

В.И.Спиваков, Э.А.Орлов, П.Л.Литвиненко

ПУТИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИОННО–ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ТОЛСТОЛИСТОВОГО И ШИРОКОПОЛОСНОГО ПРОКАТА

Целью работы явилось выявление перспективных путей развития производства толстолиствого и широкополосного проката. Приведен анализ работ, выполненных в ИЧМ НАНУ им. З.И.Некрасова по проблеме деформационно–термического упрочнения (ДТУ) толстолиствого и широкополосного проката конструкционного назначения. Показано, что достигнутые технические решения соответствуют их мировым аналогам и позволяют производить экономичный и конкурентоспособный листовой прокат повышенной прочности.

толстый лист, широкополосный прокат, деформационно–термическое упрочнение, технические решения, пути развития

Современное состояние вопроса. Актуальность решения проблемы повышения прочности массовых видов листового и фасонного проката в 60 – 70–х годах была связана с необходимостью снижения металлоемкости ответственных конструкций и машин за счет использования проката повышенной ($\sigma_t = 325\text{--}425 \text{ Н/мм}^2$) и высокой ($\sigma_t \geq 450 \text{ Н/мм}^2$) прочности, производство которого отставало от потребностей народного хозяйства и было ресурсо – и энергозатратным. Значительное снижение металлоемкости национального дохода ожидалось именно при использовании этих видов проката, который при ограниченных в то время объемах экспорта, практически полностью использовался на внутреннем рынке.

ИЧМ был определен Минчерметом СССР главным по проблеме ДТУ массовых видов проката, доля которого составляла в то время более 90% от общего объема производства, а конструкционного листового – более 30%. Работы по созданию перспективных технологий ДТУ толстых листов и широкополосной стали были начаты в ИЧМ по инициативе академика НАНУ К.Ф. Стародубова и д.т.н. И.Г.Узлова. Следует отметить, что к этому времени, в отличие от стержневой арматурной стали, потребность в которой остро испытывала строительная индустрия для изготовления напряженного железобетона, конкретных потребителей листового проката повышенной прочности выявить было сложно несмотря на то, что металлоконструкции и машины ответственного производства, выполненные, в основном из горячекатаных сталей типа Ст3, 09Г2, 09–12Г2С, 10ХСНД превышали по весу на 20–40% аналогичные зарубежные образцы. Это не будет казаться странным, если учесть что экономические стимулы производства и потребления массовых видов проката повышенной прочности в то время практически отсутствовали. Так, производство машин и металлоконструкций планировались в тоннах, а приплаты на меткомбинатах существовали только за дополнительную термообработку проката – нормализацию или улучшение (закалку с отпуском), которая выполнялась только по требованию потребителя.

В большинстве случаев потребители не требовали термообработку, удовлетворяясь свойствами горячекатаного проката, производимого по ГОСТ, а у меткомбинатов не было проблем с его реализацией в связи с постоянным опережением спроса на металл над предложением. Интерес к применению листового и фасонного металлопроката повышенной прочности возрос позже, после создания экономических рычагов стимулирования его производства и применения в связи с разработкой Госпланом СССР перечня экономичных видов металлопродукции. Были определены коэффициенты экономии металла, которые составляли: 0,25 – при использовании проката из низколегированных сталей, а также после его улучшения (закалки и отпуска); 0,1 – после ДТУ; 0,1 – 0,2 – для проката, дифференцированного по группам прочности (ТУ 14– 3083) и 0,02 – нормализованного. Следует подчеркнуть, что в условиях плановой экономики указанные мероприятия являлись стимулом производства и применения эффективных видов проката, которые не могут действовать в настоящее время.

Целью работы явилось выявление перспективных путей развития производства толстолистового и широкополосного проката.

Постановка задачи. Особенностью листового проката, как объекта ДТУ, является большой марочный (ГОСТ 380, 14637, 6713, 5521, 27772, 19281 и др.) и размерный сортамент (толщина от 4 до 50 мм). Вторая особенность заключается в повышенной склонности к потере плоскостности при закалке или регулируемом ускоренном охлаждении (РУО). В связи с этим, ДТУ листового проката необходимо осуществлять во-первых как в условиях реверсивных так и широкополосных станов, что решает вопрос полного сортамента и, во-вторых, обеспечивать при этом его технологическую плоскостность листов при РУО в свободном (незажатом) состоянии. Усеед последнее обстоятельство оказался особенно важным для успешного осуществления ДТУ толстолистовой стали с прокатного нагрева на реверсивных станах, поскольку на широкополосных, при смотке полос в рулон после РУО, этой проблемы практически не существует.

Изложение основных материалов исследования. Основная деятельность ИЧМ сосредоточилась на разработке энергосберегающих технологий ДТУ и оборудования для РУО проката, исследовании процессов формирования оптимальной структуры и механических свойств листовых сталей повышенной ($\sigma_t = 325 - 425 \text{ Н/мм}^2$) и высокой ($\sigma_t \geq 450 \text{ Н/мм}^2$) прочности, создании основ автоматизированного контроля и управления процессом ДТУ в потоке станов.

Основные результаты работ по ДТУ толстых листов и широкополосной стали, выполненных в ИЧМ приведены ниже.

1. Конструкционный толстолистовой прокат общего назначения.

В отличие от сортового и фасонного проката, в 70–е годы уже существовали оборудование и технологии для термической обработки толстых листов с повторного нагрева. Так, для мосто– и судостроения производили толстый лист по ГОСТ 6713, ГОСТ 5521 из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, а также легированный специального назначения по энергоемким технологиям – нормализацией и улучшением в термических отделениях цехов реверсивных станов 2800, 2300 и др. меткомбинатов Украины и России.

Цель указанных энергоемких технологий термообработок, как правило, состояла в повышении комплекса механических свойств стали до уровня требований ГОСТов на горячекатаный металл, которые не всегда обеспечивались после прокатки. В связи с низкой стоимостью энергоносителей остро не стоял вопрос о переходе к экономичным технологиям ДТУ с использованием тепла прокатного нагрева. С удорожанием энергоносителей, стало очевидно, что массовое производство эффективного проката экономически целесообразно только при использовании энергосберегающих технологий ДТУ с использованием установок РУО от штатных температур конца прокатки ($A_{C3} + 20-50^{\circ}\text{C}$) или применение низкотемпературной контролируемой прокатки (НКП) карбонитридных сталей (при температурах $< A_{C3}$) прежде всего для труб нефтегазопроводов, взамен более энергоемкой нормализации или улучшения [1,2,3].

Использование оборудования, применяемого для закалки листов с печно-го нагрева в зажатом состоянии, предотвращающего их деформацию, а именно закалочных прессов и роликовых закалочных машин (РЗМ) старой конструкции, оказалось практически неприемлемо при РУО листов с прокатного нагрева. Предпринимались неоднократные попытки разместить за чистовыми клетями отечественных реверсивных станов установками различных конструкций, в том числе с применением РЗМ, однако дальше их опытного опробования дело, как правило, не продвигалось [4]. Таким образом, для ДТУ листового проката прежде всего потребовалось создание эффективных средств РУО, причем таких же надежных в эксплуатации, как и все основное оборудование прокатного стана, обеспечивающих коэффициент упрочнения стали K_y ($\sigma_t \text{ дту} / \sigma_t \text{ гк}$) в пределах 1,1–1,5 и технологическую плоскостность толстолиствого проката.

На первом этапе, учитывая положительный опыт применения способа термоупрочнения сортового проката в устройствах камерного типа (УКТ) с высоким удельным расходом (до 100–150 м³/м²/ч), опробовали его в условиях термоотделений реверсивного стана 2800 для ДТУ толстых листов [5] и полос в условиях широкополосного стана 1700 [6]. Был получен высокий комплекс свойств, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 14637, 19281 для классов прочности 325 (Ст3), 340 (09Г2) и 390 (09Г2С, 10ХСНД), достигнутый при улучшении листов. Плоскостность листов после закалки на УКТ в свободном состоянии была ниже требуемой, поэтому их применение рекомендовали для новых РЗМ и в узлах интенсивного охлаждения полос на НШС [6]. Для осуществления ДТУ листового проката в потоке реверсивных и широкополосных станов без значительных капитальных затрат потребовалось создание низкорасходных (до 40–50 м³/м²/ч) охлаждающих устройств для РУО, что являлось дополнительным требованием при их разработке.

В 1973 г. после ввода в действие на «МК «Азовсталь» крупнейшего в Европе толстолиствого стана 3600 ИЧМ НАНУ были начаты работы, в результате которых за чистовой клетью стана было создано опытно – промышленное оборудование для РУО листов в незажатом состоянии и разработана технология ДТУ по схеме одинарной обработки (без отпуска) листов путем РУО до заданной температуры и двойной (с форсированным отпуском после РУО в

нормализационных печах, расположенных в потоке стана) [7]. В 1986г., впервые в СССР, в условиях стана 3600 «МК «Азовсталь» была введена в эксплуатацию промышленная охлаждающая установка ванного типа (УОВТ), изготовленная в ЧССР по проекту ИЧМ НАНУ, позволяющая охлаждать листы толщиной 50–10 мм до 600⁰С и ниже в незажатом состоянии со скоростью соответственно 7–30⁰С/с, которая находится в эксплуатации и в настоящее время без существенных конструктивных изменений.

Вопросы, связанные с обеспечением равномерности и скорости охлаждения листов в УОВТ при небольших удельных расходах (до 45 м³/м²/ч) технической водой грубой очистки удалось решить при плоскоструйном охлаждении с использованием низконапорных устройств ванного типа для охлаждения нижней и верхней сторон листа [8,9]. Технологическая плоскостность раскатов достигнута за счет их асимметричного охлаждения и соотношения общих расходов воды на верхней и нижней стороне листа, равным соответственно от 1/1,5 до 1/2,0 [10]. Разработанные технологии и оборудование позволяют производить листы повышенной прочности из низкоуглеродистых типа СтЗсп ($\sigma_t = 325\text{--}345 \text{ Н/мм}^2$) и низколегированных типа 09Г2, 09Г2С, 10ХСНД, 14Г2АФ и др. ($\sigma_t = 375\text{--}390 \text{ Н/мм}^2$) сталей с прокатного нагрева при РУО без использования РЗМ [11]. По нашему мнению, наличие подобных машин в потоке стана значительно усложняет и удорожает технологию ДТУ, их применение оправдано только в случае полной закалки листов с последующим высоким отпускком, как это осуществила, например, фирма «Юзинор» (Франция) [2].

Нами был предложен Укргипромету вариант технологии ДТУ листов с совместным использованием установок типа УОВТ и РЗМ, размещенных последовательно в линии стана 3600, что в настоящее время является приоритетным решением в технически развитых странах. Опытно–промышленные партии ДТУ листов из низкоуглеродистой СтЗсп ($\sigma_t = 325\text{--}345 \text{ Н/мм}^2$) и низколегированной стали 09Г2С ($\sigma_t = 375\text{--}390 \text{ Н/мм}^2$) толщиной 10–30 мм были исследованы совместно с ИЭС им. Е.О.Патона, ЦНИИСК, ЦНИИПСК. Сопоставление свойств основного металла и зоны сварных соединений свидетельствует о равноценности замены в металлических конструкциях низколегированных марок стали с пределом текучести 300–400 Н/мм² на упрочненную низкоуглеродистую не только по нормируемым НТД характеристикам, но и по сопоставлению переменным нагрузкам и циклической вязкости [12].

В связи с относительно невысокой степенью упрочнения ($K_y = 1,1\text{--}1,2$) разупрочнение при сварке ДТУ листов из Ф–П сталей не происходит, что позволяет их применять для изготовления ответственных изделий, в том числе и для сварных труб большого диаметра класса прочности К44 – К50, изготовленных из низкоуглеродистой термоупрочненной стали [12,22]. Полученный, например, у ДТУ стали СтЗсп высокий комплекс свойств позволил дать рекомендации по равноценной замене этой сталью в металлических конструкциях, машинах и механизмах низколегированной горячекатаной стали марок 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1 и др. класса прочности С46/33 по ГОСТ 27772, 19872 [13].

Как было установлено, производство проката повышенной прочности

должно сопровождаться общим улучшением качества металла и, прежде всего, снижением газонасыщенности и вредных примесей. Так, содержание серы и фосфора в прокате из стали Ст3 сп по ГОСТ 380 должно быть не более 0,025% каждого, а из низколегированных сталей, по ГОСТ 19282, соответственно не более 0,02%, что и было нами предусмотрено в разработанных новых ТУ (ТУ У 14–4–405 и ТУ У ДП 14–4–421) на ДТУ прокат. В последующем, для повышения стабильности и однородности свойств ДТУ листов на промышленной установке УОВТ стана 3600 ИЧМ выполнялись работы по созданию опытной автоматической системы регистрации параметров и управления процессом ДТУ с использованием разработанных моделей, алгоритмов и программных средств [14]. При этом, в процессе отработки технологии ДТУ способом одинарной обработки листов на требуемый уровень свойств и плоскостности, как наиболее энергосберегающего процесса, установлена необходимость применения трех моделей управления процессом:

- достижения заданной среднemasсовой температуры окончания РУО листов на УОВТ (самоотпуска) – $T_{з, \text{срм}}$ – (модель теплотехническая);
- зависимости механических свойств от химсостава и $T_{з, \text{срм}}$ (модель «химия – технология – свойства»);
- обеспечения технологической плоскостности раскатов (модель плоскостности).

В результате проведенных исследований установлены основные факторы влияния и параметры указанных моделей:

- первая – теплотехническая модель процесса ускоренного охлаждения листов на установке УОВТ представлена уравнением:

$$G_{\text{в}} [\text{м}^3/\text{час}] = 870 - 1076 (T_{з, \text{срм}} - T_{\text{с}}) / (T_0 - T_{\text{с}}) + 6,65 (V - 1)\delta + 0,164 G_{\text{н}},$$

где $G_{\text{в}}$, $G_{\text{н}}$ — расходы воды соответственно на верхние и нижние охлаждающие устройства, $\text{м}^3/\text{час}$;

T_0 , $T_{з, \text{срм}}$ и $T_{\text{с}}$ — соответственно температуры начала охлаждения раската, заданная среднemasсовая конечная и охлаждающей воды, $^{\circ}\text{C}$;

V — скорость перемещения раската в установке, $\text{м}/\text{с}$;

δ — толщина охлаждаемого раската, мм .

Указанная модель позволяет по заданной $T_{з, \text{срм}}$, технологическим параметрам установки (V , $G_{\text{н}}$) и входным параметрам раската (T_0 , δ , V), рассчитать расход воды на верхние охлаждающие устройства ($G_{\text{в}}$) при принятом постоянном расходе на нижние ($G_{\text{н}}$);

Вторая модель связывает среднemasсовую температуру ($T_{з, \text{срм}}$) и комплекс механических свойств листов конкретного химического состава плавки (%) и определяется по корреляционным моделям типа $\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{\text{т}}$, δ_5 , $KCU = f(T_{з, \text{срм}}, \% \text{C}, \% \text{Mn}, \% \text{Si}, \dots, V_{\text{охл}})$, которые определяются при многофакторном анализе промышленной базы данных опытных плавков каждой стали.

Многофакторные модели были получены при анализе ДТУ листов из сталей Ст3сп, 09–12Г2С и 10–15ХСНД. Коэффициенты множественной корреляции при этом составили 0,675 – 0,875, что может обеспечить с достаточной вероятностью требуемый выход годного по механическим свойствам [14].

Третья модель – плоскостность достигается, как сказано выше, асимметричным охлаждением раскатов [10] при использовании плоскоструйных устройств и соотношении расходов воды на верхней и нижней стороне листа $G_{\text{н}}/G_{\text{в}}$, равным соответственно от 1/1,5 до 1/2,0.

Использование приведенных моделей в системе управления установкой УОВТ позволяет обеспечить требуемый уровень механических свойств при производстве термически упрочненного листового проката по ГОСТ 14637, 27772, и разработанным ТУ У 14–4–405, ТУ У ДП 14–4–421 и технологическую плоскостность раскатов на выходе из установки УОВТ, которая соответствует требованиям их удовлетворительной транспортировки по технологическому потоку.

В связи с созданием промышленной УОВТ на стане 3600 стало возможным осуществление следующих энергосберегающих технологий, при которых используется тепло прокатного нагрева:

- нормализация с горячего посада листов по ГОСТ 5521, 6713 и др. с предварительным охлаждением их до 600–650°C на УОВТ после прокатки для обеспечения оптимальных условий перекристаллизации металла, что принесло комбинату экономический эффект около 100 тыс.руб/год;

- РУО листов после прокатки от штатных (выше A_{c3}) температур при одинарной и двойной обработке для обеспечения требований ДТУ проката по ГОСТ 19282, 27772, ТУ У 14–4–405 и ТУ У ДП 14–4–421. Экономическая эффективность производства этого вида проката составляла в то время около 4 руб./т за счет использования тепла прокатного нагрева.

При замене некоторых низколегированных сталей (09Г2С и др.) ДТУ низкоуглеродистыми типа СтЗсп (ГОСТ 380) экономия марганца составляла до 10–12 кг/т, а экономия других легирующих при ДТУ становится возможной при оптимизация химического состава сложнолегированных сталей с учетом заданного уровня прочности;

- РУО листового проката толщиной более 20мм, дифференцированного по группам прочности, по ТУ 14– 3083– 83, объем производства которого составил на «МК «Азовсталь» только в 1985 г. более 107 тыс.т , принесло около 10,7–2,14 тыс.т экономии металла в народном хозяйстве;

- РУО листов из карбонитридных сталей для труб нефтегазопроводов классов прочности К46–К50, К56–К60, Х65–Х70 позволяет повысить стабильность свойств стали после НКП.

В целом установлено, что ДТУ путем РУО после штатных режимов деформации и температур (выше A_{c3}) конца прокатки обеспечивает промежуточные значения (между нормализацией и улучшением) прочностных свойств в листах толщиной до 40 мм из сталей Ф – П класса ($\sigma_T = 325 - 425 \text{ Н/мм}^2$), при требуемом уровне ударной вязкости и пластичности за счет подавления процессов рекристаллизации, измельчения структуры, снижения доли структурно–свободного феррита и образования до 10–15% псевдозвектоида. Дополнительное регламентирование температуры конца прокатки по сравнению с обычной технологией в сторону ее уменьшения (не ниже A_{c3}) позволяет при РУО повысить стабильность и однородность свойств проката, в том числе из малолегированных сталей с карбонитридным упрочнением для труб газонефте-

проводов.

Уровень отечественных разработок в области ДТУ толстолистого проката можно оценить при совместном анализе технических характеристик сходных технологий ДТУ и оборудования с некоторыми зарубежными, ориентируясь на конечный результат термообработки, т.е. достигаемый уровень механических свойств проката, аналогичного типоразмера и химического состава (табл.1, 2).

Таблица 1. Сравнительные технические характеристики установок ДТУ, для обработки листового проката «МК «Азовсталь» [7,11] и OLAC фирмы «Ниппон кокан», (Япония) в г.Фукуяма [15]

Техническая характеристика установок	«МК «Азовсталь», стан 3600, УОВТ	«Ниппон кокан», стан 5000, OLAC
Тип	без зажатия листов	без зажатия листов
Способ охлаждения	плоскоструйный	ламинарно–спрейерный
Количество секций, шт.	пять	шесть
Габаритные размеры, м: длина	30,0	38,0
ширина	4,5	4,75
Давление воды, МПа	0,05	0,05/0,6
Расход воды: общий м ³ /ч	3600	7200
удельный м ³ /ч/м ²	40	40
Сортамент листов: толщина, мм	10–40	10–40
ширина, мм	2000–3200	2000–4500
длина, м	30	38
Температура листов, °С:		
начала охлаждения	820–920	820–980
конца охлаждения	до 500	до 500
Скорость перемещения, м/с	0,3–3,5	0,3–4,0
Скорость охлаждения, °С/с	30–7	15–5

Таблица 2. Результаты ДТУ, полученные при обработке листового проката на установках «МК «Азовсталь» [7,11] и OLAC фирмы «Ниппон кокан», (Япония) в г.Фукуяма [15]

Процесс	Тип стали	Толщ., мм	Химический состав, %					Механические свойства			
			C	Mn	Si	S	P	σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_5 , %	KCV, Дж/см ²
ДТУ, Украина	Ст3сп	12–30	0,15–0,21	0,55–0,80	0,26–0,33	0,014–0,057	0,014–0,040	335–400	500–560	20–28	0,40–0,75
OLAC, Япония	HT50	12–25	0,11–0,16	0,63–1,80	0,16–0,20	0,004–0,012	0,020–0,022	359–388	514–521	23–26	0,39–0,70

Из приведенных сравнительных данных видно, что технические характеристики оборудования и уровень механических свойств листов, произведенных по отечественной и зарубежной технологиям ДТУ, являются

аналогичными. Учитывая также длительный (более 20 лет) срок эксплуатации установки УОВТ в потоке стана 3600, ее можно рассматривать как типовое оборудование для РУО в незажатом состоянии толстолистового проката на реверсивных станах.

2. Штрипсовый прокат для сварных труб газонефтепроводов.

Особое место в настоящее время занимают технологии, связанные с производством толстых листов, предназначенных для изготовления сварных труб большого диаметра для нефтегазопроводов, ведущая роль среди которых принадлежит низкотемпературной контролируемой прокатке (НКП) [2,3]. Оценивая роль НКП листов, осуществляемой в различных температурных интервалах от $A_{с3}$ до $A_{с1}$ при которой регламентируют также режимы деформации (более 60–70% обжатия в последних проходах), следует отметить, что ее целесообразно применять для малопрелитных сталей (не более 0,1% С) с карбонитридным упрочнением, содержащих Nb, V, Mo, что придает им повышенную стойкость против рекристаллизации и разупрочнения после сварки.

В мировой практике указанные стали и технология НКП в том числе с РУО применяются для изготовления труб большого диаметра с толщиной стенки до 18 мм классов прочности K52 – K56 и X65 – X70 для газопроводов, работающих под давлением до 7,5 МПа [2,16]. В связи с одинаковым эффектом измельчения зерна, достигаемым по сравнению с нормализацией, технологию НКП в том числе с применением РУО называют «нормализующей прокаткой», что соответствует первоначальной цели ее применения [17].

Нами было показано, что применение РУО для штрипсовых сталей с карбонитридным упрочнением для газопроводов после штатной прокатки, как технологии альтернативной НКП, допустимо, поскольку при этом может быть обеспечен идентичный уровень свойств [18]. Представляло интерес применить разработанную технологию ДТУ [7,11] для производства листов и труб газопроводов класса K46–K50 с рабочим давлением до 7,0 МПа из низкоуглеродистых сталей, не содержащих дорогостоящих добавок Nb и V, для которых применение НКП нецелесообразно из-за повышенной склонности к рекристаллизации и низкой устойчивости ау-стенита.

В условиях стана 3600 опробована технология ДТУ толстых листов из стали СтЗсп от штатных температур конца прокатки (при ограничении ее верхних пределов ($A_{с3}+50-70^{\circ}\text{C}$) для производства листов для труб газопроводов класса K46–K50. Проведены масштабные исследования опытно-промышленных партий проката и труб газопроводов, изготовленных на ХГТЗ по разработанным ТУ 14–15–261–91) [19]. Исследование служебных свойств включая полигонные испытания сварных труб размером 720x10 мм из термупрочненной стали СтЗсп (С345Т по ТУ У 14–4–405–

97), выполненные ГП «НИТИ» и ВНИИСТ (г.Москва), показали требуемый уровень качества термоупрочненного листового проката и труб производства ОАО «МК «Азовсталь» и ХГТЗ. Впервые в отечественной практике трубосварочного производства ВНИИСТ рекомендовал применение низкоуглеродистой (СтЗсп) термоупрочненной стали С345Т (ТУ У 14–4–405–97) для изготовления труб нефтегазового сортамента категории прочности К46–К50 с рабочим давлением до 7,0 МПа обычного исполнения (температура строительства минус 40⁰С, эксплуатации – 0⁰С).

В настоящее время в ИЧМ НАНУ продолжают работы по развитию совмещенного процесса КП и РУО листов применительно к сталям типа 09–10Г2ФБ для нефтегазопроводов категорий прочности К56–К60, Х65–Х70 на давление 7,5 МПа, разрабатываются многофакторные модели типа «химия–технология–свойства», позволяющие корректировать режимы НКП и ДТУ сталей в зависимости от химического состава плавки для получения заданного уровня свойств [20]. Рассматривая дальнейшие перспективы развития технологии ДТУ в этой области, следует отметить, что обеспечить требуемый комплекс свойств листов для труб категорий прочности Х70–Х80 на давление более 7,5 МПа без применения РУО становится проблематично, поскольку с увеличением толщины листов более 20 мм эффективность НКП снижается [16,17].

Применение совмещенных технологий (КП и РУО) позволяет кроме расширения сортамента листов более 20 мм повысить производительность стана и снизить нагрузки в чистовой клети за счет некоторого увеличения температуры КП [20]. Эти факторы явились за рубежом основной причиной развития совмещенных технологий КП и РУО листов для труб газопроводов с толщиной стенки до 25 мм и толчком для создания установок для РУО в потоке станов, в том числе, для производства бейнитных сталей с $\sigma_T = 650 - 700 \text{ Н/мм}^2$. В настоящее время большинство ведущих производителей листа для труб нефтегазопроводов в Японии, Германии и др. странах пришли к мнению о том, что целесообразно как использование отдельно стоящих установок для РУО листов после КП [2], так и их применение совместно с РЗМ нового типа [2,15,17], что совпадает с нашими предложениями по модернизации стана 3600 (см. выше), направленными Укрگیпромезу еще в 1983 г.

Рассматривая этапы развития технологий ДТУ толстых листов можно сделать вывод о том, что процессы КП и РУО необходимо рассматривать как взаимодополняющие, совместное применение которых необходимо прежде всего для производства листов ответственного назначения (нефтегазопроводы, судостроение) толщиной более 20 мм с прочностью $\sigma_b \geq 600 \text{ Н/мм}^2$ и высокой вязкостью при низких температурах эксплуатации. В остальных случаях производства конструкционных листовых сталей повышенной ($\sigma_T = 325 - 425 \text{ Н/мм}^2$) и высокой ($\sigma_T \geq 450 \text{ Н/мм}^2$) прочности общего назначения технология ДТУ способом РУО после штатных темпера-

тур конца прокатки (выше $A_{с3}$) или повышенных температур КП, разработанная в ИЧМ НАНУ в 90-е годы, является эффективной альтернативой по отношению к классической технологии НКП, предназначенной для малоуглеродистых сталей с карбонитридным упрочнением.

3. Широкополосный прокат общего назначения.

Эффективность использования ДТУ листового проката из рядовых низкоуглеродистых и низколегированных сталей у потребителей возможна при условии его производства в полном сортаменте по толщине, преимущественно от 4-х до 30 мм, что возможно при организации технологий ДТУ в условиях не только реверсивных но и непрерывных широкополосных станов (НШС). В отношении ДТУ конструкционного листового проката, производимого на НШС, где уже по проекту предусмотрены системы охлаждения ламинарно-струевого типа, первоочередной задачей является достижение комплекса свойств полос толщиной более 8–10 мм включительно, не ниже их уровня в аналогичном прокате, производимом на реверсивных станах. Проблема заключается в том, что на отечественных НШС существующие технологии и оборудование для ускоренного охлаждения «толстых» (5–10 мм) полос после прокатки перед смоткой в рулон не позволяют обеспечить завершение превращения аустенита при низких температурах (550–650⁰С). Это приводит к образованию полосчатости, укрупнению зерна, выделению грубого цементита – факторов, снижающих прежде всего вязкость и хладостойкость стали, что ограничивает области и эффективность применения конструкционного проката, производимого на НШС в отличие от реверсивных станов.

Улучшить эти показатели на НШС возможно при корректировке химсостава сталей (в марочных пределах), использовании нестандартных температурных режимов прокатки «толстых» полос и разработке новых, более эффективных устройств для охлаждения металла перед смоткой с капитальном переустройством систем водоснабжения. На первом этапе, применительно к полосовой стали Ст3сп толщиной 8 мм, выплавляемой на «МК им. Ильича», при высокой (920–970⁰С) температуре конца прокатки на НШС 1700 и смотки (730–870⁰С), корректировали химсостав, однако, повышение содержания марганца и алюминия, например, в пределах марки стали не улучшило показателей ударной вязкости горячекатаных «толстых» полос. На втором этапе, прокатку в чистовой группе клетей стана проводили при пониженной (до 830–850⁰С) температуре, которая достигалась за счет снижения толщины подката и уменьшения скорости прокатки (с 6 до 3 м/с). Последнее мероприятие в сочетании с применением ламинарно-струевой системы охлаждения позволило снизить температуру полос перед смоткой в рулон с 730–870⁰С до 630–680⁰С и обеспечить требуемый уровень ударной вязкости ($KCU^{20} \geq 0,8 \text{ Мдж/м}^2$ и $KCU^{-20} \geq 0,4 \text{ Мдж/м}^2$), который невозможно было достигнуть при штатных режимах прокатки и охлаждения и корректировке химсостава в марочных

пределах [21].

По абсолютным значениям прочностных и пластических свойств прокат удовлетворял требованиям, предъявляемым к ДТУ стали классов прочности С285Т–С315Т, например, по ТУ 14–4–405–97. Следует отметить, что коэффициент упрочнения ($\sigma_{\text{т дту}}/\sigma_{\text{т гк}}$), достигаемый при этой технологии является минимальным (1,05–1,1) при температуре смотки $T_{\text{см.}} = 680\text{--}700^{\circ}\text{C}$ и максимальным (1,15–1,25) при $T_{\text{см.}} = 600\text{--}630^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает коэффициент использования металла 0,1–0,2. Этот опыт, при котором были использованы элементы НКП и РУО в условии НШС, показал эффективность применения совмещенных технологий, однако производительность стана при этом снижается за счет уменьшения скорости прокатки в два раза, что недопустимо при массовом производстве ДТУ проката.

Альтернативным путем является совершенствование процесса ДТУ и систем РУО полос на отводящем рольганге стана, направленное на повышение скорости охлаждения полос, толщиной более 5 мм. В связи с этим, за последней чистовой клетью стана 1700 «МК им. Ильича» нами был опробован способ высокоактивного охлаждения полос турбулентными потоками охладителя в устройстве камерного типа (УКТ) [5,6], при котором интенсивность теплосъема возрастает в 4–5 раз в сравнении с существующей на стане ламинарно–струевой системой. При охлаждении указанным способом полосы, толщиной 8 мм от штатной температуры 920°C со скоростью до $200^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температура самоотпуска (смотки) составляла $550\text{--}650^{\circ}\text{C}$, а комплекс механических свойств соответствовал требованиям, предъявляемым к сталям класса прочности С285–С315. Таким образом, ДТУ полосовой стали, например, типа Ст3сп при повышенных скоростях охлаждения и штатных скоростях прокатки позволяет без снижения производительности стана получить комплекс свойств идентичный низко-температурным ($830\text{--}850^{\circ}\text{C}$) режимам прокатки, но с низкой (до $30^{\circ}\text{C}/\text{с}$) скоростью охлаждения.

Указанный камерный способ охлаждения листового проката и оборудование для его реализации на НШС были рекомендованы в качестве узла интенсивного охлаждения «толстых» полос в сочетании с ламинарно–струевыми системами и для межклетьевого охлаждения полос в чистовой группе НШС 2000 Новолипецкого металлургического завода. Применение указанных УКТ на отечественных НШС 1700 и 1680 возможно при капитальной реконструкции систем оборотного цикла охлаждающей воды при максимальном объеме ее использования до $6000\text{ м}^3/\text{ч}$ при удельных расходах до $100\text{--}150\text{ м}^3/\text{час}/\text{м}^2$, что в 2–2,5 раза превышает существующие объемы. Учитывая, что сооружение таких дополнительных мощностей связано с большими капитальными затратами, в условиях отечественных НШС актуально в настоящее время совершенствование существующих систем охлаждения с точки зрения повышения эффективности теплоотбо-

ра при термообработке.

Анализируя тенденции развития техники охлаждения полос на отводящем рольганге НШС можно заметить, что в последние годы наметился переход от применения ламинарно–струевых систем охлаждения к плоскоструйному охлаждению типа «водяная завеса», в которых, как было установлено фирмой «Дэви Маки», теплосъем на 20% выше, чем в ламинарной системе [2]. Как показано выше, ИЧМ НАН У в 80–е годы был разработан и в условиях толстолистового реверсивного стана 3600 внедрен способ охлаждения подобного типа в установке УОВТ с использованием безнапорных БНВ и напорных НВ ванн, соответственно для плоскоструйного охлаждения верхней и нижней поверхности листов при относительно небольших удельных расходах ($30\text{--}40\text{ м}^3/\text{ч}/\text{м}^2$) охладителя [7–9]. Анализ работы указанной системы в течение длительной эксплуатации показал возможность ее использования также и для охлаждения полос в условиях НШС вместо ламинарных и высокорасходных щелевых баков различного конструктивного исполнения. Оценку эффективности применения систем плоскоструйного охлаждения проводили на модернизированных установках ускоренного охлаждения полос со встроенными БНВ и НВ на станах 1700 МК «Им. Ильича» и 1680 МК «Запорожсталь» [22–24]. Установлена высокая охлаждающая способность и эксплуатационная надежность установок УОВТ в потоке НШС, что позволяет обеспечивать требуемую технологическими инструкциями температуру скотки и режимы ДТУ полос при коэффициенте упрочнения низкоуглеродистой стали $\sigma_{\tau\text{ дту}}/\sigma_{\tau\text{ гк}} = 1,1\text{--}1,2$. Разработанные ИЧМ НАНУ экономичные устройства плоскоструйного охлаждения ванного типа с удельным расходом охладителя до $40\text{--}50\text{ м}^3/\text{м}^2/\text{час}$ позволяют развернуть производство ДТУ широкополосной низкоуглеродистой стали толщиной 4–8 мм классов прочности С285Т – С315Т по ТУ У 14–4–405–97 и низколегированных по ГОСТ 18281 ($\sigma_{\tau} \geq 390\text{Н}/\text{мм}^2$) и др. без капитальных затрат на реконструкцию. Устройства внедрены на станах 1700 МК «им. Ильича», 1680 МК «Запорожсталь» [25], 2800/1700 ЧерМК [26] и опробованы на полосовом стане 1200 ДМК, что позволяет рекомендовать их применение при модернизации существующих установок охлаждения полос. Таким образом, выполненный в ИЧМ НАНУ, совместно с меткомбинатами, научными и проектными институтами отраслей потребления комплекс разработок и исследований, позволил осуществить массовое производство на реверсивных станах толстолистового (10–30 мм) проката повышенной ($\sigma_{\tau} = 285\text{--}345\text{ Н}/\text{мм}^2$) и высокой ($\sigma_{\tau} \geq 390\text{Н}/\text{мм}^2$) прочности соответственно на базе существующих низкоуглеродистых и низколегированных сталей по энергосберегающей технологии ДТУ, т.е. с использованием тепла прокатного нагрева.

Впервые в отечественной практике трубосварочного производства рекомендовано применение низкоуглеродистой (СтЗсп) термоупрочненной

толстолистовой стали С345Т (ТУ У 14–4–405–97) без использования ванадия и ниобия для изготовления нефтегазопроводных труб категории прочности К46–К50 на рабочее давление до 7,0 МПа обычного исполнения (температура строительства минус 40⁰С, эксплуатации – 0⁰С). Для труб газопроводов категорий прочности К56–К60, Х65–Х70 из малолегированных сталей, содержащих V, Nb и Mo разрабатывается технология ДТУ при повышенных температурах контролируемой прокатки с применением РУО и моделей управления технологическими параметрами.

Заключение. Новые технологии ДТУ толстолистового проката (толщиной 10–30 мм) позволяют за счет использования тепла прокатного нагрева, оптимизации химического состава сталей, повышения температуры контролируемой прокатки сократить энергозатраты в размере 640–1300 МДж/т, экономить марганец (10–12 кг/т) и другие легирующие, улучшить условия эксплуатации прокатного оборудования на реверсивных станах. ДТУ листового проката толщиной 4–8 мм, возможно на отечественных НШС по температурным режимам КП с ускоренным охлаждением, что обеспечивает комплекс механических свойств низкоуглеродистой стали класса прочности С285 – С315 при высоких показателях относительного удлинения ($\delta \geq 20\%$) и ударной вязкости ($KCV^{20} \geq 0,7$ МДж/м²). Этот процесс лимитируется снижением производительности стана, поэтому альтернативным способом является технология ДТУ с применением высокоактивных систем охлаждения камерного типа, взамен ламинарно-струевых. В условиях дефицита охлаждающей воды на отечественных НШС целесообразна модернизация существующих ламинарно-струевых систем с заменой их на плоскоструйные при удельном расходе охлаждающей воды не более 40–50 м³/ч/м², что позволяет производить ДТУ прокат класса прочности С285Т–С315Т без существенных капитальных затрат. Указанные системы созданы и внедрены на станах 1700 МК «им. Ильича», 1680 МК «Запорожсталь», 2800/1700 ЧерМК и опробованы на полосовом стане 1200 ДМК. Учитывая постоянный рост цен на энергоносители и сырье, роль технологии ДТУ, как эффективного и экономичного способа производства листового проката высокой прочности, будет возрастать.

- 1 *Термическое упрочнение проката / К.Ф.Стародубов, И.Г.Узлов, В.Я.Савенков и др. – М.: Металлургия, 1970. – 368с.*
- 2 *Елесина О.П. Состояние и перспективы развития упрочнения толстолистового проката. – М.: Черметинформация, 1986. – Вып.15. – 32 с.*
- 3 *Погоржельский В.И., Литвиненко Д.А., Матросов Ю.И. Контролируемая прокатка. – М.: Металлургия, 1979. – 183с.*
- 4 *Интенсификация производства листовой стали / Ф.Е.Долженков, В.Г.Носов и др. – Киев.: Техника, 1990. – 102 с.*
- 5 *Охлаждение толстых листов в камерном устройстве / В.Я.Савенков, А.Г.Путилин, В.И.Спиваков и др. // Сб. «Термическая обработка металлов», М.: Ме-*

- таллургия, 1976. – № 5. – С.6–9.
- 6 *Термическое* упрочнение толстых листов / К.Ф.Стародубов, В.И.Спиваков, М.А.Столпаков и др. // Сб. «Термическая обработка металлов».– М.: Металлургия, 1972.– Вып. 1. – С.141–142.
 - 7 *Освоение* регулируемого охлаждения при термической обработке листов с прокатного нагрева / В.И.Спиваков, В.Я.Савенков, М.С.Бабицкий и др. // Сталь.– 1983.– № 12. – С.39.
 - 8 *А.с. СССР 558055* / В.И.Спиваков, В.Я.Савенков, И.Г. Узлов и др. // Открытия. Изобретения. – 1977. – № 18. – 67 с.
 - 9 *А.с. СССР 889172*/ В.И.Спиваков, В.Я.Савенков, А.Е.Руднев и др. // Открытия. Изобретения. – 1981. – № 46. – С.54.
 - 10 *Спиваков В.И.* Регулирование плоскостности толстолистового проката при деформационно–термическом упрочнении. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. ИЧМ НАНУ. – Киев: Наукова думка, 1999.– Выпуск 2. – С.74–77.
 - 11 *Термическое* упрочнение толстолистовой углеродистой стали до уровня свойств низколегированной / В.И.Спиваков, А.А.Булянда, Э.А.Орлов и др. // Сталь.– 1991. – № 1. – С.64–69.
 - 12 *Свойства* термически упрочненного с прокатного нагрева толстолистового проката из сталей ВСтЗсп и 09Г2С / В.И. Труфяков, А.В. Бабаев, М.Н. Чаленко и др. // Сб. «Производство и свойства термически обработанного проката», М.: Металлургия, 1988. – С.72–74.
 - 13 *Рекомендации* по применению в строительных и машиностроительных конструкциях термически упрочненного листового и фасонного проката низкоуглеродистой стали марки ВСтЗ.– Киев.: Наукова думка, 1989.– 16 с.
 - 14 *Спиваков В.И.* Управление деформационно–термическим упрочнением толстых листов. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1988. – №3. – С.43–45.
 - 15 *Разработка* средств ускоренного охлаждения для толстолистовой стали / К.Аримата, К.Хирабе, Ю.Хачи и др. // Исследования по применению средств охлаждения (OLAC) – II // «Transactions of ISIJ».– 1982.– V22. – № 6. – P.180–183.
 - 16 *Морозов Ю.Д.* Тенденции развития сталей для газопроводных труб большого диаметра. // Сб. докладов международной научно–техн. конференции «Азов–сталь –2002». – М.: Металлургиздат, 2004.– 28с.
 - 17 *Degenkolbe J., Schriever U.* Влияние процесса прокатки и способа охлаждения на структуру толстых листов. Walzverfahren und Kuhlmathode beeinflussen die Gefugeausbild – und bei der Grobblechherstellung // Maschinenmark. –1988.– №44.– С.66–71.
 - 18 *Влияние* упрочняющей термической обработки с прокатного нагрева на свойства листов малоперлитных сталей / В.И.Спиваков, В.Я.Савенков, А.Н.Заннес и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. –1979. – №4. – С.19. –21.
 - 19 *Исследование* качества стальных труб большого диаметра из углеродистой стали СтЗсп (С345Т), подвергнутой деформационно–термическому упрочнению / В.К.Коломенский, И.П.Можаренко, Л.М.Шифрин и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1997. – № 1. – С.42–44.
 - 20 *Влияние* химического состава и температуры контролируемой прокатки на

- комплекс свойств трубной стали / В.И.Спиваков, Э.А.Орлов, И.В.Ганошенко и др. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. ИЧМ НАНУ. – Киев: Наукова думка, 2005. – Вып.10.– С.180–186.
- 21 *Исследование* влияния технологических факторов производства листов из рулонной стали / К.Ф.Стародубов, Я.А.Шнееров, В.И.Горбатов и др. // Сб. «Листопрокатное производство». – М.: Металлургия, 1975. – № 4. – С.20–23.
- 22 *А.с. СССР 1770393* / В.Я. Савенков, С.И. Нагний, В.И.Спиваков и др. // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 39.– 82с.
- 23 *Патент* Украины В21В45/02 № 59767А / В.И.Спиваков, П.Л.Литвиненко, А.Ю.Путноки и др. // Оpubл. 15.09.2003г. – Бюл.№ 9.
- 24 *Патент* Украины С21Д № 62242А / В.И.Спиваков, П.Л.Литвиненко, А.Ю.Путноки и др. // Оpubл. 15.12.2003 г. – Бюл.№ 12.
- 25 *Опыт работы* и перспективы развития системы ускоренного охлаждения широкополосного проката на НТЛС–1680 / А.Ю.Путноки, П.Л.Литвиненко, В.А.Яценко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. –№ 5.– С.13–17.
- 26 *Исследование* эффективности новых устройств для охлаждения полос и рулонов на стане 1700 / В.В.Костяков, С.А.Воробей, А.А.Меденков и др. // Сталь.– 1993.– № 5.– С.48–52.

*Статья рекомендована к печати:
ответственный редактор
раздела «Термомеханическая обработка проката»
докт.техн.наук, проф. И.Г.Узлов
рецензент канд.техн.наук М.Ф.Евсюков*

В.І.Співаков, Е.О.Орлов, П.Л.Литвиненко

Шляхи розвитку деформаційно–термічного зміцнення товстолистового і широкосмугового прокату

Метою роботи є виявлення перспективних шляхів розвитку виробництва товстолистового та широкосмугового прокату. Наведено аналіз робіт, виконаних в ІЧМ НАНУ ім.З.І.Некрасова по проблемі деформаційно–термічного зміцнення (ДТУ) товстолистового та широкосмугового прокату конструкційного призначення. Показано, що досягнуті технічні рішення відповідають світовим аналогам і дають змогу одержати економічний і конкурентоздатний листовий прокат підвищеної міцності.