



Short results of the researches, carried out in the conditions of OAO «Moldavian metallurgical works» for recent 25 years and allowed to develop scientifically grounded technological decisions on increase of qualitative characteristics of rolled wire of wide branded grade, are given.

А. Б. СЫЧКОВ, М. А. ЖИГАРЕВ, С. Ю. ЖУКОВА, А. В. ПЕРЧАТКИН, А. В. ПЕРЕГУДОВ, СЗАО «ММЗ»

УДК 669.21

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ КАТАНКИ

Сталь, модифицирование, микролегирование, катанка, проволока, структура, свойства

В настоящее время на мировом рынке востребована катанка для производства проволоки из низко-, средне- и высокоуглеродистых нелегированных и легированных сталей под пружины, канаты, металлокорд, сварочные электроды и омедненную проволоку для сварки строительных конструкций, корпусов судов, труб большого диаметра и магистральных газонефтепроводов, для изготовления которой не требуется проведение умягчающего отжига (или патентирования) перед волочением катанки или на промежуточном размере проволоки.

Ниже приводятся краткие результаты исследований, проведенных в условиях ОАО «Молдавский металлургический завод» (ММЗ) за последние 25 лет и позволивших разработать научно обоснованные технологические решения по повышению качественных характеристик катанки широкого марочного сортамента, которая характеризуется высокой технологичностью переработки на метизном переделе.

Катанка из низкоуглеродистой стали для безотжигового волочения

Для получения катанки повышенной деформируемости (для безотжигового волочения в проволоку диаметром до 0,5 мм) использовали пластифицирующее влияние микродобавок бора и разупрочняющую технологию термомеханической обработки (ТМО) на линии Stelmor с регулируемым воздушным охлаждением [1–3].

Технология производства такой низкоуглеродистой катанки из непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) сечением 125×125 мм предусматривает следующее: модифицирование электростали кальцием и микролегирование бором с обеспечением отношения $B/N \approx 0,8 \pm 0,15$; применение основных

футеровок стальковша и промковша; полная или частичная защита разливаемой струи металла от вторичного окисления; температура раскатов перед проволочным блоком после водяного охлаждения в нулевой секции – не более 950–970 °С; температура виткообразования – 940–970 °С; скорость движения витков катанки на роликовом транспортере – не более 0,3–0,4 м/с; регулируемое воздушное охлаждение блоками струйного охлаждения (БСО): 3 и 4 БСО со скоростью вращения двигателей 600–800 мин⁻¹ в зависимости от диаметра катанки и скоростью охлаждения металла не более 5 °С/с.

Катанка из низкоуглеродистой спокойной стали марок типа 1005, C4D и C9D (ASTM A 510M; EN 10016) успешно конкурирует с катанкой из кипящих сталей аналогичного состава по уровню пластичности. Такой металл способен к безотжиговому волочению со скоростью до 40 м/с с диаметра 5,5 мм в проволоку диаметром 0,5 мм ($\varepsilon_{\Sigma} = 99,2\%$).

Для прогнозирования механических свойств и управления технологическим процессом производства катанки из низкоуглеродистой стали была разработана регрессионная зависимость, которая имеет высокие статистические показатели (R , $S_{\text{ост}}$, F) адекватности реальному процессу. Наиболее значимо влияют на механические свойства (σ_B , σ_T , $\delta_{5/10}$, ψ) низкоуглеродистой катанки химический состав стали (C, Mn, Si, Cr, Ni и Cu, выражаемый через углеродный эквивалент $C_e = Mn/5 + Si/7 + (Cr + Ni + Cu)/12$), температура виткообразования и диаметр катанки. Менее значимо влияние времени охлаждения металла и содержание бора в стали, что объясняется незначительным колебанием этих параметров при принятой технологии производства низкоуглеродистой катанки для безотжигового волочения.

Низкоуглеродистая катанка, подвергнутая охлаждению на линии Stelmog по разработанному режиму, имеет удельную массу окалина на поверхности в пределах 8–12 кг/т. Окалина удаляется полностью как механическим, так и химическим способами. Однако окалина, удаляемая химическим способом, должна быть плотной, без бластеров и состоять преимущественно из вюститита; такая окалина формируется при пониженных температурах виткообразования (~ 900 °С). Для механического удаления окалина требуется более толстый слой вюститной окалина, который формируется при 950 °С и выше.

По разработанной технологии в условиях ММЗ производится до 250 тыс. т/год высококачественной низкоуглеродистой катанки диаметром 5,5 мм для безотжигового волочения проволоки диаметром до 0,5 мм.

Катанка для холодной объемной штамповки (ХОШ)

Для производства катанки для изготовления крепежных изделий методом ХОШ в мировой практике применяют НЛЗ крупного сечения (200–400 мм), которую деформируют с достаточно большой степенью для практически полного устранения литой структуры. Поэтому, например, для получения высококачественного проката на Белорусском металлургическом заводе и Оскольском электрометаллургическом комбинате НЛЗ сечением 250×300 и 300×400 мм прокатывают сначала на обжимном стане на заготовки более мелкого сечения (125×125 и 130×130 мм), а затем на мелкосортно-проволочных станах качество катаных заготовок контролируют в линии дефектоскопии, после чего обнаруженные и отмеченные поверхностные дефекты удаляют на обдирочно-шлифовальных станках или огневым способом.

Особенностью технологии производства проката на ММЗ является разливка стали в НЛЗ малого сечения (125×125 мм). Опыт производства и переработка проката для ХОШ из такого металла показали, что благодаря меньшему размеру сечения НЛЗ по сравнению с обычно применяемыми улучшаются условия кристаллизации стали, в большей мере устраняются неоднородность химических элементов по длине заготовки и усадочные явления. Однако прокатка такой НЛЗ сопровождается меньшей степенью деформации металла, вследствие чего в готовом прокате наблюдаются остатки литой структуры. Следует отметить, что в мировой практике нет опыта производства проката для холодной высадки из НЛЗ малого сечения при отсутствии в составе оборудования средств контроля поверхностных дефектов заготовки и абразивной зачистки этих дефектов.

Основным требованием к горячекатаному прокату для ХОШ является способность выдерживать осадку в холодном состоянии на величину деформации 66 или 75%. Согласно ГОСТ 10702-78, на осаженных образцах не должно быть надрывов и трещин, допускается наличие отдельных рисок глубиной не более 0,1 мм для проката диаметром до 20 мм и не более 0,2 мм для проката диаметром 20 мм и выше.

В международной практике [4] качество поверхности осаженных образцов оценивается по специальной шкале, которой предусмотрено пять классов дефектов: 0; 1; 2; 3 и 4, причем для ХОШ допускается класс дефекта не более 1, а средне-взвешенное значение этого показателя (так называемого коэффициента осаживания F) должно быть в пределах 0,3–0,7 (в зависимости от того, будет ли применяться при последующем переделе холодная или горячая высадка).

Статистическими исследованиями, проведенными в течение 2 лет, показано, что в 86% случаев катанка диаметром 5,5–14,0 мм из низкоуглеродистой стали типа 1005–1022, произведенная на ММЗ по текущим заказам, соответствует требованиям осадки для группы 66 – основному требованию к прокату для ХОШ.

Учитывая перечисленные выше аспекты, в условиях ММЗ разработана и внедрена технология производства бунтового проката для ХОШ из стали 20Г2Р диаметром 5,5–14,0 мм из незачищенной НЛЗ малого (125×125 мм) сечения, что не имеет аналогов в мировой практике. Например, в условиях ОАО «Миттал Стил Кривой Рог», где из слитка массой 9–12 т изготавливают катаную заготовку сечением 150×150 мм, которую после зачистки поверхностных дефектов прокатывают в катанку, выход качественной заготовки из спокойной стали составляет лишь 77–85%.

Сквозная технология производства катанки под ХОШ в условиях ММЗ заключается в следующем [5, 6]. Сталь марки 20Г2Р изготавливают без микродобавок алюминия и титана, которые при применении традиционной технологии соответственно дораскисляют сталь и связывают азот, а бор, повышающий прокаливаемость стали, вводят в количестве 0,001–0,005%.

Согласно разработанной сквозной технологии, глубокое раскисление стали для ХОШ производят кальцием, а связывание азота и повышение прокаливаемости стали – бором, который вводят в повышенном количестве (0,008–0,012%). Это количество бора определяется выражением $B = N_{\text{общ}} + 0,003$, где $N_{\text{общ}}$ – содержание общего азота в стали.

Связывание азота в пластичные соединения VN повышает деформируемость проката для ХОШ, в том числе за счет снижения эффекта деформационного старения [1].

Высокая пластичность катанки из стали 20Г2Р обусловлена также применением разупрочняющей ТМО на линии Stelmog [2], заключающейся в высокотемпературном виткообразовании при 940–960 °С и длительной квазиизотермической выдержке под теплоизолирующими крышками без подачи вентиляторного воздуха (скорость охлаждения металла –0,25–0,15 °С/с при скорости транспортирования витков катанки по роликовому транспортеру – 0,09–0,12 м/с). При этом обеспечиваются следующие механические свойства катанки: $\sigma_b \leq 580 \text{ Н/мм}^2$, $\psi \geq 60\%$. Переработка катанки диаметром 6,5–14,0 мм из стали 20Г2Р, произведенной по вышеописанной технологии, в количестве 2000 т на ОАО «Завод Красная Этна», дала положительные результаты при изготовлении высокопрочного крепежа класса 8.8 с группой осадки 66 (преимущественно) и даже 75.

Сварочная катанка из легированных сталей

Существуют два технологических процесса производства сварочной проволоки с использованием катанки, изготовленной из стали марок Св-08Г2С, Св-08ГНМ, Св-08Г1НМА, Св-08ХГ2СМФ и т. п. [7].

Традиционная технология включает химическое удаление окалины, волочение катанки диаметром 5,5–6,5 мм в проволоку диаметром 5,0–0,8 (0,6) мм с применением 1 или 2 операций смягчающей термической обработки (рекристаллизационного отжига) и последующее омеднение. Для повышения эффекта рекристаллизации структуры (восстановления пластических свойств) некоторые исследователи рекомендуют применение упрочняющей термообработки исходной катанки (понижение температуры виткообразования или окончание прокатки в двухфазном ($\gamma + \alpha$) интервале температур). Такая технологическая схема производства сварочной проволоки из легированных сталей неэффективна: она затратная (имеет значительную продолжительность технологического цикла, требует использования большего количества технологического оборудования и производственных площадей, повышенного количества обслуживающего персонала) и существенно загрязняет окружающую среду.

Новая, современная технология, все больше применяемая на практике, предполагает получение омедненной сварочной проволоки необходимых диаметров без применения умягчающей термообработки, что достигается за счет уникального ком-

плекса свойств катанки – способности деформироваться до конечных диаметров 0,8 (0,6) мм и выше (в зависимости от марки стали и ее назначения для дальнейших сварочных работ). Современная технология безотжигового волочения катанки в проволоку содержит следующие этапы: механическое удаление окалины, сухое волочение катанки на промежуточный диаметр 5,15–1,70 мм (в зависимости от марки стали), затем без применения промежуточной термообработки – или мокрое волочение, совмещенное с электрохимическим омеднением поверхности проволоки диаметром 1,6–0,8 (0,6) мм или сухое волочение проволоки диаметром 5,0–2,0 мм и омеднение. Таким образом, преимущества новой схемы производства сварочной проволоки очевидны.

В условиях ММЗ освоение производства сварочной катанки из легированных сталей было начато со стали типа Св-08Г2С, которая на первом этапе предназначалась для изготовления сварочной проволоки по традиционной схеме, и только с 2003 г. (хотя отдельные попытки проводились и ранее) – по современной схеме [7]. Естественно, что для современной схемы производства сварочной проволоки требуется катанка, обладающая чрезвычайно высокой пластичностью – способностью к холодной деформации со значительной суммарной степенью (ϵ_{Σ} до 98,8%). Учитывая опыт освоения и внедрения новейших технологий производства катанки из стали типа Св-08Г2С и достигнутые при этом положительные результаты по безотжиговому волочению ее в готовую омедненную проволоку диаметром до 0,8 (0,6) мм, были разработаны и внедрены технологические операции производства катанки из стали марок Св-08ГНМ, Св-08Г1НМА, Св-08ХГ2СМФ и др., способной к волочению до необходимых конечных диаметров без начальной или промежуточной термической обработки. В работе [7] нами разработаны принципы пластифицирования катанки сварочного назначения, снижающие действие структурно-деформационных упрочняющих эффектов, которые заключаются в следующем: уменьшении общей степени легирования твердого раствора за счет снижения (в рамках требований нормативной документации) содержания в стали углерода, марганца, кремния, фосфора, хрома, никеля, меди, молибдена, ванадия; снижении микродеформации кристаллической решетки феррита и плотности дислокаций за счет вывода из твердого раствора атомов внедрения – азота, что достигается связыванием азота бором в мелкодисперсный нитрид бора при соотношении В/N, близком к стехиометрическому соотношению ($\sim 0,8$); снижением в максимальной степени микроликва-

ционных явлений в НЛЗ и прокате; уменьшением количества бейнитно-мартенситных участков путем проведения разупрочняющей ТМО катанки.

Внедрение современного металлургического оборудования (VD, ЭМП, длинной линии Stelmor) и новых технологий (микролегирующие стали бором, модифицирование неметаллических включений (НВ) кальцием, снижение содержания в стали углерода, марганца, фосфора и серы, применение разупрочняющей ТМО) позволило обеспечить значительное повышение технологической пластичности катанки.

Результаты лабораторных исследований на катанке из стали марок Св-08ХГ2СМФ, Св-08Г1НМА, Св-08ГНМ и других показывают, что самые высокие показатели пластических характеристик соответствуют изотермической выдержке в интервале температур 600–700 °С, для Св-08Г2С – 550–600 °С в течение 20–30 мин, причем выдержка в течение 30 мин влияет в большей степени. Такие температурно-временные параметры обработки в максимальной мере способствуют превращению аустенита в феррит и перлит.

По разработанной технологии на ММЗ производится свыше 15 тыс. т/год высококачественной катанки из легированных сталей для изготовления безотжиговым волочением омедненной сварочной проволоки.

Катанка из высокоуглеродистой стали

Высокоуглеродистая ($C \approx 0,50\text{--}0,90\%$) катанка используется для производства проволоки для подъемных и трансмиссионных канатов, пружин, проволочной арматуры и арматурных пряжей, оплеток рукавов высокого давления, металлокорда.

Наиболее ответственными видами катанки из высокоуглеродистой стали является катанка, предназначенная для производства металлокорда и высокопрочных арматурных канатов. Особенности производства такой катанки приводятся ниже.

Катанка для металлокорда

Освоение производства высокоуглеродистой катанки кордового назначения на мини-металлургическом комплексе ММЗ, предназначенном по проекту для производства рядовой катанки, являлось сложной научно-технической проблемой. Это было обусловлено следующим: при выплавке и непрерывной разливке стали не предусматривалось ее вакуумирование и электромагнитное перемешивание; в качестве шихты использовался обычный металлолом; разливка стали производилась и производится на НЛЗ малого сечения (квадрат 125×125 мм), которые при производстве катанки подвергались и подвергаются низкому укову.

Основные требования к качественным показателям стали, НЛЗ и катанки для изготовления металлокорда: обеспечение заданных пределов по содержанию основных химических элементов С, Mn, Si, Cr, Ni, Cu; снижение содержания вредных примесей P, S, As, Zn, Pb, Sn и т. п. до требований мировых стандартов; повышение чистоты стали по НВ, особенно недеформируемым; исключение в стали в максимальной степени НВ сложного химического состава с высокой долей Al_2O_3 ; получение НЛЗ с удовлетворительной чистотой поверхности, минимальной ликвацией, пористостью, без инородных включений; обеспечение однородности структуры и механических свойств катанки по длине мотка; получение в структуре сорбитообразного перлита в количестве $> 50\%$ при минимальном количестве структурно-свободного феррита или цементита; исключение образования закалочных структур.

Ниже рассмотрено обеспечение этих требований в условиях ММЗ.

Химический состав стали

Технология выплавки и внепечной обработки стали на ММЗ гарантирует точное попадание в заданный химический состав кордовой стали марок 70КРД, 80КРД, 85КРД с незначительным внутривсплавочным размахом вариации (разбегом) массовых долей элементов: $\Delta C = 0\text{--}0,01\%$; $\Delta Mn = 0\text{--}0,03\%$; $\Delta Si = 0\text{--}0,03\%$; межвсплавочный разброс значений соответственно составляет: $\Delta C = 0\text{--}0,04\%$; $\Delta Mn = 0\text{--}0,05\%$; $\Delta Si = 0\text{--}0,05\%$. Содержание фосфора и серы обеспечивается на уровне соответственно не более 0,015 и 0,006%, что является весьма хорошим показателем. При производстве стали на базе селективно отобранного металлолома с добавлением до 30% от массы металлошихты передельного чугуна или другого сырья (Синтикома, Суперкома, горячебрикетированного железа) остаточное содержание цветных примесей достигает достаточно высоких значений. Применение же «чистого» сырья (металлизированных окатышей) для производства катанки под металлокорд является весьма дорогим мероприятием. Поэтому с учетом проведенных нами исследований [8] можно утверждать, что содержание $Cr \leq 0,15\%$; $Ni \leq 0,15\%$; $Cu \leq 0,25\%$ не оказывает негативного воздействия на свойства катанки и проволоки для металлокорда.

В настоящее время на ММЗ с определенным уровнем дополнительных затрат можно обеспечить в стали массовые доли хрома, никеля и меди на уровне $\leq 0,06$, $\leq 0,10$ и $\leq 0,15\%$ соответственно. Небезынтересно, что математическим моделированием с поиском оптимума функции отклика методами непараметрической статистики для высоко-

углеродистой катанки ($C \geq 0,67\%$) показано, что с увеличением суммарного содержания хрома, никеля и меди в диапазоне значений 0,15–0,45% ее пластические свойства увеличиваются ($\psi \approx 30\text{--}36\%$ при первичных испытаниях).

Микродобавка бора, связывая азот в нитриды и карбонитриды, уменьшает степень развития процессов деформационного старения при волочении катанки и проволоки. При соотношении $B/N = 0,20\text{--}0,25$ в кордовой стали в наибольшей мере проявляется пластифицирующее действие бора.

Вакуумирование стали, обеспечивая ее глубокую дегазацию по водороду (до вакуумирования содержание водорода – 2–6, после вакуумирования – 0,3–1,5 ppm) и в меньшей степени по азоту (соответственно 0,010–0,012 и 0,005–0,007%), обуславливает дополнительное повышение пластичности катанки. Так, если при первичных испытаниях катанка из невакуумированной стали марки 70КРД имеет уровень относительного сужения $\psi = 30\text{--}35\%$, то из вакуумированной стали – 38–45%.

Количество вредных примесей в стали обеспечивается в основном на низком уровне: $P \leq 0,010$; $S \leq 0,005$; $As \leq 0,01$; $Zn \leq 0,001$; $Pb \leq 0,01$; $Sn \leq 0,01\%$. Это дополнительно повышает пластические характеристики катанки и ее деформируемость в холодном состоянии.

Неметаллические включения

НВ, находящиеся в металлической матрице, имеют, как правило, различную деформируемость в исходном состоянии. Вследствие этого на границе недеформирующихся НВ формируются микрополости – нарушения сплошности металла, по которым в дальнейшем может происходить разрушение катанки и проволоки. Оценить деформируемость НВ можно индексом деформируемости ν , 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 его значении, равном 1, деформируемость НВ и металла одинакова. Наиболее опасные в этом смысле НВ ($\nu = 0$) алюминаты и алюмокальциваты, имеющие высокую температуру плавления. Наиболее пластичны сульфиды марганца ($\nu = 1$), обладающие температурой плавления не более 1400°C. В последнем случае сульфиды марганца хорошо деформируются в процессе горячей прокатки катанки, образуя мелкие строчки пластичных НВ, которые также хорошо деформируются при последующем холодном волочении [9].

В условиях ММЗ эффективно используется модифицирование стали кальцием путем ввода на

установке ковш-печь (УКП) кальцийсодержащей проволоки (SiCa, FeCa – порошковая проволока). При соотношении $Ca/a_0 = 0,60\text{--}1,20$ (a_0 – концентрация активного кислорода) возможно превращение недеформируемых алюминатов ($MgO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot Al_2O_3$) в пластичное соединение с пониженной температурой плавления – $12CaO \cdot 7Al_2O_3$, которое легко переходит в шлак. При других соотношениях Ca/a_0 образуются твердые тугоплавкие алюминаты, которые формируют настывы в стаканах-дозаторах и недеформируемые НВ в стали. Использование магниезальных сталеразливочных ковшей (СК) также способствует снижению загрязненности стали НВ.

Проведенные исследования позволили определить комплекс технологических мероприятий, позволяющих снизить загрязненность металла НВ: применение оптимального количества кальцийсодержащей порошковой проволоки для модифицирования НВ; использование основных футеровок СК и промежуточного ковша (ПК); выбор оптимального состава теплоизолирующих и рафинирующих засыпок в УКП, не содержащих оксидов железа и марганца; продувка стали в УКП аргоном через специальные продувочные блоки; защита от вторичного окисления струи стали, истекающей из СК в ПК и из ПК в кристаллизатор.

Уменьшение в условиях ММЗ загрязненности НВ катанки из высокоуглеродистой стали для металлокорда обычной, высокой и сверхвысокой прочности (совместно с другими показателями качества) обеспечило высокую технологичность ее переработки на метизном переделе (обрывность при микроволочении – не более 1,5–2,0 t^{-1} , при свивке прядей и кордовых конструкций – не более 2,0–2,5 t^{-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 при соответственном сокращении зоны столбчатых кристаллов.

Результаты исследований показывают следующее:

- из-за дендритной ликвации в НЛЗ образуются ликвационные полосы, «шнуры», структурная полосчатость, остатки которых выявляются и в катанке, и в проволоке; ЭМП способствует реализации затравочно-инокулирующего эффекта при кристаллизации стали, что увеличивает количество центров кристаллизации и способствует увеличению скорости кристаллизации; зона равноосных кристаллов в результате действия ЭМП заметно

увеличивается – в среднем в 1,7 раза, при этом центральная ликвация и пористость рассредоточиваются;

- ликвация на макро- и микроуровне обуславливает также и формирование в центральных частях высокоуглеродистой катанки мартенситных участков, протяженность которых составляет от 5 до 200 мкм.

Оптимизация процесса кристаллизации слитка, режимов ЭМП, степени перегрева над температурой ликвидус позволяет практически исключить появление закалочных структур. Несмотря на вредность закалочных структур, многие известные фирмы, например Beakaert, допускают их ограниченное наличие даже в катанке кордового назначения: в центральных участках сечения катанки – мартенсит протяженностью до 20 мкм. В связи с этим на ММЗ разработан специальный документ, регламентирующий наличие в структуре катанки для металлокорда единичных мартенситных участков протяженностью не более 20 мкм.

При производстве катанки необходимо одновременное обеспечение нескольких показателей качества. Зачастую улучшение одних из них может привести к ухудшению других. Здесь необходим поиск приоритета, степени значимости какого-либо показателя по отношению к другим. Так, повышение дисперсности перлита высокоуглеродистой катанки приоритетнее увеличения вторичной окалины или глубины обезуглероживания, однако при наличии грубых поверхностных дефектов высокая дисперсность перлита будет бесполезна, так как возрастет обрывность катанки и проволоки именно по дефектам поверхности.

В процессе исследований была определена взаимосвязь между количеством перлита 1-го балла и температурой виткообразования, согласно которой имеются два интервала температур раскладки катанки на витки, в которых межпластинчатое расстояние в перлите минимально: первый интервал – 950–1000 °С, второй – менее 700 °С. В этих случаях образуется практически 100% мелкодисперсного перлита 1-го балла (межпластинчатое расстояние < 0,2 мкм). Однако при температурах металла ниже 700 °С в поверхностных слоях катанки формируется недопустимая постзакалочная структура – сорбит отпуска, ухудшающая технологичность переработки такой катанки в проволоку. При высоких температурах (950–1000 °С) возникает другой недостаток – увеличивается среднее количество вторичной окалины до 6–8 кг/т против 2–4 кг/т при температуре виткообразования 800–850 °С, однако в последнем случае количество мелкодисперсного перлита уменьшается на 30–40%. В связи с тем что

формируемая при температурах 950–1000 °С окалина состоит в основном из вюстита и затем она вместе с витками катанки подвергается быстрому охлаждению вентиляторным воздухом, в том числе и в температурном диапазоне 570–400 °С, превращение вюстита в магнетит не происходит, вследствие чего 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 повышение дисперсности перлита при одновременном снижении глубины обезуглероживания обуславливает улучшение деформируемости металла при волочении и свивке металлокорда.

Наряду 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 литературе [10] отмечается также 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, следовательно, высокой сопротивляемости к зарождению 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. В обезуглероженном слое меньше вероятность образования мартенсита истирания и вызываемых им поверхностных трещин и надрывов. С учетом изложенного необходимо обеспечивать равномерную глубину обезуглероживания катанки по ее периметру. Проведенное нами сравнительное исследование [11] по распределению обезуглероженного слоя по периметру высокоуглеродистой катанки на различных металлургических заводах показало, что в условиях ММЗ обеспечивается формирование достаточно равномерного обезуглероженного слоя, что является одним из достоинств такой катанки.

Сквозной технологией производства высокоуглеродистой катанки на ММЗ обеспечивается низкая дефектность ее поверхности: глубина дефектов не превышает 0,15 мм, а в 95 % случаев она не более 0,10 мм.

Высокоуглеродистая катанка для производства высокопрочных натяжных проволок и арматурных канатов

ММЗ освоил производство высокоуглеродистой катанки, микролегированной ванадием и/или хромом, из сталей марок типа С82D по EN 10016 и контрактным техническим требованиям. Этот вид металлопроката предназначен для изготовления высокопрочной проволоки и проволочных изделий для армирования железобетонных конструкций (плит перекрытий, конструкций автомагистралей, виадуков), обрезиненных устройств для плавного пересечения автомобилями железнодорожных переездов, натяжных прядей для вантовых мостов.

В отличие от традиционного способа производства натяжных прядей (арматурных канатов), применяемого, например, в странах СНГ, новый способ не содержит операцию патентирования катанки, целью которой является сорбитизация структуры и увеличение как прочностных, так и пластических свойств катанки. Очевидно, что катанка, используемая при современной технологии производства высокопрочных арматурных канатов, должна иметь такой же комплекс свойств, как и патентированная катанка.

Основной сложностью в производстве данного вида продукции является обеспечение заданной высокой прочности исходной катанки – не менее 1150, 1200 и 1250 Н/мм², что обусловлено высокой прочностью арматурных канатов – не менее 1770, 1860, 2000 Н/мм² и более. Так как в основном для производства данной продукции используется катанка крупных диаметров (8,0 мм и выше), то проблема обеспечения заданного структурного состояния и предела прочности в исходной катанке достигается легированием стали и интенсивным охлаждением на линии Stelmor.

В условиях ММЗ максимальная скорость воздушного охлаждения на линии Stelmor составляет не более 10–12 °С/с вместо необходимых 20–25 °С/с. Вследствие этого достижение требуемой структуры и соответственно уровня прочности катанки может быть получено только при дополнительном легировании стали ванадием и/или хромом.

Механизм упрочнения стали ванадием заключается в том, что карбиды и нитриды ванадия, располагаясь в ферритной матрице перлита в виде дисперсных частиц, сдерживают движение дислокаций и упрочняют металл за счет так называемого дисперсионного твердения. Хром упрочняет сталь в основном по твердорастворному механизму.

Для ванадия и хрома характерна ликвация в микрообъемах металла, возникающая при кри-

сталлизации – дендритная ликвация. В процессе прокатки дендритная ликвация полностью не устраняется, вследствие чего в микроструктуре катанки образуются структурная полосчатость, карбидная неоднородность, мартенситные участки. Микрорентгеноспектральный анализ мартенситных участков и перлитной матрицы показал, что образование мартенсита обусловлено ликвацией Mn, Cr и V, причем коэффициенты их ликвации находятся в следующих диапазонах: Cr – $k_{л} = 2,62–3,46$, Mn – $k_{л} = 1,79–2,08$, V – $k_{л} = 3,0–7,5$.

Наличие структурной неоднородности в стали приводит к появлению микронапряжений, в результате чего при проведении механических испытаний непосредственно после прокатки наблюдается преждевременный разрыв образцов катанки, поэтому не достигается номинальное значение предела прочности. Как показали исследования, разрушения происходят именно в местах химической и структурной неоднородности стали. В результате номинальный предел прочности катанки достигается только после ее вылеживания в течение нескольких дней, в процессе которого существенно снижаются содержание водорода в стали и уровень микронапряжений. Очевидно, что химическая и структурная неоднородность стали оказывают негативное влияние и на технологичность катанки-проволоки на метизном перееде.

Другим проявлением ликвационных процессов в высокоуглеродистой катанке является образование цементитной сетки, степень развития которой повышается с увеличением содержания углерода в стали. Подавить выделение цементитной сетки возможно либо интенсивным воздушным охлаждением катанки, либо снижением содержания углерода в стали за счет дополнительного легирования такими элементами, как Mn, V и Cr.

Для устранения негативного влияния структурной неоднородности стали, в том числе мартенситных участков, необходима установка более эффективной системы ЭМП, увеличение поперечного сечения НЛЗ, интенсификация воздушного охлаждения катанки на линии Stelmor.

Для снижения негативного влияния структурной неоднородности катанки из высокоуглеродистой стали, содержащей добавки V и/или Cr, такую сталь на ММЗ микролегировуют бором.

Как показали опытно-промышленные эксперименты, технологичность переработки высокоуглеродистой катанки в натяжную проволоку и натяжные пряди – удовлетворительная.

На ММЗ производится до 100 тыс. т/год высокоуглеродистой катанки различного назначения.

Выводы

В условиях ММЗ разработаны и внедрены научно обоснованные технические решения по производству высокопластичной катанки из сталей широкого марочного сортамента и назначения. Сочетание новых технологических приемов выплав-

ки стали (модифицирование кальцием и микролегирование бором, защита металла от вторичного окисления, вакуумирование и пр.), прокатки и ТМО позволило осуществить в промышленных масштабах безотжиговое волочение катанки-проволоки.

Литература

1. Новое применение бора в металлургии / В. В. Парусов, А. Б. Сычков, И. В. Деревянченко и др. // Вестн. МГТУ. 2005. № 1(9). С. 15–17.
2. Разупрочняющая термомеханическая обработка проката из углеродистой стали / В. В. Парусов, А. Б. Сычков, В. А. Луценко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2003. № 6. С. 54–56.
3. Формирование оптимальных свойств окалины на поверхности катанки / А. Б. Сычков, М. А. Жигарев, С. Ю. Жукова и др. Бендеры: Полиграфист, 2008.
4. Катанка из непрерывнолитой заготовки / Х. А. Шифферль // Черные металлы. 1986. № 7. С. 53–58.
5. Новая технология производства проката для холодной объемной штамповки из борсодержащей стали / В. В. Парусов, В. Г. Черниченко, А. Б. Сычков и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Днепропетровск: «ВІЗІОН», 2004. Вып. 7. С. 300–311.
6. Особенности влияния бора на качественные характеристики стали для холодной высадки / В. В. Парусов, А. Б. Сычков, И. В. Деревянченко и др. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Днепропетровск: ПГАСиА. 2005. Вып. 32. С. 62–68.
7. Структура и свойства катанки для изготовления электродов и сварочной проволоки / А. Б. Сычков, В. В. Парусов, А. М. Нестеренко и др. Бендеры: Полиграфист, 2009.
8. Сычков А. Б. Разработка сквозной технологии производства эффективных видов катанки из непрерывно литой заготовки с повышенным содержанием примесей цветных металлов и азота: Дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2005.
9. Трансформация неметаллических включений в стали / С. И. Губенко. М.: Металлургия, 1991.
10. Формирование свойств канатной проволоки / Х. Н. Белалов // Стальные канаты: науч. тр. Одесса: Астропринт, 2001. С. 105–116.
11. Катанка Молдавского металлургического завода для производства металлокорда / В. В. Парусов, А. М. Нестеренко, А. Б. Сычков и др. // Стальные канаты: науч. тр. Одесса: Астропринт, 2001. С. 99–105.