

В. И. Спиваков*, **Э. А. Орлов***, **И. В. Ганошенко****

**ИЧМ НАН Украины, **ОАО «МК «Азовсталь»,*

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ ЛИСТОВ С УСКОРЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ НА РЕВЕРСИВНОМ СТАНЕ

Рассмотрены различные схемы контролируемой прокатки толстых листов (КП) из малоперлитных сталей на реверсивных станах Украины, включая ускоренное охлаждение после деформации со скоростями 10–30⁰С/сек. Показано преимущество в условиях стана 3600 «МК «Азовсталь» применение схемы высокотемпературной КП (730–800⁰С). листов с последующим ускоренным охлаждением, что повышает темп прокатки до 20% в сравнении с низкотемпературной КП (690–740⁰С).

Контролируемая прокатка (КП) толстых листов является частным случаем процесса ТМО преимущественно малоперлитных сталей, содержащих карбо- и нитридообразующие элементы, ее проводят взамен нормализации или улучшения прежде всего для получения мелкого ферритного зерна, что повышает показатели как прочности, так и вязкости стали.

Существующая на реверсивных станах Украины технология низкотемпературной КП позволяет производить листовой прокат из непрерывнолитых слябов для изготовления труб классов прочности К–56 – К–60 диаметром 1220–1420 мм из низколегированных сталей типа 09Г2ФБ, 10Г2ФБ, 10Г2БТ и др., удовлетворяющих требованиям хладостойкости при строительстве и эксплуатации газопроводов в районах Крайнего Севера [1, 2].

Основной принцип КП заключается в применении более низкой температуры и более высокой степени обжатий в последних проходах, чем при рядовой горячей прокатке, с учетом того, что деформация, как способ повышения комплекса механических и эксплуатационных свойств стали:

- не эффективна при высоких температурах, т.к. рекристаллизация и рост зерна аустенита протекают между проходами весьма быстро;
- более эффективна при средних температурах, т.к. после рекристаллизации (частичной или полной) замедляет рост зерна аустенита;
- наиболее эффективна при низких температурах, т.к. зерна аустенита не рекристаллизуются между проходами, подвергаются наклепу благодаря чему из них образуются мелкие зерна феррита.

Технология трехстадийной КП, проводимая последовательно в указанных высоких, средних и низких температурах в отличие от рядовой одностадийной горячей прокатки при высоких температурах, включает корректировку температурно–деформационных параметров прокатки с целью получения повышенного уровня прочностных и вязких свойств в листах из низколегированных сталей.

Указанная корректировка, в основном, сводится к снижению температуры нагрева слябов, понижению температуры и повышению обжатий при деформации в чистовой клети [1, 2].

Снижение $T_{кп}$ на каждые 10°C приводит к увеличению прочности на 10–15 Н/мм² малоперлитных ниобиевых сталей, что означает уменьшение расхода Nb или V на 0,01–0,02% [1].

Основным условием при котором проявляется эффект КП, как способ измельчения зерна аустенита путем рекристаллизации, является необходимость завершения деформации в чистовой клети стана при температуре выше $A_{г3}$, причем часть суммарной деформации должна происходить в нижней аустенитной области и в межкритическом интервале температур.

Однако, при обжатиях в межкритическом интервале температур хотя и повышаются прочностные характеристики, показатели пластичности и вязкости снижаются, что может быть частично компенсировано низким содержанием углерода, серы (до 0,005%), вакуумированием и другими мероприятиями, направленными на улучшение качества непрерывнолитого металла.

Соблюдение требуемого низкотемпературного режима КП для получения заданного уровня свойств вызывает определенные затруднения в производственной практике, что связано, прежде всего, с обеспечением заданной производительности стана и безаварийности его работы.

Трудности возникают в связи с тем, что в черновой клети сляб может быть прокатан с высокой скоростью и далее находится в очереди, охлаждаемая до заданной температуры начала прокатки в чистовой клети ($T_n = 750\text{--}700^{\circ}\text{C}$), которая должна работать непрерывно.

При существующей низкотемпературной технологии КП листов из малоперлитных сталей для магистральных трубопроводов охлаждение раскатов до заданной T_n производят, как правило, на воздухе, а число проходов оптимизируется исходя из времени пауз (выдержек) по разработанным температурным моделям.

Такой процесс, реализованный на современных мощных толстолистовых станах 5000 фирмы Mannesman–rohrer (ФРГ), 4200 фирмы Voest – Alpine (Австрия), 4500 фирмы Posko (Ю. Корея) и на стане 3000 МК им. «Ильича» (г. Мариуполь) включает чередование процессов деформации металла и его охлаждения до заданной температуры, т.е. КП с одной выдержкой раскатов для охлаждения на воздухе. Возможен процесс КП с двумя выдержками для охлаждения или с повторным рекристаллизационным нагревом подката [3, 4].

Существующая технология контролируемой прокатки на реверсивном стане 3600 ОАО «МК «Азовсталь» включает нагрев слябов до 1150°C , температуру конца прокатки в чистовой клети при $710\text{--}740^{\circ}\text{C}$ (в зависимости от углеродного эквивалента) при толщине подката 50 мм после черновой клети

и обжатия в чистовой клети 15–18% в каждом проходе и 3 последних по 10% для обеспечения плоскостности.

Такой режим прокатки, с одной стороны вызывают повышенные нагрузки на клеть и привод валков, повышают расход энергии и снижают производительность стана, а с другой – его осуществление ограничивается пластичностью металла, прочностью деталей прокатного стана и мощностью привода.

Рассмотрим возможные схемы КП, в том числе альтернативные, с применением ускоренного охлаждения, в потоке стана 3600 ОАО «МК «Азовсталь» (рис. 1).

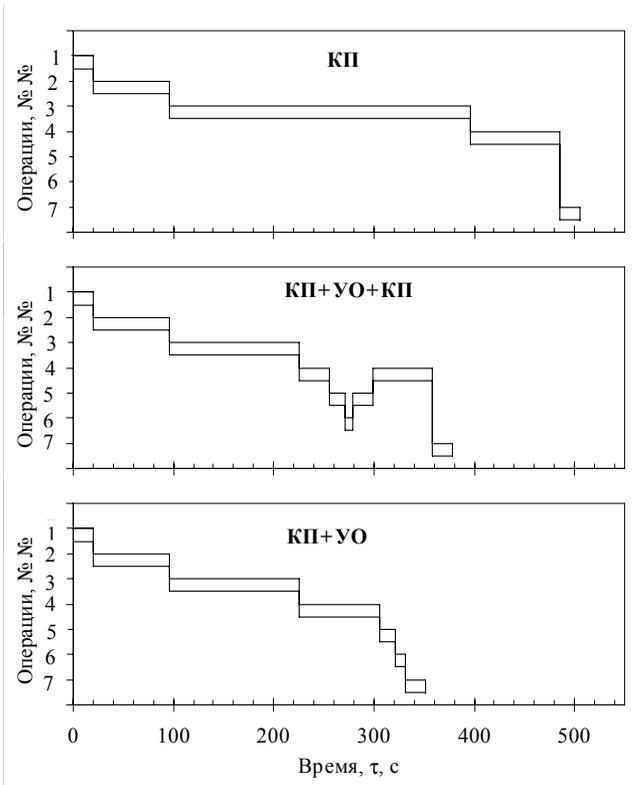


Рис. 1. Порядок и продолжительность технологических операций контролируемой прокатки по различным схемам

1 — транспортировка слэбов от методических печей до черновой клети;

2 — прокатка в черновой клети;

3 — охлаждение подкатов на воздухе перед прокаткой в чистой клети;

4 — прокатка в чистой клети;

5 — транспортировка раскатов к установке УОВТ или обратно к чистой клети;

6 — ускоренное охлаждение раскатов в установке УОВТ;

7 — охлаждение раскатов на воздухе после КП или КПУО.

В условиях стана 3600 процесс рядовой КП (рис. 1а) включает выдержку подкатов на воздухе после черновой прокатки при реверсивном покачивании на промежуточном рольганге. При отработанной технологии низкотемпературной КП листов, толщиной 16–20 мм, длительность охлаждения (выдержки) подката толщиной около 50мм до достижения заданной температуры прокатки на участке между клетями составляет около 300 с, что значительно

превышает обычный темп горячей прокатки [2].

Длительность выдержки подката на воздухе в основном зависит от его толщины а снижение производительности при установившейся технологии низкотемпературной КП достигает 25–33% [1, 2, 3]. Повышение производительности за счет снижения выдержки подкатов при охлаждении их между клетями прямо связано с применением высокотемпературной КП и ускоренного охлаждения подкатов (рис.1б) или готовых листов после прокатки (рис.1в).

При выборе рациональной схемы КПУО, применительно к малоперлитным сталям с Nb (до 0,03%) следует отметить необходимость соблюдения нескольких основных условий:

- температура деформации должна находиться в интервале 1000–850⁰С, поскольку при более высоких температурах деформации ($T_{кп} > 1000^0\text{C}$) измельчение зерна феррита не происходит, хотя структура аустенита и гомогенизируется, препятствуя образованию структуры видманштетта, при ускоренном охлаждении;

- при снижении $T_{кп}$ до 850⁰С зерно феррита измельчается, растет прочность (σ_m, σ_0), T_{xp} снижается.

Таким образом, верхний диапазон температур КПУО может находиться в пределах 850–1050⁰С или при известном химическом составе в интервале температур $A_{c3} + 40\text{--}50^0\text{C}$, а нижний предел определяется принятой схемой КПУО в условиях конкретного стана.

Для выбора рациональной схемы процесса КПУО на реверсивном стане 3600 рассмотрели различные способы достижения требуемой температуры высокотемпературной КП и механических свойств за счет:

- а) снижения температуры нагрева слябов;
- б) охлаждения подката в процессе прокатки в черновой клетю;
- в) охлаждения подката на установке УОВТ после 5–ти проходов в чистой клетю с последующим возвратом для завершающих 3 проходов –(1–я схема КП+УО+КП, рис.1 б);
- г) охлаждения подката перед чистой клетю на воздухе до повышенных температур КП, прокатки за 8 проходов и ускоренного охлаждения раската на установке УОВТ до температуры, необходимой для обеспечения заданного комплекса свойств и плоскостности (2–я схема КП+УО, рис. 1в).

Поскольку существующая технология низкотемпературной КП связана с потерей времени на получение заданной температуры начала прокатки, то одной из главных задач является уменьшение времени выдержки раскатов на воздухе перед их деформацией.

Рассмотрим указанные схемы с этой точки зрения, а также с учетом возможной их реализации на стане 3600.

Снижение температуры нагрева слябов с 1150–1100⁰С до 1050⁰С является необходимым и легко реализуемым мероприятием, позволяющим к тому

же снизить тепловые энергозатраты на нагрев металла.

Охлаждение подката в процессе прокатки в черновой клети и (или) на промежуточном рольганге стана невозможно без создания специализированных охлаждающих средств и является малоэффективным из-за большой толщины и опасности подстуживания угловых и кромочных зон раската.

Охлаждение подката на установке УОВТ до требуемых температур КП после 3–5-ти проходов в чистовой клети с последующим возвратом для завершающих 3 проходов, т.е. 1-я схема КП+УО+КП, технически возможно и может быть рекомендовано для опробования и практической реализации.

Следует отметить, что при этом варианте КПУО нагрузки в клети могут не уменьшиться, но явным преимуществом его является уменьшение длительности выдержки раскатов перед завершающей стадией прокатки.

Охлаждение подката при выдержке на воздухе перед чистовой клетью до температур выше (на 30–50⁰С), чем при существующей низкотемпературной КП, т.е. 2-я схема КП+УО, является также приемлемым, поскольку само повышение температуры КП в чистовой клети предполагает снижение выдержки подката на воздухе для ее достижения. Ориентировочно выдержка на воздухе подката 50 мм уменьшится с 300 с до 150–200 с, снижаются нагрузки в чистовой клети а потеря прочности стали будет компенсирована применением УО.

Оба приемлемых для реализации схемы КПУО необходимо рассмотреть с точки зрения выбора такой из них, при которой выдержка для достижения требуемой температуры начала и конца чистовой прокатки является минимальной.

Возможность повышения этих температур по сравнению с рядовой КП при условии последующего УО (2-я схема КП+УО) будет определять уровень снижения выдержки и повышения производительности стана при КПУО.

Для малоперлитных сталей с карбонитридным упрочнением сортамента стана 3600 (09Г2ФБ, 10Г2ФБ) с учетом углеродного эквивалента верхний предел начала высокотемпературной КП с ускоренным охлаждением (КПУО) может быть предварительно установлен после расчета значений $A_{с3}$ для конкретного состава плавки по известным уравнениям [5].

Нижний предел температуры конца прокатки при КПУО может быть выше на 30–50⁰С принятого диапазона температур низкотемпературной КП [1] сталей типа 09–10Г2ФБ, т.е. составлять 730–800⁰С при последующем УО.

Температура конца принудительного охлаждения раскатов на УОВТ после прокатки должна быть не ниже 500–550⁰С для обеспечения плоскостности раскатов и избежания появления мартенситной фазы, что потребует дополнительного отпуска листов.

Такой режим вызывает повышение σ_T и σ_B на 50 Н/мм² по сравнению с низкотемпературной КП при толщине листа до 20 мм при требуемых показа-

телях пластичности и вязкости металла.

Например, для производства труб диаметром 1420 мм со стенкой 20 мм для магистральных трубопроводов на давление до 100 МПа, работающих в арктических условиях применяют контролируемую прокатку и последующее термическое упрочнение за счет УО от температур выше $A_{г3}$ до 400–500⁰С в системе многоцелевого ускоренного охлаждения раскатов водой (СМУО), подобной установке УОВТ на стане 3600 [6].

Рассмотрим технические возможности реализации предложенных параметров КПУО в условиях станов 3000 МК «им. Ильича» и 3600 «МК «Азов-сталь» (г. Мариуполь) по различным схемам (см. таблицу).

В соответствии с низкотемпературной трехстадийной КП производство трубных сталей с карбонитридным упрочнением осуществляется по следующей технологии.

Прокатка в черновых клетях за 8–10 проходов при температурах 1100–900⁰С, прокатка в чистовой клетки за 6–8 проходов с предварительным подстуживанием подкатов до температур 750–820⁰С за счет транспортировки по шлепперным холодильникам (стан 3000) или при выдержке подкатов на промежуточном рольганге (стан 3600). Темп прокатки при этом на стане 3000 почти в два раза выше чем на 3600 за счет его специализации для производства штрипсов способом контролируемой прокатки.

В отличие от стана 3000 на стане 3600 имеется условия для ускоренного охлаждения раскатов что дает возможность осуществить предлагаемые параметры режимов высокотемпературной КП (КП+УО+КП и КП+УО) (см.таблицу).

При высокотемпературной КП по этим схемам температурно-деформационный режим прокатки в черновой клетки (первая стадия КП) не изменяется а обжатия в чистовой клетки (вторая и третья стадии КП) осуществляются при повышенных температурах в сравнении с рядовой КП.

Схема КП+УО+КП предусматривает промежуточное подстуживание раската на УОВТ с 820–870⁰С до 700–750⁰С после первых 5 проходов и возврат к чистовой клетки. Последние три прохода до заданной толщины осуществляют с относительным обжатием в каждом пропуске до 10% и суммарным обжатием в этих пропусках не менее 30%.

Схема КП+УО предусматривает прокатку в чистовой клетки за 8 проходов при температурах на 30–50⁰С выше чем при рядовой КП с последующим ускоренным охлаждением на УОВТ со скоростью 10–30⁰С/с до 500–550⁰С.

При выборе указанных высокотемпературных схем КПУО 1 и 2 сравнили соответствующие им темпы прокатки листов, который определяет производительность стана (см. рис.1). Анализируя длительность технологических операций указанных схем КП и КПУО заметим, что схема КП+УО является предпочтительной, т.к. длительность прокатки листов в чистовой клетки

меньше на 50с или более чем в 1,5 раза по сравнению с КП+УО+КП и на 150 с, по сравнению с рядовой низкотемпературной КП.

Таблица. Температурно–деформационные параметры контролируемой прокатки на реверсивных станах по различным схемам

Схема прокатки	Т-ра нагрева слэбов	Черновая клеть				Чистовая клеть				Охлаждение после прокатки		Темп прокатки
		$T_{0}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нп}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{кп}}, ^\circ\text{C}$	N	$\Sigma\varepsilon, \%$	$T_{\text{нп}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{кп}}, ^\circ\text{C}$	N	$\Sigma\varepsilon, \%$	$T_{\text{но}}, ^\circ\text{C}$	
КП 3000	1120–1150	1000÷1100	900÷960	8	78,4	750÷800	700÷740	6	67,6	700÷740	воздух	50
КП 3600	1120–1150	1000÷1100	≤ 980	10	81,2	770÷820	690÷740	8	62,8	690÷740	воздух	90
КП+УО+КП	1120–1150	1000÷1100	≤ 980	10	81,2	800÷1050	690÷740	5+3	62,8	820÷870	700÷750	95
КП+УО	1120–1150	1000÷1100	≤ 980	10	81,2	820÷870	730÷800	8	62,8	720÷790	500÷550	75÷80
Рядовая прокатка	1250	1200	1100	5÷6	70÷75	≥1000	≥850	5÷7	75÷80	850÷1000	воздух	40

N – количество проходов; $\Sigma\varepsilon$ – суммарное обжатие.

Накопленный опыт эксплуатации установки УОВТ на стане 3600 позволил на основании многофакторного корреляционно–регрессионного анализа выборки ДТУ листов (300 экспериментов с листами толщиной 10–32мм, около 40 плавок) разработать интегральную теплотехническую модель процесса ускоренного охлаждения на установке [8]:

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

$G_{\text{в}}$, $G_{\text{н}}$ — расходы воды соответственно на верхние и нижние охлаждающие устройства;

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

S — значение шкалы сельсинового команд–аппарата (сельсин);

δ — толщина охлаждаемого раската, мм.

Разработанная модель позволяет по заданным технологическим параметрам установки (S , $T_{\text{с}}$, $G_{\text{н}}$), входным параметрам раската (T_0 , δ) и заданной среднемассовой температуре ($T_{\text{з срм}}$), задаваемой исходя из необходимого комплекса механических свойств охлаждаемого проката, рассчитать расход воды на верхние охлаждающие устройства ($G_{\text{в}}$), обеспечивающий получение $T_{\text{з срм}}$ и оценить технологические возможности установки УОВТ при использовании ее в процессе КПУО (рис.2).

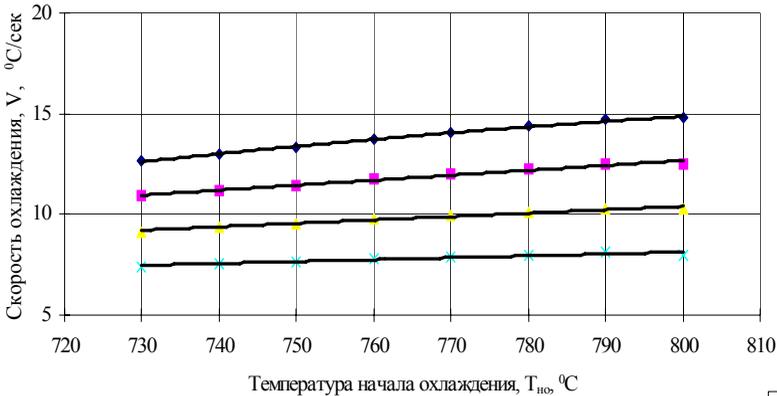


Рис. 2. Зависимость среднемассовой скорости охлаждения на установке УОВТ раскатов толщиной 18,7 мм от температуры T_0 до 500°C при различных расходах воды: Цифрами около кривых указан расход воды на верхние охлаждающие устройства в $\text{м}^3/\text{час}$.

На рис.2 приведены результаты расчета среднемассовой скорости охлаждения листов толщиной 18,7 мм от температур $800 - 730^{\circ}\text{C}$ до 500°C при раз-

личных расходах воды на верхние (G_v) и постоянном расходе на нижние ($G_n = 1500 \text{ м}^3/\text{час}$) охлаждающие устройства. Из приведенных результатов видно, что скорости охлаждения достигаемые на установке УОВТ в температурном интервале процесса КПУО соответствуют сформулированным выше требованиям по скорости и длительности охлаждения.

Проведенный анализ, показал преимущество применения в условиях стана 3600 для листов из малоперлитных сталей схемы высокотемпературной КП (730–800⁰С) с последующим ускоренным охлаждением, что повышает темп прокатки до 20% в сравнении с низкотемпературной КП (690–740⁰С).

1. *Контролируемая прокатка* / В.И. Погоржельский, Д.А. Литвиненко, Ю.И. Матросов и др. // М.: Металлургия, 1979. С. 183.
2. *Погоржельский В.И.* Контролируемая прокатка непрерывнолитого металла. М.: Металлургия, 1986. С. 150.
3. *Елесина О.П.* Состояние и перспективы развития упрочнения толстолистового проката. (Обзор по системе «Информсталь»). М.: Ин-т «Черметинформация», 1986. Вып. 15. С. 32
4. *Влияние* процесса прокатки и способа охлаждения на структуру толстых листов. / J. Degenkolbe, U. Schriever / *Walzverfahren und Kuhlmathode beeinflussen die Gefugeausbild – und bei der Grobblechherstellung.* // *Maschinenmark.* 1988. № 44. С. 66–71.
5. *Структура* конструкционной легированной стали. / Б.Б. Винокур и др. // М.: Металлургия, 1979. С. 183.
6. *Материалы* симпозиума фирмы «Кавасаки сейтэцу», М., 1984, октябрь. (ЭИ трубное и метизное производство, металловедение и термообработка, 1984, вып. 22).
7. *Современные* тенденции использования высокопрочной судостроительной стали. Новые методы производства. / И. Ватанабэ и др. // «Нихон дзосэн гаккайси». «Bull. Soc. Nav. Archit. Jap.». 1983. ¹ 649. P. 374–386.
8. *Разработка* регулируемых в широких пределах параметров термомеханического упрочнения плоского проката, обеспечивающих стабильность свойств стали различных уровней прочности и создание методов программного управления процессом. Отчет о НИР (Заключительный)/ ИЧМ; руководитель В.И. Спиваков. Днепропетровск, 1994. — 76 с.

Статья рекомендована к печати д.т.н. И.Г. Узловым