

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.771.252.01

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-2-83-94

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ КАТАНКИ ПОД МЕТАЛЛОКОРД*

Кижнер М.¹, Сычков А.Б.², Шекшеев М.А.², Малашкин С.О.², Камалова Г.Я.²¹ HOD-ASSAF Metals Ltd. – Kiriyaat Gat Rolling Mill, Ashkelon, Israel² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Микроструктура металла в основном определяет комплекс механических и эксплуатационных свойств металлопродукции, способность металлических изделий к последующей переработке. В технической литературе рассмотрено влияние металлургического качества исходной непрерывно-литой заготовки, а также параметров технологии производства и термической обработки на структуру и свойства высокоуглеродистой катанки. Однако в ряде случаев имеются противоречия в выборе эффективных технологических режимов по формированию, в частности, тонкодисперсной перлитной структуры, уровню обезуглероживания и других качественных параметров стали и проката для переработки в металлокорд.

Целью работы является анализ влияния металлургических факторов и термической обработки на структуру катанки под металлокорд и разработка эффективной сквозной технологии производства стали, ее внепечной обработки, непрерывной разливки, прокатки катанки и ее поточной термической обработки на линии двустадийного охлаждения Stelmor, обеспечивающей получение требуемого комплекса эксплуатационных свойств металлокорда и высокую технологичность процесса волочения тонкой проволоки и ее свивки.

Химический состав стали определялся на типовых спектрометрах. Металлографические исследования проводились методами оптической и электронной растровой микроскопии. Микроликвация химических элементов, а также химический состав неметаллических включений определялись на энергодисперсионном и волновом рентгеновских спектрометрах в составе растрового (сканирующего) электронного микроскопа методом микро-рентгеноспектрального анализа (МРСА). Измерение микротвёрдости структурных составляющих производили на микротвердомерах при различных нагрузках. Катанка испытывалась на разрывных машинах на растяжение. Термокинетическая диаграмма была построена dilatометрическим методом.

Новизна заключается в разработке научно обоснованных решений по температуре аустенитизации высокоуглеродистой катанки для обеспечения на воздушной стадии эффективной скорости охлаждения, значения которой были получены при анализе построенной нами термокинетической диаграммы распада аустенита при непрерывном охлаждении.

Установлены следующие научно обоснованные закономерности: сталь микролегируют бором в отношении бора к азоту не более 0,4 для исключения вредного действия свободных бора и азота, заключающегося в том, что бор повышает закаливаемость стали, а азот упрочняет феррит и остаривает металл. Исследованы закономерности загрязнения стали неметаллическими включениями (НВ), предложены эффективные решения по их модифицированию. Термическая обработка (ТО) стали типа 70–85 заключается в аустенитизации при 950–980°C и охлаждении металла со скоростью 25–30°C/c с формированием структуры сорбитообразного перлита в количестве не менее 70% сечения катанки.

В итоге обеспечивается требуемый нормативной документацией (НД) и потребителями комплекс наилучших структуры и свойств катанки с высокой технологичностью ее переработки в проволоку и металлокорд.

Ключевые слова: металлургические факторы, неметаллические включения, микролегирование, бор, катанка, линия Stelmor, термическая обработка, скорость охлаждения, структура, свойства.

* В работе принимали участие: **Жигарев М.А.** – канд. техн. наук, нач. технического отдела ООО «Тулачермет-сталь», г. Тула; **Столяров А.Ю.** канд. техн. наук, гл. технолог ООО «Специальные технологии», г. Магнитогорск.

© Кижнер М., Сычков А.Б., Шекшеев М.А., Малашкин С.О., Камалова Г.Я., 2016

Введение

Свойства металлопродукции определяющим образом зависят от структурного состояния сплава [1–5]. В настоящее время актуален вопрос обеспечения качественной катанкой метизных предприятий по производству металлокорда высокой, супервысокой и ультравысокой прочности [6–12]. При этом первостепенным является комплекс качественных показателей катанки, наследственно формируемый уровнем качества непрерывно-литой заготовки (НЛЗ), а также технологией прокатного производства и термической обработки. В связи с вышеуказанным, исследование степени влияния параметров сквозной технологии на конечные свойства катанки определяет эффективность ее переработки в тонкую проволоку диаметром 0,40–0,15 мм и кордовые конструкции.

Ниже приводятся особенности структурообразования и формирования механических свойств в зависимости от металлургического качества стали и режимов термической обработки катанки на мини-заводе [13] в составе дуговой сталеплавильной печи (ДСП), установки печь-ковш (УКП), вакууматора типа VD/VOD или RH, машины непрерывной разливки заготовок (МНЛЗ), мелкосортно-проволочного или проволочного стана, линии двустадийного охлаждения Stelmor.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является катанка диаметром 5,5 мм для изготовления металлокорда из высокоуглеродистой стали марок 70–85. Требования к химическому составу стали и механическим свойствам катанки приведены в табл. 1.

Катанку прокатывали на проволочном блоке из НЛЗ сечением 125×125 мм с последующей ТО на линии Stelmor стана 320/150.

Поточную термообработку катанки проводили сначала на проектной проволочной линии стана с «короткой» линией Stelmor, а затем на реконструированной линии с «длинным» Stelmor [13. С. 87, 4]. На проектной линии скорость воздушного охлаждения катанки была 1,7–10°С/с, на модернизированной линии – 25–30°С/с.

Химический состав стали определялся на типовых спектрометрах.

Металлографические исследования проводились методами оптической и электронной растровой микроскопии. Микроликвация химических элементов, а также химический состав неметаллических включений определялись на энергодисперсионном и волновом рентгеновских спектрометрах в составе растрового (сканирующего) электронного микроскопа методом микро-рентгеноспектрального анализа (МРСА). Измерение микротвёрдости структурных составляющих производили на микротвердомерах при различных нагрузках.

Катанка испытывалась на разрывных машинах на растяжение.

Дилатометрические образцы диаметром 3,0 и 4,0 мм изготавливали из катанки диаметром 5,5 мм. Температуру при нагреве и охлаждении образцов контролировали хромель-алюмелевыми термопарами, приваренными к поверхности образцов, с диаметром электродов 0,3 мм. Аустенизацию проводили при 950°С в течение 2–3 мин с последующей выдержкой 5 мин. Последующее охлаждение дилатометрических образцов осуществляли по программе в печах с различной тепловой инерцией, на спокойном воздухе, под вентилятором, в масле и воде. Температуры начала и конца фазовых превращений определяли по регистрируемым дилатограммам, среднюю скорость охлаждения образцов – по термограммам.

Таблица 1

Химический состав и механические свойства высокоуглеродистой катанки

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %										Механические свойства		
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	N	Al	σ_b , МПа	Ψ , %	δ_{10} , %
			не более							не более			
70	0,71–0,74	0,40–0,60	0,15	0,010	0,005	0,08	0,10	0,13	0,007	0,004	1160	33	10
75	0,75–0,80	0,40–0,60	0,15	0,010	0,005	0,08	0,10	0,13	0,007	0,004	1210	30	10
80	0,81–0,85	0,40–0,60	0,15	0,010	0,005	0,08	0,10	0,13	0,007	0,004	1260	28	9
85	0,86–0,90	0,40–0,60	0,15	0,010	0,005	0,08	0,10	0,13	0,007	0,004	1310	27	9

Примечания: 1. Нормируется содержание свободного азота.

2. Массовая доля бора – не более 0,0025%, отношение бора к азоту – не более 0,40.

Теория, технико-технологические разработки, результаты и их обсуждение

Основные требования к качественным показателям стали, НЛЗ и катанки для изготовления металлокорда следующие: обеспечение заданного уровня и однородности основных химических элементов (С, Мп, Si) и металлических примесей (Cr, Ni и Cu); минимального содержания вредных примесей P, S, As, Zn, Pb, Sn и т.п.; высокой чистоты стали по НВ, особенно недеформируемым алюминатам; высокого качества поверхности, минимальной ликвации, пористости; однородности структуры и механических свойств катанки по длине бунта, максимального количества сорбитообразного перлита с низким количеством или исключением структурно-свободного феррита (ССФ) или цементита (ССЦ), отсутствие закалочных структур.

Ниже рассмотрено обеспечение этих требований в условиях мини-завода.

Химический состав стали

Внепечная обработка стали, проводимая на УКП и VD/VOD и/или RH, гарантирует точное попадание в заданный химический состав сталей 70–85 с низким внутривлажочным разбегом массовых долей элементов на уровне $\Delta C = 0-0,01\%$; $\Delta Mn = 0-0,03\%$; $\Delta Si = 0-0,03\%$, межплажочный разброс соответственно составляет $\Delta C = 0-0,04\%$; $\Delta Mn = 0-0,05\%$; $\Delta Si = 0-0,05\%$. Содержание фосфора, серы, азота и водорода обеспечивается на уровне соответственно не более 0,010, 0,005, 0,007% (в свободном состоянии) и 2,0 ppm. При производстве стали на базе селективно отобранного металлолома с добавлением до 30% от массы металлошихты передельного чугуна или другого сырья в твердом состоянии (Синтикома, Суперкома, горячебрикетированного железа – ГБЖ) остаточное содержание металлических примесей достигает достаточно высоких значений. Применение чистого сырья (металлизированных окатышей) для производства катанки под металлокорд дорого. Доказано [14–17], что содержание $Cr \leq 0,15\%$; $Ni \leq 0,15\%$; $Cu \leq 0,25\%$ не оказывает негативного воздействия на свойства катанки, технологичность ее волочения и свивки кордовых конструкций. В настоящее время можно обеспечить в стали массовые доли хрома, никеля и меди на уровне $\leq 0,05\%$; $\leq 0,10\%$ и $\leq 0,13\%$ соответственно.

Введение в решетку α -Fe больших по размеру, чем атомы железа, атомов Си вызывает увеличение ее периода и уровня микронапряжений, которые компенсируются за счет меньших по размеру атомов бора, занимающих в решетке α -Fe позиции замещения. Это объясняет высокую растворимость Си в α -Fe борсодержащих сталей, их пониженную прочность и высокую пластичность.

Известно, что действие азота, особенно несвязанного, ухудшает пластические и эксплуатационные свойства металла вследствие развития процессов деформационного старения и твердо-растворного упрочнения кристаллической решетки феррита. В то же время микродобавки бора, связывая азот в нитриды – BN, уменьшают вероятность развития процессов старения, а также снижают возможность закалки металла. Кроме того, нитрид бора, выводя азот из позиций внедрения, снижает степень упрочнения металла. Бор также измельчает столбчатые кристаллы при кристаллизации, обуславливая этим меньшую осевую ликвацию и повышая технологическую пластичность и деформируемость катанки и проволоки без термической обработки (патентирования) до суммарной деформации 95–97% (катанка диаметром 5,5 мм – волочение в проволоку диаметром 1,2–1,0 мм без промежуточной термической обработки). Бор, увеличивая время инкубационного периода образования феррита и уменьшая скорость формирования центров его зарождения, снижает в стали количество ССФ. По результатам исследований обоснованно принято количество свободного азота в кордовой стали не более 0,007%, бора не более 0,0025% и отношение $B/N \leq 0,4$ [9, 17–24].

Вакуумирование стали, обеспечивая ее глубокую дегазацию (до вакуумирования содержание в стали водорода 2–6, после – 0,3–1,5 ppm, а азота соответственно 0,010–0,012 и 0,005–0,007%), обуславливает дополнительное увеличение пластичности катанки. Так, при первичных испытаниях катанка из невакуумированной стали марки 70 имеет относительное сужение $\Psi = 30-35\%$, а из вакуумированной стали – 38–45%.

Количество вредных примесей в стали обеспечивается на уровне следов. Это исключает явления красно- и хладоломкости, повышает пластические характеристики катанки и ее способность к интенсивной деформации в холодном состоянии.

Неметаллические включения

Эндогенные и экзогенные НВ образуются в результате реакций, связанных с легированием, десульфурацией, дефосфорацией, раскислением стали или также являются продуктами износа футеровочных огнеупоров.

НВ взаимодействуют с металлической матрицей и имеют различные деформационные свойства. Вследствие этого на границе недеформирующихся НВ формируются микрополости, по которым в дальнейшем может происходить разрушение катанки и проволоки. Оценить деформируемость НВ можно индексом деформируемости v , который определяется отношением степеней деформации НВ и металлической матрицы. Чем ниже значения этого индекса, тем менее пластичны НВ и тем вероятнее разрушение металла в процессе деформации. Наоборот, чем выше уровень этого индекса, тем пластичнее НВ, и при значении, равном 1, деформируемость НВ и металла одинаковая. Опасные НВ в этом смысле ($v = 0$) – алюминаты и алюмокальциниты, наиболее пластичны сульфиды марганца ($v = 1$). Сульфиды марганца удовлетворительно деформируются и дробятся в процессе горячей прокатки катанки, образуя мелкие строчки пластичных НВ, хорошо деформируемых в дальнейшем при холодном волочении [25]. Особенно вредное влияние оказывают алюминаты [26–28].

Эффективно использование модифицирования стали кальцием при помощи ввода на УКП в несколько приемов кальцийсодержащей порошковой проволоки (SiCa, FeCa). При этом возможен перевод недеформируемых алюминатов состава $MgO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot Al_2O_3$ при отношении $Ca/a_0 = 0,60-1,20$ (a_0 – активный кислород) в пластичное соединение $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ с пониженной температурой плавления, которое легко переводится в шлак. При другом отношении Ca/a_0 образуются твердые тугоплавкие алюминаты, которые формируют настывы в стаканах-дозаторах и недеформируемые НВ в стали. Использование полностью магнезиальных сталеразливочных ковшей (СК), обработка стали белыми шлаками, редкоземельными металлами (РЗМ) также способствует снижению загрязненности стали НВ.

Применение полностью магнезиального СК

НВ в НЛЗ количественно оценивались на кованных пробах от 6-ти темплетов, отобранных от каждого ручья МНЛЗ, по методике ГОСТ 1778 (метод Л1). Следует отметить, что во всех образцах подавляющее большинство НВ (97–98,7% оксидов и 91,5–99,2% сульфидов) имеет размеры 0–5,6 мкм (1-я группа НВ по методу Л1, ГОСТ 1778). Наблюдаются следующие максимальные размеры НВ – оксиды протяженностью до 11,5 мкм; сульфиды до 16,8 мкм. Расчетные индексы (оксиды до $6,5 \cdot 10^{-3}$, сульфиды до $4,2 \cdot 10^{-3}$, общий $8,6 \cdot 10^{-3}$) загрязненности литой стали НВ также доказывают незначительность пораженности металла опытной плавки НВ оксидного и сульфидного типов.

Диаграмма Pirelli (рис. 1) показывает удовлетворительное распределение НВ, которое может обеспечить высокую деформационную пластичность при волочении высокоуглеродистой катанки в проволоку диаметром до 0,15 мм без существенной обрывности. Так, запретная зона С ($h_{НВ} \leq 10$ мкм; плотность НВ $\leq 20-40$ см⁻²) в опытной плавке включает всего 1 НВ протяженностью 1 мкм – 1% с плотностью ~ 18 см⁻². Остальные НВ находятся в оптимальной зоне В и имеют плотность 1395–2441/1808 см⁻², но весьма малых размеров – не более 6 мкм. Фирма Pirelli признала, что плотность НВ не является представительной характеристикой и заменила этот показатель на простое процентное соотношение. Так, для металлокорда допускается в зоне С ($Al_2O_3 \geq 50\%$) не более 4% НВ максимальным размером 10 мкм, в зоне В ($Al_2O_3 = 25-50\%$) – не более 20% и в зоне А ($Al_2O_3 = 0-25\%$) – остальные НВ; в зоне А и В протяженность НВ допускается до 30 мкм. На рис. 1 количество НВ по новой методике составляет в зоне С – 1%, в зоне В $\sim 5\%$ и в зоне А – 94%. Это подтверждает высокую чистоту по НВ катанки из стали, обрабатываемой в сталеразливочном ковше (СК) на УКП, полностью зафутерованного основной магнезиальной массой, обеспечившей наличие в металле мелких и пластичных НВ. Такой металл имеет высокую технологичность при переработке в тонкую проволоку и металлокорд.

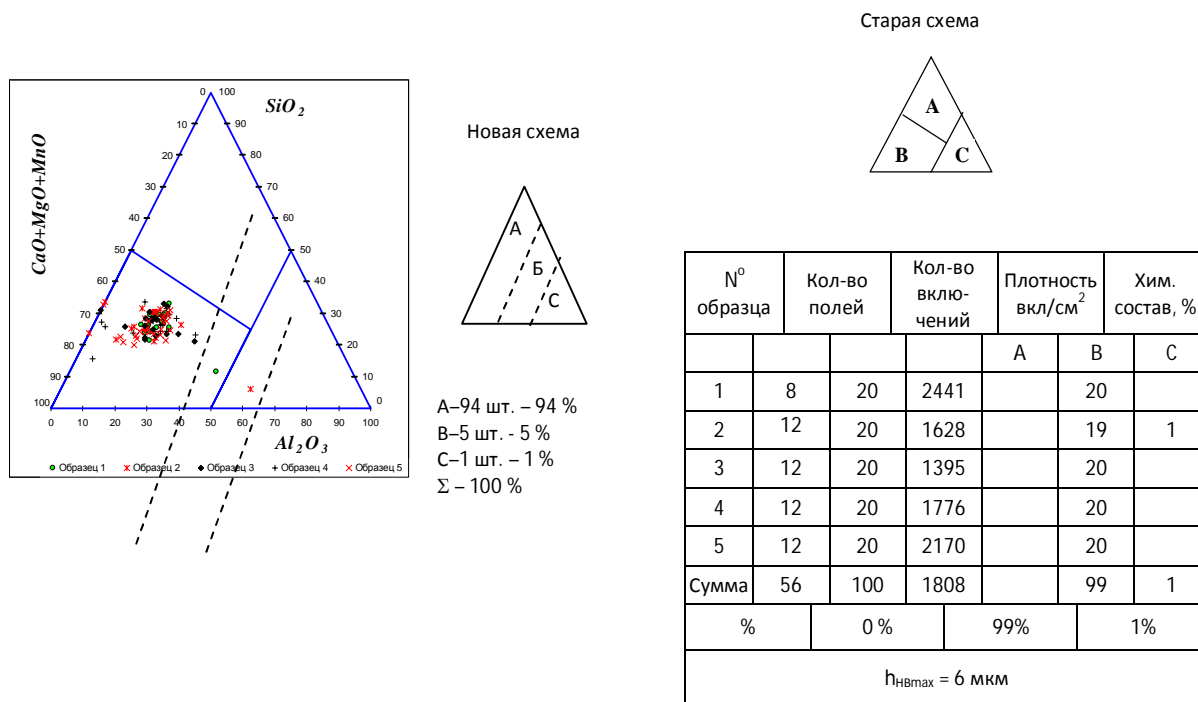


Рис. 1. Диаграмма ф. Pirrelli для катанки из стали марки 80

Обработка стали белыми шлаками при сливе металла из ДСП в СК

С целью снижения загрязненности стали НВ, ускорения процессов их модифицирования была опробована более ранняя обработка стали основными шлаками – на этапе слива металла из ДСП в СК. Причем обработка осуществлялась белыми шлаками с УКП, полученными при производстве низкоуглеродистой стали с повышенным содержанием алюминия.

Металлографическое исследование показывает следующее. Загрязненность стали НВ в НЛЗ оценивали исследованием кованных темплетов по ГОСТ 1778 (метод Л1). По индексам НВ: оксиды – до $9,9 \cdot 10^{-3}$, сульфиды – до $8,0 \cdot 10^{-3}$ и суммарный – до $12,5 \cdot 10^{-3}$, опытная плавка имеет низкую загрязненность НВ.

Диаграммы Pirrelli катанки характеризуются тем, что наблюдается очень много НВ в запретной зоне С – до 31%. При этом размеры НВ небольшие: не более 7 мкм. Максимальное содержание Al_2O_3 (до ~68%) в НВ – это негативный результат, который обусловлен наличием в белых шлаках алюминия. Переход на белые шлаки,

полученные в процессе внепечной обработки высокоуглеродистой стали, обеспечат положительный эффект – освобождение от НВ зоны с диаграммы Pirrelli.

Обработка стали Ca + РЗМ лигатурой

В технической литературе [29, 30] приводятся данные о положительном воздействии редкоземельных элементов (РЗМ) как модификаторов жидкой стали, благотворно влияющих на кристаллическую структуру непрерывного слитка и загрязненность стали НВ. В ряде случаев действие РЗМ признается более эффективным, чем таких элементов, как кальций и бор. Так, например, РЗМ сильнее бора влияют на снижение длины зоны столбчатых кристаллов (ЗСК), но бор [6] больше РЗМ влияет на внутреннее строение дендритов. Утверждается также, что РЗМ является более сильным модификатором НВ, чем кальций. Были опробованы в опытном порядке лигатура Ca + РЗМ (примерный состав: 10–12% Ca; 15% Mg; 40–45% Si; 10–12% РЗМ, из них до 50% – Ce, 25% – La и 25% Nd или Pr).

Опыты проводились на стали марки 85 (рис. 2).

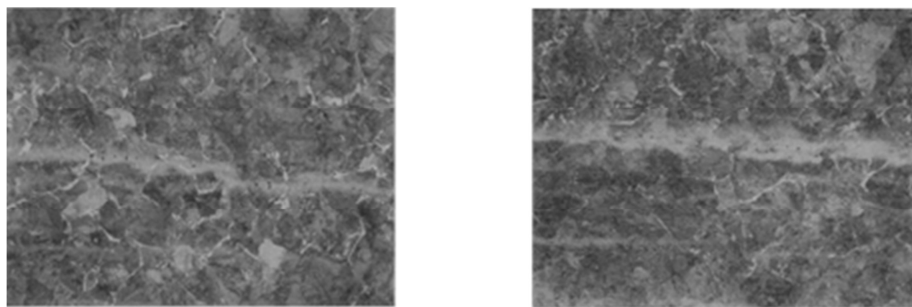


Рис. 2. Структурная полосчатость на продольных образцах катанки из стали 85, $\times 500$

Лучшие результаты по чистоте катанки от НВ наблюдаются в металле нескольких плавок, в которых по диаграммам Pirelli отмечается следующее:

- по толщине НВ: ≤ 9 мкм;
- по плотности НВ: $622 - 1684 \text{ см}^{-2}$;
- по загрязненности НВ в зоне С: 3 – 53% толщиной 4 – 11 мкм.

Модифицирование стали лигатурой, содержащей Са и РЗМ, при первичном опробовании не дало положительного эффекта. В целом, металл без лигатуры значительно чище по НВ, но необходимо повторить опыты по модифицированию стали Са + РЗМ лигатурой с целью поиска наилучшего результата.

Оценка предельно допустимой загрязненности стали НВ с применением коэффициента физической неоднородности

В работе [25] доказывается, что применение для оценки НВ в стали коэффициента физической неоднородности $k_{\text{фн}}$ ($k_{\text{фн}} = S_{\text{нв}}/S$, где $S_{\text{нв}}$ – суммарная площадь, занимаемая недеформируемыми НВ, S – площадь поперечного сечения готовой проволоки) и эффективно, и универсально. Поэтому представляется целесообразным представить зависимость $k_{\text{фн}}$ от предельных размеров единичных НВ и решить обратную задачу, а именно определить количество предельно допустимых НВ в функции от размера НВ и $k_{\text{фн}}$. Эти зависимости представлены в табл. 2, 3. Используя эти данные, можно установить приемлемость катанки для конкретного назначения по уровню загрязненности стали НВ.

Расчетным способом установлены значения $k_{\text{фн}}$ в зависимости от размера единичного недеформируемого НВ ($h_{\text{нв/нд}}$), диаметра (0,40–0,15 мм) готовой проволоки кордового назначения. В работе [31] регламентировано допустимое значение $k_{\text{фн}}$ в катанке, например, для металлокорда, равное не более 5%. С учетом этого критерия (см. табл. 2) можно установить, что 5% барьер проходят единичные НВ толщиной не более 35 мкм для диаметра проволоки 0,15 мм, 45 мкм – 0,20 мм и т.п. Однако, как правило, в реальном металле имеется

множество мелких и более крупных НВ. В табл. 3 представлено допустимое количество НВ в катанке определенного диаметра в зависимости от $k_{\text{фн}}$ и диаметра готовой проволоки. Так, для диаметра готовой проволоки 0,15 мм для обеспечения $k_{\text{фн}}$ не более 5% допустимо наличие до 50 НВ протяженностью (условного максимального размера НВ) 5 мкм, примерно 13 НВ диаметром 10 мкм, 5 НВ диаметром 15 мкм, 1 НВ протяженностью 30 мкм. НВ размером более 35 мкм недопустимы. Для точного расчета предельных критериальных значений необходимо определить площадь всех недеформируемых НВ в поперечном сечении катанки и рассчитать реальное значение $k_{\text{фн}}$. Идеальная оценка загрязненности стали НВ, по-видимому, состоит в сочетании вышеописанного метода с использованием $k_{\text{фн}}$ и новой методики фирмы Pirelli, ограничивающей НВ по содержанию Al_2O_3 .

Таблица 2
Значения $k_{\text{фн}}$ (%) от толщины НВ – $h_{\text{нв}}$ и диаметра готовой проволоки (d)

Диаметр проволоки, мм	$h_{\text{нв}}$, мкм									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,15	0,1	0,40	1,00	1,80	2,80	4,00	5,40	7,10	9,00	11,10
0,20	0,06	0,22	0,56	1,01	1,57	2,25	3,03	3,99	5,06	6,24
0,25	0,04	0,14	0,35	0,64	0,99	1,42	1,92	2,53	3,20	3,95
0,30	0,03	0,10	0,25	0,45	0,70	1,00	1,35	1,78	2,25	2,78
0,35	0,02	0,07	0,18	0,33	0,51	0,73	0,99	1,31	1,65	2,04

Определен комплекс технологических мероприятий для снижения загрязненности металла НВ, которые следует применять в совокупности: применение эффективного количества кальцийсодержащей порошковой проволоки для модифицирования НВ, отдаваемой на УКП в несколько приемов дифференцированными порциями; вакуумирование стали, использование основных футеровок СК и промежуточных ковшей (ПК); выбор рационального состава теплоизолирующих и рафинирующих засыпок в ПК, не содержащих оксидов железа и марганца; продувка стали в ПК аргоном через специальные про-

дувочные блоки; защита от вторичного окисления струи стали, истекающей из СК в ПК и из ПК в кристаллизатор (К).

Таблица 3
Зависимость допускаемого количества [НВ] от толщины НВ и диаметра готовой проволоки при $K_{Фн} \leq 5\%$

Диаметр проволоки, мм	$h_{НВ}$, мкм										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
1,00	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0,15	50	13	5	3	2	1	-	-	-	-	
0,20	83	23	9	5	3	2	2	1	1	-	
0,25	125	36	14	8	5	4	3	2	2	1	
0,30	167	50	20	11	7	5	4	3	2	2	
0,35	250	71	28	15	10	7	5	4	3	3	

Уменьшение загрязненности НВ катанки из высокоуглеродистой стали марок 70–85 для металлоруда обычной, высокой, супервысокой и ультравысокой прочности совместно с другими показателями качества обеспечило высокую технологичность на метизном переделе (обрывность при микроволочении – не более $1,5-2,0 \tau^{-1}$, при свивке прядей и кордовых конструкций – не более $2,0-2,5 \tau^{-1}$).

Макро- и микроструктура катанки

Для формирования качественной макроструктуры, минимизации ликвационных явлений в НЛЗ и катанке наиболее эффективны методы разлива стали с обеспечением максимального развития зоны равноосных кристаллов (ЗРК) при сокращении зоны столбчатых кристаллов (ЗСК).

Результаты исследований показывают следующее:

1. Из-за дендритной ликвации образуются

ликвационные полосы, структурная полосчатость, остатки которых выявляются в катанке и проволоке. Основными ликвирующими элементами являются С, Р, Мн, Сг, Si. Электромагнитное перемешивание (ЭМП) способствует реализации затравочно-инокулирующего эффекта при кристаллизации стали, который заключается в отрыве частиц от дендритов и перемещении их в сердцевину НЛЗ, что увеличивает количество центров и способствует увеличению скорости кристаллизации. ЗРК в результате действия ЭМП заметно увеличена – в среднем в 1,7 раза, при этом центральная ликвация и пористость рассредотачиваются.

2. Ликвация на микроуровне обуславливает формирование в центральных частях высокоуглеродистой катанки мартенситных участков, протяженность которых составляет от 5 до 200 мкм. Выбор наилучших режимов кристаллизации слитка, применение ЭМП, обеспечение степени перегрева над температурой ликвидус на минимально-возможном уровне (не более $20-30^\circ\text{C}$) позволяет исключить появление закалочных структур. Этому может способствовать замедленное охлаждение разлитого слитка под колпаками, в обогреваемых или необогреваемых колодцах, высокотемпературный ($\sim 1200^\circ\text{C}$) длительный (не менее 6 ч) гомогенизирующий отжиг. Наиболее эффективные режимы кристаллизации НЛЗ сечением 125×125 мм: скорость разлива $2,5-3$ м/мин; перегрев над температурой ликвидус $\sim 20-30^\circ\text{C}$.

Закономерности микроструктурообразования определяются термокинетической диаграммой (ТКД), представленной на рис. 3 [13].

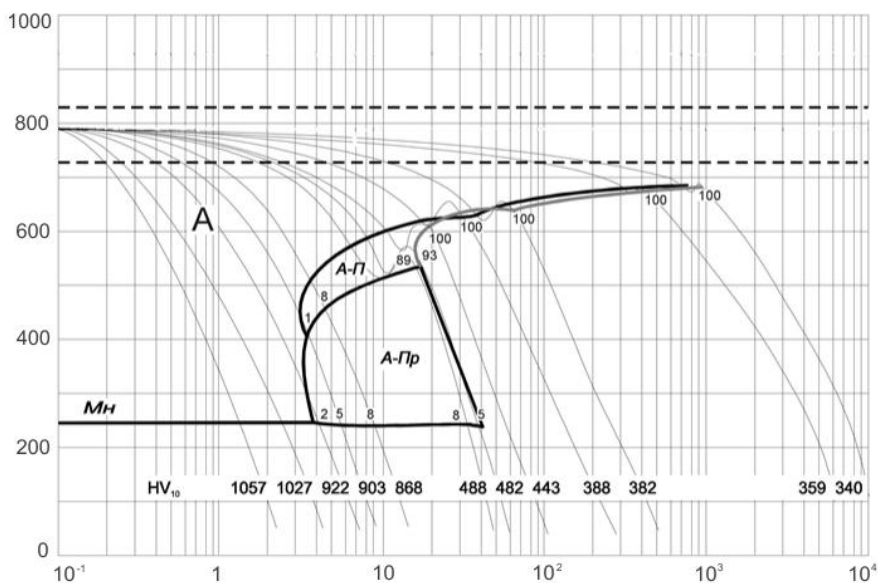


Рис. 3. ТКД высокоуглеродистой стали 80

Несмотря на вредность закалочных структур, многие производители металлокорда допускают их наличие. Например, фирма Beakaert разрешает в центральных участках сечения катанки наличие участков мартенсита протяженностью до 20 мкм [32].

При производстве катанки необходимо одновременное обеспечение нескольких показателей качества. Зачастую улучшение одних из них может привести к ухудшению других. Здесь необходим поиск определения приоритета, значимости какого-либо показателя по отношению к другим. Поэтому в настоящей работе исследованы показатели качества катанки (микроструктура, степень обезуглероживания, окалинообразование, дефектность поверхности) и их комплексное влияние на свойства катанки и проволоки [13, 26, 31–37].

В процессе исследований (рис. 4) определена зависимость количества перлита первого балла от температуры виткообразования. Эта зависимость показывает, что есть две области, в которых межпластинчатое расстояние Δ в перлите уменьшается: первая – это область 950–1000°C, вторая – менее 700°C. В этих случаях образуется практически 100% мелкодисперсного перлита 1 балла ($\Delta < 0,2$ мкм). Однако при температурах металла ниже 700°C в поверхностных слоях катанки формируется недопустимая постзакалочная структура – сорбит отпуска, ухудшающая технологичность переработки такой катанки в проволоку. При высоких температурах (950–1000°C) имеется уже другой недостаток – увеличивается среднее количество вторичной окалины до 6–8 против 2–4 кг/т при температуре виткообразования 800–850°C, при которой количество мелкодисперсного перлита уменьшается на 20–30%. В связи с тем, что формируемая при температурах 950–1000°C окалина состоит, в основном, из вюстита и затем происходит быстрое охлаждение витков катанки вентиляторным воздухом, в том числе в температурном диапазоне 570–400°C, не происходит превращения вюстита в магнетит, благодаря чему обеспечивается легкое удаление такой окалины перед волочением как химическим, так и механическим способами. Увеличением же расхода металла в окалину при этом можно пренебречь, так как увеличение дисперсности перлита при одновременном снижении глубины обезуглероживания обуславливают улучшение переработки катанки и проволоки при волочении и свивке пряжей и металлокорда.

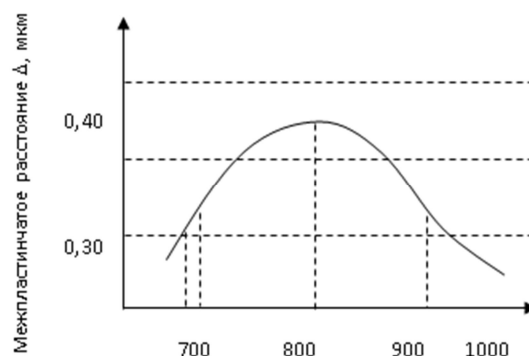


Рис. 4. Зависимость межпластинчатого расстояния Δ от температуры виткообразования $t_{вп}$

Одновременно с дисперсностью перлита на деформируемость катанки и проволоки оказывает влияние и размер действительного зерна. Для высокоуглеродистой катанки этот размер оптимален в диапазоне № 7–11.

Обезуглероживание и качество поверхности катанки

В большинстве практических случаев обезуглероженный слой (ОБС) считается неудовлетворительным фактором. Однако в литературе [31] отмечается и положительное влияние обезуглероживания поверхности катанки на ее потребительские свойства. Мягкая обезуглероженная поверхность обеспечивает повышенную пластичность металла при перегибах и скручиваниях из-за малой чувствительности к концентраторам напряжений и высокой сопротивляемости распространению трещин. Формирование в поверхностном обезуглероженном слое остаточных сжимающих напряжений приводит к повышению усталостной прочности и долговечности при работе в канатах, а также повышению коррозионной стойкости и улучшению оцинкования проволоки за счет предотвращения проявления эффекта Ребиндера (процесс горячего цинкования из расплава). В ОБС меньше вероятность образования мартенсита истирания и вызываемых им поверхностных трещин и надрывов. С учетом изложенного, необходимо обеспечить равномерную глубину обезуглероживания катанки по ее периметру. Сравнительное исследование [13, 22, 23, 37] распределения обезуглероженного слоя в углеродистой катанке разных заводов-изготовителей показало, что в условиях мини-завода обеспечивается формирование равномерного обезуглероженного слоя по периметру катанки, что является одним из достоинств.

Сквозной технологией производства углеро-

дистой катанки обеспечивается низкая дефектность поверхности катанки: глубина дефектов не превышает 0,15 мм, а в 95% случаев она не более 0,10 мм.

Таким образом, разработана технология производства стали, НЛЗ и катанки для металлокорда обычной, высокой и сверхвысокой прочности. Катанка имеет хорошую деформируемость, технологична при переработке в проволоку, пряжи и кордовые конструкции.

Заключение

В статье рассмотрено влияние металлургических факторов (химический состав стали, макростроение НЛЗ, ликвация химического состава в макро- и микрообъемах литого металла и т.п.) и режимов термической обработки проката в бунтах на линии двустадийного охлаждения типа Stelmog (температуры аустенитизации металла, скорости охлаждения проката на обеих стадиях) на формирование микроструктуры и свойств металлоизделий.

Установлены следующие научно обоснованные закономерности по улучшению качественных параметров катанки под металлокорд. Сталь микролегирована бором в зависимости от соотношения в стали бора и азота (B/N) на уровне не более 0,4. Определено, что взаимное связывание бора и азота в нитрид позволяет взаимно нейтрализовать вредное действие и бора, и азота, заключающееся в том, что бор в свободном состоянии повышает закаляемость стали и упрочняет ее, а несвязанный азот обуславливает упрочнение твердого раствора кристаллической решетки феррита и способствует остариванию стали. При этом также формируется и минимальное межпластинчатое расстояние в перлите (не более 0,2 мкм) с благоприятной ориентацией перлитных колоний в металле для волочения (вдоль направления деформирования).

Термическая обработка высокоуглеродистой стали типа 70–85: температура аустенитизации 950–980°C, скорость охлаждения 25–30°C/с в потоке линии двустадийного охлаждения с формированием структуры тонкодисперсного сорбитообразного перлита в количестве не менее 70% по сечению бунтового проката.

В итоге обеспечивается требуемый НД и потребителями комплекс наилучших структуры и свойств высокоуглеродистой катанке, что обуславливает высокую техно-логичность при ее переработке в металлокорд.

Список литературы

1. Колокольцев В.М., Петrochenko E.B., Миронов О.А. Влияние химического состава на формирование структуры и свойств жароизносостойких чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 3. С. 44–47.
2. Комплексно-легированные белые чугуны функционального назначения в литом и термообработанном состояниях / Ри Э.Х, Ри Хосен, Колокольцев В.М., Петrochenko E.B. и др. Владивосток: Дальнаука, 2006. 275 с.
3. Колокольцев В.М., Петrochenko E.B., Молочков П.А. Структура и износостойкость хромованадиевых чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2004. №7. С. 25–28.
4. Колокольцев В.М., Петrochenko E.B., Воронков Б.Н. Комплексно-легированные белые износостойкие чугуны. Челябинск: Печатный салон «Издательство РЕКПОЛ», 2005. 178 с.
5. Специальные чугуны. Литье, термическая обработка, механические свойства: учеб. пособие / Колокольцев В.М., Петrochenko E.B., Соловьев В.П., Цыбров С.В.; под ред. Колокольцева В.М. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 187 с.
6. Савенок А.Н., Веденеев А.В. Новые направления развития производства металлокорда // Сталь. 2004. № 10. С. 60–61.
7. Столяров А.Ю. Современное оборудование для производства металлокорда // Механическое оборудование металлургических заводов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Вып. 2. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2013. С. 146–152.
8. Веденеев А.В., Панизович В.С. Современные тенденции развития оборудования для металлокорда // Литье и металлургия. 2005. № 4 (36). С. 81–85.
9. Гордиенко А.И., Крылов-Олеференко В.В. Перспективы применения технологических процессов в производстве металлокорда // Литье и металлургия. 2009. № 2 (51). С. 138–143.
10. Алексеев Ю.Г., Кувалдин Н.А. Металлокорд для автомобильных шин. М.: Металлургия, 1992. 192 с.
11. Столяров А.Ю., Токарева Н.В. Формирование однородной перлитной структуры патентованной заготовки при производстве высокопрочного шинного корда // Метиз. 2011. № 1. С. 18–24.
12. Абраменко О.В., Зайцева Т.Л. Белорусскому металлокорду 25 лет // Черные металлы. 2012. № 10. С. 10–20.
13. Металлургические и металловедческие аспекты производства высокоуглеродистой катанки / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.Ю. Столяров, М.А. Шекшеев, С.Ю. Жукова, С.О. Малашкин. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Магн. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 257 с.
14. О целесообразности ограничения содержания примесей цветных металлов в углеродистой катанке / Н.А. Богданов, А.В. Кутаков, А. Б. Сычков и др // Сталь. 2000. № 1. С. 67–69.
15. Анализ реальности технологии удаления меди из жидкого железа, построенной на испарении / А.И. Зайцев, И.Е. Зайцева, Е.Х. Шахпазов и др. // Электрометаллургия. 2003. № 10. С. 31–37.
16. Pivovarci M., Kijak J. Nondesirable additives contents reduction in continuously cast steel // Metallurgij. 2002. 41. № 1. P. 57–60.
17. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. Борсодержащие стали и сплавы. М.: Металлургия, 1986. 192 с.
18. Новое применение бора в металлургии / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, И.В. Деревянченко, М.А. Жигарев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. № 1(9). С. 15–17.
19. Development and introduction of a technology for making bor-bearing steel/NA Bogdanov, AB Sychkov, IV Derevyanchenko, VV Parusov, AM Nesterenko, RV Starov a etc. // Metallurgist. February 1999. Vol. 43. Issue 2. P. 71–75.

20. Нестеренко А.М., Сычков А.Б. Размерно-геометрические аспекты легирования стали бором и медью. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Днепропетровск: Визион, 2004. Вып. 7. С. 181–183.
21. Медь в черных металлах: пер. с англ. / под ред. И.Л. Мея и М.М. Шетки. М.: Металлургия, 1988. 312 с.
22. Anil Kumar, Satish C. Koria, Dipak Mazumdar. An Assessment of Fluid Flow Modelling and Residence Time Distribution Phenomena in Steelmaking Tundish System // ISIJ International. 2004. Vol. 44. № 8. P. 1334–1342.
23. Design Optimisation of a Single-strand Continuous Caster Tundish Using Residence Time Distribution Data / I.G. Craig, D.J. de Kock, K.W. Makgata e.a. // ISIJ International. 2001. Vol. 41. № 10. P. 1194–1200.
24. Scientific and technological aspect of high-grade rolled wire production / V.V. Parusov, O.V. Parusov, I.N. Chuyko, A.B. Sychkov // Metallurgical and Mining Industry. 2010. V. 2. № 2. P. 137–142.
25. Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В. Неметаллические включения в стали. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. 536 с.
26. Ensuring high quality indices for the wire rod used to make metal cord / V.V. Parusov, I.V. Derevyanchenko, A.B. Sychkov, M.A. Zhigarev a etc. // Metallurgist. November 2005. Vol. 49. Issue 11–12. P. 439–448.
27. Сычков А.Б., Малашкин С.О., Жигарев М.А. Развитие устройств и способов для термической обработки катанки // Сталь. 2015. № 10. С. 50–54.
28. Григорович К.В., Иванов Э.В., Эндерс В.В. Оптимизация технологии производства высококачественной кордовой стали // Литье и металлургия. 2003. № 4. С. 105–109.
29. Скок Ю.Я. Повышение качества стали путем модифицирования // Сталь. 1992. № 8. С. 13–17.
30. Малиночка Я.Н., Титова Т.М., Курасова. Состав и структура глобулярных сульфидов в сталях с РЗМ // Сталь. 1986. № 4. С. 78–83.
31. Белалов Х.Н. Формирование свойств канатной проволоки // Стальные канаты: науч. тр. Одесса: Астропринт, 2001. С. 105–116.
32. BUSCBR-спец: GS-02-002. Катанка для предприятий по производству металлокорда. Общая закупочная спецификация. 8 с.
33. Особенности формирования структуры и свойств бунтового проката / А.Б. Сычков, М.А. Шекшеев, С.О. Малашкин, Г.Я. Камалова // Металлургия: технология, инновации, качество. Металлургия 2015: труды XIX МНПК. Новокузнецк: ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», 2015. Ч. 2. С. 96–102.
34. Process for heat treating a carbon steel wire: Patent 4830684.122113, U.S. 1989.
35. Aghazadeh J., Saadatmand M. The optimization of interlamellar spacing in a nanopearlitic lead-patented hypoeutectoid steel wire // Journal of materials engineering and performance. November, vol. 20(8). 2011, p.1467.
36. Alberg Henric. Material modeling for simulation of heat treatment. Luleå University of Technology University. 2003:07, p. 22.
37. Глубина обезуглероженного слоя на углеродистой катанке различных заводов-изготовителей / В.В. Тищенко, В.А. Луценко, А.Б. Сычков и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2003. С. 61–64.

Материал поступил в редакцию 22.04.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-2-83-94

EFFECTS OF METALLURGICAL FACTORS AND HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE OF WIRE ROD DESIGNED FOR STEEL CORD PRODUCTION

Kizhner Mark – Ph.D., Technical Manager, HOD-ASSAF Metals Ltd. - Kiriyat Gat Rolling Mill, Ashkelon, Israel. E-mail: mark@hodindustry.co.il.

Sychkov Alexander Borisovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: absychkov@mail.ru.

Sheksheev Maxim Aleksandrovich – Ph.D., Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shecsheev@yandex.ru.

Malashkin Sergey Olegovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shtirlic21999@mail.ru.

Kamalova Gyuzel' Yagafarovna – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: 174kamalova@mail.ru.

Abstract. It is primarily the microstructure that determines the mechanical properties and performance of steel products, as well as their processability. The technical literature describes the effects of the metallurgical quality of primary steel sections and of process and heat treatment parameters on the structure and properties of high carbon wire rod. However, sometimes it is not easy to identify the best processes to get a finely dispersed pearlitic structure, the required decarbonization and other properties in cast and rolled

steel to be used for steel cord production. The purpose of this work is to study the effects of metallurgical factors and heat treatment on the structure of wire rod designed for steel cord production, and to develop an efficient end-to-end process technology comprising steel making, refining, continuous casting, rod production and heat treatment processes using a Stelmor line which ensures a required scope of steel cord properties and a highly efficient thin wire drawing and stranding process. Among the techniques applied, standard spec-

trometers were used to determine the chemical composition of steel. The metallographic study was performed through scanning optic and electron microscopy. The chemical segregation and the chemical composition of nonmetallic inclusions were analyzed through energy-dispersive and wavelength dispersive X-ray spectroscopy on an electron probe micro analyzer (EPMA). Microhardness was measured at different loads using a microhardness tester. The wire rod was tested on tensile-testing machines. Dilatometric techniques were applied to build a CCT diagram. The originality of the study includes development of proven solutions for austenization temperature for high carbon wire rod to ensure an efficient cooling rate at the air-cooling stage. The efficient cooling rates were identified when analyzing the CCT diagram. The following proven patterns have been established. The steel is microalloyed with boron at the boron to nitrogen ratio of < 0.4 to prevent the negative impact of free boron and nitrogen when boron causes increased hardenability and nitrogen leads to ferrite strengthening and steel aging. Steel contamination with nonmetallic inclusions was studied and effective solutions were offered on how to modify them. The heat treatment process of 70-85 steel involves austenization at 950-980°C and cooling at the rate of 25-30°C/s with sorbitic pearlite formed covering at least 70% of the rod section. This results in the best combination of wire rod structure and properties with high processability meeting both regulatory and consumers' requirements.

Keywords: Metallurgical factors, nonmetallic inclusions, microalloying, boron, wire rod, Stelmor line, heat treatment, cooling rate, structure, properties.

References

- Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Mironov O.A. Effect of Chemical Composition on the Structure and Properties of Heat and Abrasion Resistant Cast Irons. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Russian Universities. Ferrous metallurgy]. 2007, no. 3, pp. 44-47.
- Ri E.Kh., Ri Khosen, Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. *Kompleksno-legirovannye belye chuguny funktsionalnogo naznacheniya v litom i termoobrabotannom sostoyanii* [Functional application multi-alloyed white cast irons in the cast and heat-treated states]. Vladivostok: Dalnauka, 2006, 275 p.
- Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkov P.A. Structure and Wear Resistance of Chromium-Vanadium Cast Irons. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Russian Universities. Ferrous metallurgy]. 2004, no. 7, pp. 25-28.
- Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Voronkov B.N. *Kompleksno-legirovannye belye iznosostoykie chuguny* [Wear resistant multi-alloyed white cast irons]. Cheliabinsk: Izdatelstvo REKPOL Print Shop, 2005, 178 p.
- Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Solovyev V.P., Tcybrov S.V. Edited by Kolokoltsev V.M. *Spetsialnye chuguny. Litye, termicheskaya obrabotka, mekhanicheskie svoystva: ucheb. posobie* [A guide in special cast irons: Casting, heat treatment, mechanical properties]. Magnitogorsk: NMSTU, 2009, 187 p.
- Savenok A.N., Vedeneev A.V. New Advances in Steel Cord Production. *Stal'* [Steel]. 2004, no. 10, pp. 60-61.
- Stolyarov A.Iu. Up-to-date equipment for steel cord production. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants]. Interdisciplinary scientific papers. Ed. Korchunov A.G. Edition 2. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, pp. 146-152.
- Vedeneev A.V., Panizovich V.S. New Trends in Steel Cord Equipment. *Litye i metallurgiya* [Casting and Metallurgy]. 2005, no. 4 (36), pp. 81-85.
- Gordienko A.I., Krylov-Oleferenko V.V. Perspectives of Process Technology Application in Steel Cord Production. *Litye i metallurgiya* [Casting and Metallurgy]. 2009, no. 2 (51), pp. 138-143.
- Alekseev Iu.G., Kuvaldin N.A. *Metallokord dlia avtomobilnykh shin* [Steel cord for automobile tyres]. Moscow: Metallurgiya, 1992, 192 p.
- Stoliarov A.Iu., Tokarev N.V. Forming of a Homogeneous Pearlitic Structure of a Patented Workpiece in the Production of High Strength Tyre Cords. *Metiz* [Metalware]. 2011, no. 1, pp. 18-24.
- Abramenko O.V., Zaytseva T.L. 25th Anniversary of Belorussian Steel Cord. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2012, no. 10, p. 10-20.
- Sychkov A.B., Zhigarev M.A., Stoliarov A.Iu., Sheksheev M.A., Zhukova S.Iu., Malashkin S.O. *Metallurgicheskie i metallovedcheskie aspekty proizvodstva vysokouglerodistykh katanki* [High carbon wire rod production: Metallurgical and physicom metallurgical aspects]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 257 p.
- Bogdanov N.A., Kutakov A.V., Sychkov A.B. et al. On the justification of a limited addition of non-ferrous metals in carbon wire rod. *Stal'* [Steel]. 2000, no. 1, pp. 67-69.
- Zaytsev A.I., Zaytseva I.E., Shakhpazov E.Kh. et al. A feasibility study of copper removal from liquid iron by evaporation. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2003, no. 10, pp. 31-37.
- Pivovarci M., Kijak J. Nondesirable additives contents reduction in continuously cast steel. *Metallurgiya*. 2002, 41, no. 1, pp. 57-60.
- Liakishev N.P., Pliner Iu.L., Lappo S.I. Borsoderzhashchie stali i splavy [Boron steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 192 p.
- Parusov V.V., Sychkov A.B., Derevianchenko I.V., Zhigarev M.A. New metallurgical application of boron. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of NMSTU]. 2005, no. 1(9), pp. 15-17.
- Bogdanov N.A., Sychkov A.B., Derevianchenko I.V., Parusov V.V., Nesterenko A.M., Starov R.V. et al. Development and introduction of a technology for making boron-bearing steel. *Metallurgist*. February 1999, vol. 43, iss. 2, pp. 71-75.
- Nesterenko A.M., Sychkov A.B. Dimensional and geometric aspects of alloying with boron and copper. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoy metallurgii* [Fundamental and practical issues of ferrous metallurgy]. Dnepropetrovsk: Vizion, 2004, iss. 7, pp. 181-183.
- Med' v chernykh metallakh* [Copper in ferrous metals]. Ed. Mey I.L. and Shetki M.M. Translated from English. Moscow: Metallurgiya, 1988, 312 p.
- Anil Kumar, Satish C. Koria, Dipak Mazumdar. An Assessment of Fluid Flow Modelling and Residence Time Distribution Phenomena in Steelmaking Tundish System. *ISIJ International*. 2004, vol. 44, no. 8, pp. 1334-1342.
- Craig I.G., de Kock D.J., Makgata K.W. e.a. Design Optimisation of a Single-strand Continuous Caster Tundish Using Residence Time Distribution Data. *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 10, pp. 1194-1200.

24. Parusov V.V., Parusov O.V., Chuyko I.N., Sychkov A.B. Scientific and technological aspects of high-grade rolled wire production. Metallurgical and Mining Industry. 2010, vol. 2, no. 2, pp. 137-142.
25. Gubenko S.I., Parusov V.V., Derevianchenko I.V. *Nemetallicheskie vklucheniia v stali* [Non-metallic impurities in steel]. Dnepropetrovsk: ART-PRESS, 2005, 536 p.
26. Parusov V.V., Derevyanchenko I.V., Sychkov A.B., Zhigarev M.A. et al. Ensuring high quality indices for the wire rod used to make metal cord. Metallurgist. November 2005, vol. 49, iss. 11-12, pp. 439-448.
27. Sychkov A.B., Malashkin S.O., Zhigarev M.A. Evolution of equipment and techniques for heat treatment of wire rod. *Stal'* [Steel]. 2015, no. 10, pp. 50-54.
28. Grigorovich K.V., Ivanov E.V., Enders V.V. Improving a high quality cord steel production process. *Litye i Metallurgiiia* [Steel casting and making]. 2003, no. 4, pp. 105-109.
29. Skok Iu.Ia. Improving the quality of steel through modifications. *Stal'* [Steel]. 1992, no. 8, pp. 13-17.
30. Malinochka Ia.N., Titova T.M., Kurasova. Composition and structure of globular sulphides in steels with REM. *Stal'* [Steel]. 1986, no. 4, pp.78-83.
31. Belalov Kh.N. Building properties in rope wire. *Stal'nye kanaty: Nauch. tr.* [Steel ropes: Research papers]. Odessa: Astroprint, 2001, pp. 105-116.
32. BUSCBR-spec: GS-02-002. Wire rod for steel cord producers. General purchase specification. 8 p.
33. Sychkov A.B., Sheksheev M.A., Malashkin S.O., Kamalova G.Ia. Particulars of forming the structure and properties of bundled steel products. *Metallurgiiia: tekhnologiiia, innovatsii, kachestvo* [Metallurgy: Technology, innovations, quality]. Metallurgiiia 2015. Papers from the 19th International Research Conference: Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, Part 2, pp. 96-102.
34. Process for heat treating a carbon steel wire: U.S. Patent 4830684.122113; filed Nov.18.1987; date of patent May 16, 1989.
35. J. Aghazadeh. The optimization of interlamellar spacing in a nanopearlitic lead-patented hypoeutectoid steel wire. J. Aghazadeh, M.Saadatmand. Journal of Materials Engineering and Performance. Vol. 20(8), November 2011, p. 1467.
36. Henric Alberg. Material modelling for simulation of heat treatment. Luleå University of Technology University. 2003:07, p. 22.
37. Tishchenko V.V., Lutsenko V.A., Sychkov A.B. et al. Decarbonized layer depth in carbon wire rod by different manufacturers. *Metallurgicheskaia i gornorudnaia promyshlennost'* [Steel making and ore mining industry]. 2003, pp. 61-64.

Влияние металлургических факторов и термической обработки на структуру катанки под металлокорд / Kizhner M., Сычков А.Б., Шекшеев М.А., Малашкин С.О., Камалова Г.Я. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №2. С. 83–94. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-2-83-94

Kizhner M., Sychkov A.B., Sheksheev M.A., Malashkin S.O., Kamalova G.Ya. Effects of metallurgical factors and heat treatment on wire rod structure designed for steel cord production. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 2, pp. 83–94. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-2-83-94
