уровню. При проведении исследований получили уравнения регрессии механических свойств в зависимости от содержания C, Mn, Si, скорости прокатки, температуры катанки на участках охлаждения. Исходными для уравнений регрессии служили параметры, фиксируемые АСУ стана. После обработки данных получили уравнения множественной линейной регрессии:

$$\begin{aligned} \sigma_b &= -153 + 1810C + 75,7Si + 34,4Mn + 44,84t_1 - \\ &\quad - 0,18\Delta t_2 - 1,05v_{\Pi} - 4,9t_{\Pi B} + 5,2t_B - 0,34t_{CT}, \\ \varphi &= 47,6 - 60,2C + 20,8Si + 9,9Mn + 0,3\Delta t_1 + \\ &\quad + 0,03\Delta t_2 + 0,18v_{\Pi} - 0,29t_{\Pi B} + 0,27t_B - 0,28t_{CT}, \\ \delta &= 46,4 + 0,28C - 13,7Si + 8,5Mn - 0,08\Delta t_1 + \\ &\quad + 0,03\Delta t_2 - 0,18v_{\Pi} - 0,05t_{\Pi B} - 0,1t_B + 0,02t_{CT}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $t_{пв}$, $t_{в}$, $t_{ст}$ — температура металла перед блоком чистовых клетей, на виткоукладчике, роликовом транспортере, Стелморе, °C; $v_{п}$ — скорость прокатки, м/с; $\Delta t_1 = t_{пв} - t_{в}$; $\Delta t_2 = t_{в} - t_{ст}$.

Использование полученных зависимостей позволяет воздействовать на управляющие параметры процесса прокатки и получать прокат с заданным комплексом механических свойств.

Процесс формирования оптимальной микроструктуры катанки при двухстадийном охлаждении характеризуется наличием совокупности частных критериев качества и ограничений, которые могут находиться в противоречии друг с другом, когда улучшение на одном из них ведет к ухудшению другого и наоборот. Как указывается в [21], это неизбежно влечет за собой внесение элементов качественного, субъективного характера в постановку задачи оптимизации, необходимых при решении вопросов о компромиссе между частными критериями, их ранжировке, свертке в обобщенный показатель качества процесса. Другим источником неопределенности являются сами частные критерии и ограничения, в формировании которых неизбежно присутствует информация, основанная на опыте и интуиции лиц, ответственных за ведение процесса. Ввиду этого при постановке задачи оптимизации использовали элементы теории нечетких множеств [14], разработанной для оперирования в условиях нестатистической неопределенности. Были получены уравнения регрессии, которые описывают изменения механических свойств катанки и микроструктуры в зависимости от интенсивности охлаждения катанки в секциях водяного охлаждения и на транспортере с регулируемой скоростью охлаждения. На первом этапе решения задачи оптимизации на основе данных промышленного эксперимента строилась регрессионная математическая модель процесса, связывающая выходные показатели качества с факторами, определяющими технологический режим. Поскольку в рассматриваемом случае показатели качества во многом зависят от исходного химического состава стали, в число варьируемых факторов включали процентное содержание основных легирующих компонентов C и Mn:

$$\begin{aligned}\sigma_b &= f_1(T, \varepsilon, v, \psi, C, Mn), \delta = f_2(T, \dots, \psi), \\ \varphi &= f_3(T, \dots, \psi), D = (T, \dots, \psi), \\ O.C. &= (T, \dots, \psi),\end{aligned}\quad (18)$$

где ε — относительное количество воздуха, нагнетаемого охлаждающими вентиляторами; v — скорость продвижения витков катанки в зоне термообработки; ψ — степень термоизоляции системы (относительная доля открытых крышек). Математическую модель участка водяного охлаждения первоначально рассматривали в виде $T = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$, где f — регрессионный полином; $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ —

расходы воды в секциях водяного охлаждения. Однако в ходе обработки данных эксперимента установлено, что наиболее точно процесс охлаждения описывает модель $T = (950,3 - 26,8\gamma)$, где $\gamma = \sum \gamma_i$.

Обобщенный критерий качества процесса формировали в виде [22]

$$\begin{aligned}D(T, \varepsilon, v, \psi, C, Mn) &= \min\{\mu_{\sigma_b}^{\alpha_1}(\sigma_b(T, \dots, Mn)), \\ &(\mu_{\delta}^{\alpha_2}(\delta(T, \dots, Mn)), (\mu_{\varphi}^{\alpha_3}(\varphi(T, \dots, Mn))), \\ &(\mu_{O.C.}^{\alpha_4}(O.C.(T, \dots, Mn))), \\ &(\mu_{D_3}^{\alpha_5}(D_3(T, \dots, \psi)), \mu_C^{\alpha_6}(C), \mu_{Mn}^{\alpha_7}(Mn)),\end{aligned}\quad (19)$$

где $\alpha_1 - \alpha_7$ — коэффициенты относительной важности критериев и ограничений; μ — функции желательности, возрастающие от 0 до максимального значения 1 при изменении показателя качества или фактора из области недопустимых в область наиболее предпочтительных значений. Они находились с использованием лингвистической шкалы парных оценок значимости и матрицы парных сравнений.

Искомая точка оптимума определялась максимизацией обобщенного критерия (19)

$$(C, Mn, T, \varepsilon, v, \psi)_{\text{опт}} = \arg \max_{C, Mn, \psi} (C, Mn, T, \varepsilon, v, \psi). \quad (20)$$

Для отыскания максимума использовали метод адаптивной квадратичной аппроксимации, обладающий свойством сглаживания незначимых локальных экстремум. Анализ результатов оптимизации показал, что наибольшее влияние на критерий D оказывают вариации факторов v и ψ . Их значения могут быть стабилизированы с высокой точностью и поддерживаться в окрестности оптимума с помощью имеющихся на участке термообработки систем автоматического регулирования.

Известно, что для улучшения захвата смазки при волочении необходима определенная шероховатость поверхности катанки. Однако до сих пор указанный параметр не регламентируется даже для такого ответственного вида прокатки, как катанка для металлокорда. Традиционный контроль параметров микрогеометрии поверхности по ГОСТ 2789-73 достаточно сложен, характеризуется низкой воспроизводимостью результатов. Специфика прокатки по системе овал—круг заключается в поперечном перемещении металла, что накладывает дополнительную неоднородность шероховатости по периметру катанки. Исследования, проведенные на БМЗ [23], показали, что в процесс формирования шероховатости катанки свой вклад вносит износ валков двух последних клетей стана 320 и валковых шайб всего десятиклетьевого блока 150. После смены валков при прокатке первых бунтов катанки параметр шероховатости R_z равен 16—18 мкм, а к 315 бунту (масса бунта 1450 кг) возрастает до 26 мкм. При замене шайб на двух последних клетях стана 320 шероховатость

снижается до 21 мкм. При шероховатости 16 мкм усилие волочения катанки 70К достигает максимального значения. При повышении шероховатости до 26 мкм усилие волочения снижается на 13%.

Были получены функциональные зависимости изменения шероховатости катанки R_z от общего количества прокатанных бунтов (n_1), количества прокатанных бунтов после замены шайб на двух последних клетях (n_2).

Параметр шероховатости катанки до замены шайб на двух последних клетях

$$R_{z1} = 16,33 - 2,14n_1^{0,25} + 1,323n_1^{0,5} - 0,094n_1^{0,75}; \quad (21)$$

параметр шероховатости катанки после замены шайб на двух последних клетях

$$R_{z2} = 21,6 - 0,11n_2^{0,25} + 0,379n_2^{0,5} - 0,0001n_2^{0,75}. \quad (22)$$

При этом $n_2 = (n_1 - 320)$.

Выводы

1. Повышение деформируемости из Ст.1сп при волочении обеспечивается при минимальном содержании кремния ($\leq 0,13\%$) и углерода (менее 0,1%).

2. Технология производства катанки из Ст.3сп на БМЗ обеспечивает повышенные прочностные характеристики, что позволяет использовать ее как эффективную арматуру класса Ат 500С, а также обеспечивает в строительстве экономию металла на 16—20%.

3. Катанка диаметром 5,5 мм из стали 70К—80К соответствует уровню мировых стандартов.

4. Технология сталеплавильного производства катанки для металлокорда обеспечивает минимальное количество недеформируемых включений в виде алюминатов, что обеспечивает при волочении деформируемость до 2000 км на обрыв.

Литература

1. Хотиненко Ю. П., Парусов В. В., Панков В. К. и др. Освоение технологии ускоренного охлаждения катанки на Белорусском металлургическом заводе // Сталь. 1988. № 5. С. 62—65.
2. Лучкин В. С., Токмаков В. А., Здоровец С. А. и др. Качество поверхности бунтового проката на стане 320/150 // Металлург. 1989. № 6. С. 31.
3. Коковихин Ю. И. Технология сталепроволочного производства. Киев, 1995.
4. Пичугин В. В. Исследование закономерностей вторичного окисления и азотации стали при выпуске, раскислении и разливке: Дис... канд. техн. наук. М., 1981.
5. Колмогоров В. Л., Богатов А. А. и др. Пластичность и разрушение. М.: Металлургия, 1977.

6. Чернов В. А., Дышлевич В. Ф., Стеблов А. Б. и др. Отделка сортового проката и катанки на стане 320/150 // Бюл. ЦНТИИ ЧМ. 1988. № 5. С. 56—58.

7. Парусов В. В., Хотиненко Ю. П., Воронина Н. Н. и др. Термомеханически обработанная арматурная сталь класса А-1 в мотках // Сталь. 1990. № 6. С. 80—81.

8. Попов А. В., Гавриков Н. В., Стеблов А. Б. и др. Освоение технологии выплавки кордовой стали 70К // Металлург. 1990. № 12. С. 38.

9. Лейнвебер Е. И., Гуляев М. П., Иванов Э. В., Паршиков А. Н. Способ производства чистой высокоуглеродистой стали для металлокорда // Металлургия и литейное производство. Мн., 1997. С. 20—23.

10. Падерин С. Н., Масленников А. В., Стеблов А. Б. и др. Технология производства и качество дегазации кордовой стали в вакууматоре БМЗ // 6th International Conference. RH 91 Vacuum Process. Toronto. Canada. 1991. P. 109—118.

11. Годинский Н. А., Иванов Э. В., Лейнвебер Е. И. и др. Влияние электромагнитного перемешивания и расхода воды в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ на качество внутренней структуры слитка кордовых сталей // Металлургия и литейное производство. Мн., 1997. С. 24—28.

12. Сальников В. Д., Пичугин В. В., Донсков В. Н. и др. Совершенствование защиты при непрерывной разливке кордовой стали // Бюл. ЦНТИИ ЧМ. 1991. № 9. С. 59—60.

13. Чигринов М. Г., Чигринов А. М., Пруцков М. Е. Производство мелких непрерывнолитых заготовок. М., 1998.

14. Тимошпольский В. И., Феоктистов Ю. В., Стеблов А. Б. Теплотехнология металлургических мини-заводов. Мн.: Наука и техника, 1992.

15. Феоктистов Ю. В., Парусов В. В., Стеблов А. Б. и др. Промышленное освоение технологии производства стали для холодной объемной штамповки из непрерывнолитого металла // Бюл. ЦНТИИ ЧМ. 1992. № 3. С. 36—38.

16. Дымова Л. Г., Дьяченко Ю. В., Севастьянов П. В., Стеблов А. Б. Разработка комплекса математических моделей тепловых и энергосиловых процессов при прокатке на мелкосортном стане // Вестн. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1992. № 2. С. 43—47.

17. Яловой Н. Н., Тылкин М. А., Полухин П. И. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением. М., 1973.

18. Парусов В. В., Луценко В. А., Бабич В. К., Фетисов В. П., Сивак А. И., Стеблов А. Б. Влияние режимов двустадийного охлаждения на качественные характеристики углеродистой стали // Сталь. 1992. № 4. С. 66—68.

19. Парусов В. В., Фетисов В. П., Стеблов А. Б. и др. Способ изготовления проката // Пат. ВУ (11)828.1993.

20. Стеблов А. Б., Кармазин Ю. Я., Токмаков В. А. и др. Анализ влияния технологических параметров на стабильность механических свойств катанки для металлокорда // Сталь. 1992. № 1. С. 48—51.

21. Стеблов А. Б. Многокритериальная оптимизация технологических режимов при производстве катанки // Докл. АН БССР. 1991. Т. 35, № 10. С. 915—916.

22. Стеблов А. Б., Дымова Л. Г., Дышлевич В. Ф., Жук О. А. Статистический анализ и оптимизация технологических режимов термической обработки катанки // Вестн. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1990. № 2. С. 53—57.

23. Фетисов В. П., Феоктистов Ю. В., Бирюков Б. А., Филиппов В. В., Исаков С. А. Формирование шероховатости поверхности катанки для металлокорда в процессе прокатки на стане 320/150 БМЗ // Металлургия и литейное производство. Мн., 1997. С. 6—7.