

УДК 621.771

**В.М. ДАНЬКО**, канд. техн. наук, доцент кафедры, **Е.В. ТУРСКИЙ**, студент  
Донбасский государственный технический университет (ДГГУ), г. Алчевск

**Д.А. БОХАНОВ**, инженер

Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь» (ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков

## ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОКАТКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ

Рассмотрена возможность реализации низкотемпературной прокатки на толстолистовых станах. Исследовано влияние ее параметров на температуру нагрева металла при производстве толстых листов методом математического моделирования с использованием модели теплового баланса прокатки полос. Показана эффективность применения комбинированного процесса низкотемпературной и так называемой сухой прокатки.

**Ключевые слова:** низкотемпературная прокатка, стан 2800, реверсивная клеть, сухая прокатка, энергосбережение, математическое моделирование.

Черная металлургия Украины остается одной из наиболее энергоемких отраслей промышленности. В отсутствие средств на радикальное техническое перевооружение (строительство машин непрерывного литья заготовок, литейно-прокатных агрегатов и т.п.) приходится проводить усовершенствование существующего оборудования и технологий в направлении снижения себестоимости продукции при минимальных капитальных затратах. Одним из таких направлений является уменьшение расхода газа в нагревательных устройствах прокатных цехов за счет снижения температуры нагрева металла под прокатку.

Наиболее радикальным способом реализации данного направления является низкотемпературная прокатка (НТП). Это прокатка с пониженной на 100–400 °С начальной температурой металла. Данная технология давно и успешно применяется на разных станах – непрерывных широкополосных, мелкосортных и проволочных. Например, в Швеции на мелкосортном стане завода Fagerstand AB Osterbyvorken налажена прокатка «квадратов» 10,5×10,5 мм из углеродистой стали при снижении температуры нагрева заготовок с 1150 °С до 750 °С [1]. При этом минимально допустимая температура нагрева заготовок пружинной, подшипниковой, инструментальной и нержавеющей сталей составляет 800–950 °С, а снижение расхода энергии достигает от 85 до 130 кВт·час/т.

Установлено, что НТП улучшает механические свойства проката. Например, на стане 250 ПО «Ижмаш» при прокатке катанки из стали 50Г понижение температуры нагрева заготовок с 1130–1200 °С до 1030–1060 °С приве-

ло при некотором увеличении твердости к значительному улучшению пластичности металла [2]. Последнее объясняется тем, что при снижении температуры нагрева стали устойчивость аустенита уменьшается, что способствует уменьшению размера зерна, а следовательно, повышению вязкости и пластичности прокатанного металла.

На толстолистовых станах (ТЛС) низкотемпературная прокатка не применяется, так как считается, что из-за невысокой средней скорости прокатки, характерной для реверсивных станков, будет происходить интенсивное захлаживание прокатываемого металла, что делает невозможной его выкатку.

При НТП вследствие снижения температур нагрева металла  $t_n$  и начала прокатки  $t_{np}$  значительно уменьшаются потери тепла за счет излучения (согласно закону Стефана-Больцмана они пропорциональны четвертой степени абсолютной температуры). Несколько уменьшаются потери вследствие теплопроводности в валки и теплообмена с водой из систем охлаждения валков. Одновременно увеличивается приход тепла в результате пластической деформации и трения металла о валки, поскольку из-за снижения температуры металла прокатка должна вестись с уменьшением обжатия, т.е. за большее число проходов. Тепло, выделяемое при деформировании, пропорционально работе деформации

$$A_{\text{деф}} = M_{\text{пр}} \cdot \varphi_{\Sigma},$$

где  $M_{\text{пр}}$  – момент прокатки, кН·м;

$\varphi_{\Sigma}$  – суммарный угол поворота валков в проходе, рад.



Поскольку  $M_{пр}$  практически постоянен и равен допустимому моменту для данной клетки, с увеличением числа проходов растет  $\varphi_{\Sigma}$ , что приводит к росту приходной части теплового баланса (причем ее зависимость от количества проходов носит приблизительно пропорциональный характер). В результате можно ожидать такого изменения теплового баланса, которое позволит при фиксированной температуре конца проката  $t_{кп}$  понизить  $t_{н}$  и  $t_{нп}$  и тем самым достигнуть экономии газа при нагреве слябов под прокатку.

Моделировалась прокатка листа  $15 \times 500 \times 6000$  мм из стали 3сп на этих станах (табл. 1).

Исследование влияния параметров НТП на  $t_{н}$  при производстве толстых листов проведено методом математического моделирования с использованием модели теплового баланса прокатки полос, разработанной ДонНИИЧермет [3]. Моделирование велось для условий ТЛС 2250 (вариант 1) и 2800 (вариант 4) ПАО «АМК».

Следует отметить, что первый стан характеризуется низкими энергосиловыми возможностями (допустимое усилие прокатки в черновой и чистовой клетях составляет 10,6 Мн и 33,3 Мн соответственно), поэтому на его примере можно оценить минимальный эффект НТП. Второй стан – более мощный (допустимые усилия – 21,5 Мн и 36,8 Мн), по нему можно судить о целесообразности повышения мощности оборудования для НТП.

Сопоставление результатов расчета параметров температурного режима по существующей высокотемпературной технологии для ТЛС 2250 и ТЛС 2800 с данными, полученными экспериментальным путем, показало их хорошую сходимость. Затем была рассчитана низкотемпературная технология прокатки того же листа. Температуру конца прокатки приняли равной 911–914 °С, поскольку при более низких значениях на ТЛС 2250 чрезмерно увеличивалось число проходов. Расчет вели методом последовательных приближений до получения заданной  $t_{кп}$ . Результаты моделирования приведены в табл. 1 как вариант 2 (для ТЛС 2250) и вариант 5 (для ТЛС 2800). Они показывают, что на стане 2250  $t_{нп}$  снизилась до 1080 °С, т.е. на 114 °С, однако возросло число проходов: в черновой клетке – на пять, а в чистовой – на два. Цикл прокатки вырос на 25 %. На стане 2800  $t_{нп}$  сни-

зилась на 156 °С, при этом число проходов и цикл прокатки остались неизменными.

Был исследован также комбинированный процесс низкотемпературной и сухой прокатки, при которой раскаты изолируются от воды, стекающей из системы охлаждения валков чистовой клетки (такая изоляция в черновой клетке, где раскат еще является термически толстым телом, неэффективна). Результаты этого исследования приведены в табл. 1 как варианты 3 и 6. На стане 2250 благодаря уменьшению потерь тепла в чистовой клетке  $t_{н}$  уменьшилась до 1029 °С, а на стане 2800 – до 1012 °С (т.е. на 165 °С и 188 °С соответственно). На стане 2250 выросло число проходов и в 1,55 раза увеличился цикл прокатки. Таким образом, комбинированная технология позволяет в большей степени снизить температуру нагрева заготовок по сравнению с НТП, причем ее эффективность выше для маломощных станков, имеющих большее число проходов, в т.ч. в чистовой клетке. В то же время НТП эффективнее на более мощных станах, где при ее применении производительность если и уменьшается, то незначительно.

Было также исследовано влияние на температуру нагрева металла при НТП таких факторов, как марка стали листа, его толщина и ширина, разница в циклах прокатки в черновой и чистовой клетках, скорость захвата. Установлено, что влияние последних двух факторов на  $t_{н}$  незначительно. Влияние остальных параметров представлено в табл. 2.

В табл. 2 первые пять вариантов относятся к стану 2250, а остальные – к стану 2800. Расчет прокатки листа толщиной 5 мм на ТЛС 2250 показал, что даже при НТП обеспечить  $t_{кп}$  выше температуры фазового превращения  $A_{3}$  невозможно, так как для этого сляб нужно нагреть до температуры, превышающей допустимую. Прокатка листа такой толщины возможна только при комбинировании двух методов – низкотемпературной и сухой прокатки (вариант 1). С увеличением толщины листа (варианты 2 и 7) требуемая  $t_{н}$  существенно понижается. Уменьшение ширины раската при НТП приводит к падению  $t_{н}$  (варианты 3 и 8), а увеличение – к ее росту (варианты 4 и 9). Это объясняется тем, что с увеличением ширины раската растут усилие и момент прокатки, а следовательно, и чис-

**Таблица 1 – Результаты моделирования прокатки листа 15 мм**

№ варианта	$t_{н}$ , °С	$t_{нп}$ черн., °С	$t_{кп}$ черн., °С	$t_{нп}$ чист., °С	$t_{кп}$ чист., °С	Число проходов*	Цикл прокатки, сек
1	1194	1180	1109	1090	968	10/7	49,7
2	1080	1070	1013	1002	911	15/9	66,3
3	1029	1020	979	972	914	17/11	77,2
4	1200	1180	1080	1060	973	11/7	34,3
5	1044	1030	979	966	912	11/7	34,3
6	1012	1000	959	946	912	11/7	34,3

\*в числителе – число проходов в черновой клетке, в знаменателе – в чистовой

Таблица 2 – Влияние параметров прокатки на температуры нагрева металла, начала и конца прокатки

№ варианта	Размер листа, мм	Марка стали	$t_n, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{нп}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{кп}}, ^\circ\text{C}$	Число проходов
1	5×1500×7000	Зсп	1244	1220	876	10/5
2	25×1500×7000	Зсп	946	940	877	21/19
3	15×1100×9000	Зсп	–	993	877	17/11
4	15×2000×9000	Зсп	1029	1020	876	18/17
5	15×1500×6000	65Г	771	770	822	27/27
6	8×1500×9000	Зсп	1037	1025	912	13/7
7	25×1500×7000	Зсп	892	885	870	15/11
8	15×1250×7000	Зсп	933	925	870	15/9
9	15×2000×9000	Зсп	940	932	870	13/9
10	15×1500×6000	65Г	772	770	821	15/9

\* в числителе – число проходов в черновой клетке, в знаменателе – в чистовой

ло проходов, поэтому для компенсации возросшей длительности охлаждения необходимо увеличить  $t_n$ .

Сильнее всего на  $t_n$  влияет температура  $A_{\text{з}}$ , зависящая от марки стали (варианты 5 и 10). У стали 65Г эта температура – одна из самых низких (750 °С), поэтому такую сталь можно прокатывать без риска трещинообразования при низких  $t_{\text{нп}}$ , не попадая в зону перекристаллизации. В результате происходит разогрев металла в валках, из-за чего  $t_{\text{кп}}$  не удается сделать ниже  $t_{\text{нп}}$ . Число проходов на стане 2250 вырастает до неприемлемых значений, тогда как на ТЛС 2800 оно остается в пределах допустимого.

Как видно из табл. 2, результаты для ТЛС 2800 качественно повторяют параметры прокатки на ТЛС 2250, однако при этом температуры процесса ниже, а производительность падает значительно меньше.

Аналогичные исследования эффективности энергосберегающих технологий проводились специалистами Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН при помощи комплекса имитационных моделей СУЭТ (Система управления энергосберегающей технологией) [4], адаптированных к листопрокатному комплексу печи – стан Орско-Халиловского металлургического комбината (ОХМК) (ныне – ОАО «Уральская сталь», Российская Федерация). Были рассмотрены два режима нагрева и прокатки металла. Первый режим соответствовал технологическим инструкциями ОХМК (прокатка с фиксированными обжатиями); второй, топливосберегающий, обеспечивал минимальную температуру нагрева металла в печи и, соответственно, минимальный расход топлива и угля металла. В качестве исходных данных и ограничений для СУЭТ были использованы реальные параметры технологического оборудования стана 2800 ОХМК.

Обобщая результаты исследования эффективности разработанных алгоритмов на имитационных моделях СУЭТ, можно сделать вывод о значительно большей эффективности топливосберегающего режима по сравне-

нию с режимом прокатки с фиксированными обжатиями на стане 2800. Для конкретных исходных данных получены следующие результаты:

- температура нагрева слябов в печи может быть снижена более чем на 100 °С;
- производительность печей повысилась на 28–35 %;
- расход топлива и угар металла в печи уменьшились соответственно на 14 и 46 %.

## ВЫВОДЫ

Исследование низкотемпературной прокатки на толстолистовых станах показало возможность использования этой технологии. Основной эффект НТП заключается в уменьшении расхода газа на нагрев металла перед прокаткой благодаря снижению допустимой температуры начала прокатки. Еще одним положительным следствием применения НТП является уменьшение окиснообразования из-за сокращения длительности нагрева слябов.

Установлено, что НТП целесообразнее использовать на более мощных ТЛС, таких как 2800 или 3600, поскольку в этом случае производительность падает в меньшей степени.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Lundberg S. E.** Low temperature rolling saves energy in the rolling of wire and bar / S. E. Lundberg // METEC'84 : 2 Int. Walzwerkskongr., Düsseldorf, 22–28 Juni, 1984. Bd. 2. – Düsseldorf, 1984, 52/1–G2/12.
2. Повышение качества проката в условиях деформации при пониженных температурах нагрева / Ю. В. Кузнецов, В. Л. Бровкин, Г. Н. Иванов [и др.] // Сталь. – 1991. – № 11. – С. 65–67.
3. **Гончаров Н. В.** Инженерная методика расчета средне-массовой температуры толстых листов / Н. В. Гончаров,



В. А. Арцыбашев // Повышение эффективности производства толстолистого проката : темат. отраслевой сборник. – М., 1984. – С. 41–44.

4. **Генкин А. Л.** Возможности энергосберегающего управления листопркатным комплексом / А.Л. Генкин,

Розглянуто можливість реалізації низькотемпературної прокатки на товстолистових станах. Досліджено вплив її параметрів на температуру нагрівання металу при виробництві товстих листів методом математичного моделювання з використанням моделі теплового балансу прокатки смуг. Показано ефективність застосування комбінованого процесу низькотемпературної і так званої сухої прокатки.

С. А. Власов, Я. С. Масальский // Автоматизация в промышленности. – 2003. – № 3. – С. 44–47.

*Поступила в редакцию 03.04.2014*

Possibility of use of low-temperature rolling at plate mills was examined. One be investigated impact of its parameters for temperature of metal heating during heavy plate production by mathematic modeling using model of heat balance of strip rolling. One be shown efficiency of application of combined process of low-temperature and so-called dry rolling.