

УДК621.771.01;621.771.23

Руденко Е. А.  
Курдюкова Л. А.  
Тимошенко Н. В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ОСОБО ТОНКИХ ПОЛОС

В настоящее время в Японии, США, Мексике, Испании освоена горячая прокатка полос толщиной 0,8–1 мм, практически не уступающих по точности и механическим свойствам холоднокатаному металлу. Прогнозируемые объемы производства горячекатаных особо тонких полос ежегодно увеличиваются на 8,3 % в США, 6,7 % в ЕС и 6,6 % в Японии [1].

Замена холоднокатаных листов на горячекатаные, себестоимость которых ниже, как минимум, на 20 долларов США на тонне проката, а также тенденция роста цен на холоднокатаный лист обуславливают целесообразность освоения производства особо тонкого горячекатаного листа в Украине. В настоящее время освоено производство горячекатаных полос толщиной 1,5 мм на стане 1700 ОАО «МарМК» им. Ильича и 1680 меткомбината «Запорожсталь». Условия прокатки особо тонкой горячекатаной полосы 1,5 мм на стане 1680 характеризуются низкой температурой конца прокатки (770–810 °С), не обеспечивающей требуемые механические свойства горячекатаных полос [2, 3]. Технические и технологические возможности получения на этих станах полос толщиной менее 1,5 мм отсутствуют.

Особо тонкие полосы из низкоуглеродистой стали могут иметь широкие диапазоны изменения механических свойств. Получить требуемые механические свойства можно, реализуя конкретные деформационные и температурные режимы прокатки полос в чистовой группе клеток широкополосного стана, а также правильным выбором толщины и температуры подката. Только определенный комплекс входных параметров подката, обжатий по чистовым клетям и скорости конца прокатки обеспечивает требуемую температуру конца прокатки и как следствие требуемые механические характеристики стали.

Для получения пластичной стали с низкими временным сопротивлением (пределом прочности) и пределом текучести, а также с высоким относительным удлинением необходимо температуру конца прокатки (за последней чистовой клетью) держать в пределах 860–900 °С, а температуру смотки полосы в рулон – 680–740 °С. В этом диапазоне температур конца прокатки происходит полная рекристаллизация аустенита. Ниже в диапазоне температур 820–860 °С в металле начинается фазовое превращение аустенита в ферритно-перлитную смесь. Окончание деформации в этом диапазоне ведет к измельчанию зерна, увеличению прочности и уменьшению пластических характеристик стали.

Если температура конца прокатки находится ниже 820 °С, то процесс деформации протекает в двухфазной области структуры стали. В этом случае полоса после прокатки имеет мелкозернистую структуру, высокие прочностные и низкие пластические свойства.

По чистовым клетям широкополосного стана температура уменьшается. В первых клетях деформация стали осуществляется в аустенитной области, а в последних – чаще всего в двухфазной феррито-перлитной области. Для получения особо тонких горячекатаных полос, имеющих высокие пластические свойства, соответствующих холоднокатаным полосам после отжига, необходимо обеспечить температуру конца прокатки выше 860 °С.

В этой связи разработка эффективных технологических режимов горячей прокатки пластичных особо тонких полос основана на различных вариантах технических и технологических решений по реализации указанных выше требований.

Целью работы является определение параметров горячей прокатки особо тонких полос в пяти- и семиклетевых чистовых группах, необходимых для обеспечения требуемого качества металла.

Согласно с температурным балансом полосы при прокатке в чистовой группе клеток температура конца прокатки  $t_k$  зависит от температуры подката перед первой чистовой клетью  $t_n$ , потерь тепла путем излучения и конвекции в межклетевых промежутках, потерь тепла

вследствие контакта горячего металла с холодными валками в очагах деформации клетей и повышения температуры за счет работы деформации и сил трения в очагах деформации клетей. В этом балансе повысить температуру можно путем повышения работы деформации и снижения всех составляющих потерь. Температура подката  $t_n$  непосредственно и однозначно влияет на температуру готовой полосы на выходе из чистовой группы  $t_k$ . Следовательно, при прочих постоянных параметрах для увеличения  $t_k$  необходимо увеличить  $t_n$ . Однако диапазон увеличения  $t_n$  ограничен. Температура подката, полученного путем прокатки толстых слябов в черновой группе клетей широкополосного стана и на выходе из подогревательной печи литейно-прокатного модуля составляет 1000 – 1100 °С. Повысить нижний предел можно путем повышения обжатий в последних черновых клетях, экранирования подката или его подогрева перед чистовой группой клетей. Возможное увеличение температуры составляет лишь 20–50 °С, что позволяет повысить  $t_k$  лишь на 7–12 °С. Следовательно, единственным эффективным путем повышения  $t_k$  является повышение скорости прокатки. При этом увеличивается работа деформации, и сокращаются все статьи потерь тепла в балансе.

Исследование температурно-скоростных, энергосиловых и деформационных режимов прокатки особо тонких полос выполнили в пяти, шести, и семи клетевых чистовых группах клетей широкополосного стана с использованием математических моделей и пакета программ «Универсал», разработанного в НПО «Доникс» [4].

Исследование показало, что реализовать прокатку особо тонких полос возможно только с высокими относительными обжатиями в первых чистовых клетях (50–65 %), в зависимости от числа чистовых клетей и толщины подката. При таких обжатиях момент прокатки  $M$  достигает 3 и более МНм, а сила прокатки  $P$  – 30 МН и более. Передачу таких моментов могут шейки рабочих валков диаметром 900 мм и более. В этой связи диаметры рабочих валков первых двух чистовых клетей выбрали равными 900–950 мм. В следующих чистовых клетях моменты прокатки резко уменьшаются, поэтому диаметры валков уменьшали по парам клетей до 750 мм. Диаметры уменьшали также с целью снижения силы прокатки. Так, для пятиклетевой чистовой группы диаметры рабочих валков первой и второй клетки приняты 900 мм, третьей и четвертой 850 мм и пятой – 800 мм. В шести- и семиклетевых группах диаметры последних клетей выбрали 800–750 мм.

При диаметрах опорных валков в два раза больших валковые узлы чистовых клетей обеспечивают силу прокатки до 40 МН и более. Для обеспечения больших скоростей прокатки (20 м/с и более), мощность электродвигателей должна быть не менее 20 МВт.

Температурно-скоростные режимы моделировали для условий прокатки особо тонких полос из подкатов толщиной 10–60 мм, шириной 1000 мм, длиной 50 м из стали Ст 3сп. Температуру подката принимали равной 900, 1000 и 1100 °С. Скорость прокатки варьировали в диапазоне 10–20 м/с. На каждом уровне скорости (10, 15, 20 м/с) определяли ускорение чистовой группы клетей, которое обеспечивает стабильность температуры полосы по длине (компенсацию температурного клина подката, образующегося за время движения его заднего конца к первой клетке).

Такой температурный клин на подкате толщиной 50 мм, длиной 50 м, при прокатке полосы толщиной 0,8 мм со скоростью 10 м/с достигает 200 °С.

По плану исследования подкат каждой толщины с температурой 900, 1000 и 1100 °С прокатывали на полосы толщиной 0,8; 1,1 и 1,4 мм на скорости 10, 15 и 20 м/с в пяти, шести и семиклетевой группах клетей.

С использованием разработанной программы расчета определяли температуры переднего  $t_n$  и заднего  $t_k$  конца раската на входе и выходе каждой клетки, а также значение выравнивающего по длине готовой полосы ускорения  $a_y$  и температуру концов раската при прокатке с ускорением в каждой клетке  $t_{3y}$ .

Расчеты показали, что оптимальный диапазон температуры конца прокатки 860–890 °С при прокатке особо тонких полос обеспечивается режимом прокатки из подката толщиной 50 мм на скорости 10 м/с как в шести так и в семиклетевой чистовой группе, а также из подката толщиной 20–40 мм в пятиклетевой чистовой группе.

Следует отметить, что скорость прокатки 10 м/с является максимальной по условию заправки стана, транспортировки полосы по отводящему рольгангу и заправки в моталку. На практике она ниже (8–9 м/с). Температура конца прокатки полос толщиной 0,8 мм из подката толщиной 10 мм на скорости 10 м/с в 5, 6 и 7-клетевой чистой группе составляет соответственно 786, 719 и 674 °С. При скорости прокатки 15 м/с температура повышается на 70–80 °С, а при 20 м/с еще на 40–50 °С и составляет соответственно 904, 842 и 786 °С.

Анализ результатов расчетов показал, что для обеспечения заданной температуры полосы на выходе из чистой группы может быть достигнут только путем повышения скорости прокатки. Чем выше ускорение, тем большая часть длины полосы будет иметь заданную температуру. Обычно ускорение начинают после заправки переднего конца полосы в моталку. Полосы толщиной 0,8–1,4 мм из подката толщиной 10 мм следует катать на скорости 20 м/с; из подката 30 мм – на скорости 15 м/с, а из подката толщиной 50–60 мм – на скорости 10 м/с.

Установили, что температура конца прокатки с увеличением числа клеток уменьшается на 60–90 °С при увеличении толщины подката с 10 до 60 мм соответственно.

Температурный клин подката уменьшается по чистовым клетям в 2–6 раз (при скорости прокатки 10 м/с) с уменьшением толщины подката.

Изменение коэффициента передачи температурного клина (выравнивания температуры по длине полосы)  $K_{\Delta t}$  рассчитывали как отношение:

$$K_{\Delta t} = \Delta t_k / \Delta t_n, \quad (1)$$

где  $\Delta t_k$  – уменьшение температуры по длине готовой полосы, мм;

$\Delta t_n$  – уменьшение температуры по длине подката, мм.

Значение  $K_{\Delta t}$  изменяется в диапазоне 0,14–0,5 для толщины полосы 0,8–1,4 мм соответственно. С увеличением толщины подката значения  $K_{\Delta t}$  уменьшаются, а с увеличением температуры подката увеличивается.

Скорость прокатки неоднозначно влияет на коэффициент  $K_{\Delta t}$ . При прокатке полос толщиной 0,8 мм с увеличением скорости прокатки  $K_{\Delta t}$  уменьшается, а при прокатке полос толщиной 1,1 и 1,4 мм в 6-клетевой чистой группе уменьшается, а 7-клетевой – увеличивается.

Снижение температуры раската от первой до последней клетки чистой группы характеризует коэффициент передачи  $K_t$ :

$$K_t = t_k / t_n. \quad (2)$$

Коэффициент  $K_t$  увеличивается с повышением скорости прокатки и толщины подката и наоборот уменьшается с увеличением температуры подката. С увеличением толщины полосы с 0,8 до 1,1 мм  $K_t$  падает, а на толщине 1,4 мм возрастает. При температуре подката 900 °С и высокой скорости прокатки (15–20 м/с)  $K_t$  увеличивается до 1,0–1,15. При этом температура конца прокатки становится больше температуры подката.

Снижение температурного клина по длине готовой полосы можно достичь двумя путями. Первый путь заключается в устранении температурного клина подката на входе в первую чистовую клетку. Второй – прокатка с компенсирующим ускорением. Значения ускорений  $a_y$  зависят от всех основных параметров прокатки:

$$a_y = f(H_n, t_n, h_k, V_k), \quad (3)$$

где  $H_n, t_n$  – толщина и температура подката;

$h_k, V_k$  – толщина и скорость прокатки полосы.

Установили, что компенсирующее ускорение изменяется в пределах 0,005–0,6 м/с<sup>2</sup>. Чем выше скорость прокатки и толщина полосы, меньше температура и толщина подката, тем выше величина компенсирующего ускорения прокатки.

Для описания зависимости температуры конца прокатки  $t_k$ , температурных показателей  $K_t$  и  $K_{\Delta t}$  и ускорения  $a_y$  были построены модели вида:

$$t_k, K_t, K_{\Delta t}, a_y = f(H_n, t_n, h_k, v_k), \quad (4)$$

где  $K_t, K_{\Delta t}$  – коэффициенты передачи чистой группы клетей по температуре подката и перепаду температур по длине полосы соответственно.

Зависимости  $t_k, K_t, K_{\Delta t}$  приняли в виде:

$$t_k, K_t, K_{\Delta t} = A_0 + A_1 H_k + A_2 t_n + A_3 h_k + A_4 v_k, \quad (5)$$

Зависимость  $a_y$  приняли в виде:

$$\ln a_y = A_0 + A_1 \ln H_k + A_2 \ln t_n + A_3 \ln h_k + A_4 \ln v_k. \quad (6)$$

Откуда:

$$a_y = e^{A_0 + A_1 \ln H_k + A_2 \ln t_n + A_3 \ln h_k + A_4 \ln v_k}, \quad (7)$$

где  $A_0, A_1, A_2, \dots$  – коэффициенты модели.

Полученные коэффициенты для 6-клетевой и 7-клетевой чистовых групп ШСГП приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов для зависимостей  $t_k, K_t, K_{\Delta t}, a_y$

Коэффициенты модели	Регрессионные модели							
	$t_k$		$K_t$		$K_{\Delta t}$		$a_y$	
	6 клетей	7 клетей	6 клетей	7 клетей	6 клетей	7 клетей	6 клетей	7 клетей
$A_0$	331	323	1,39	1,17	0,888	0,0888	-22,6	-22,2
$A_1$	3,33	2,44	0,0010	0,0001	-0,0036	-0,0032	-1,05	-1,07
$A_2$	0,236	0,202	-0,0005	-0,0005	-0,0008	-0,0002	2,76	2,73
$A_3$	35,2	44,4	0,0164	0,0426	0,381	0,380	1,99	2,11
$A_4$	12,0	12,9	0,0136	0,0143	-0,0084	0,0029	1,47	1,55

Основная задача при разработке режима обжатий – определения оптимальных значений толщины  $h_n$  и температуры  $t_n$  подката, распределений относительных обжатий по чистовым клетям, а также скорости прокатки  $v_k$ , обеспечивающих заданные загрузки рабочих клетей по силе  $P$ , моменту прокатки  $M$  и температуре конца прокатки  $t_k$ .

Температура конца прокатки, определяющая качество металла, должна быть в диапазоне 860 – 900 °С. Если  $t_k$  ниже этого диапазона, то горячекатаные полосы имеют более высокие прочностные и низкие пластические характеристики, не соответствующие механическим характеристикам холоднокатаных отожженных полос.

Температура конца прокатки  $t_k$  в наибольшей степени зависит от температуры подката  $t_n$  и скорости прокатки. В меньшей степени  $t_k$  зависит от перераспределения обжатий по чистовым клетям. Расчеты показали, что увеличением обжатий в последних клетях можно увеличить  $t_k$  на 15–20 °С. При этом значительно увеличивается сила прокатки в последних клетях, что затрудняет работу систем регулирования толщины, поперечной разнотолщинности и плоскостности полосы.

Температура подката на выходе из последней черновой клетки широкополосного стана в зависимости от толщины составляет 1100–1150 °С. На входе в чистовую группу клетей – около 1070–1100 °С. В связи с тем, что на промежуточном рольганге подкат находится в течение 2–4 мин, подогреть его практически невозможно. Однако, можно уменьшить потерю температуры на несколько десятков градусов путем экранирования промежуточного рольганга, сверткой его в рулон на установке типа «койл-бокс». Основным эффектом от этих мероприятий – снижение температурного клина на подкате.

При производстве полос на литейно-прокатных модулях (ЛПМ) непрерывнолитые слябы толщиной 50–70 мм подогревают в проходной нагревательной печи до температуры 1100–1150 °С. Если на выходе из машины непрерывной разливки слябов установлены обжимные клетки, то раскат толщиной 20–40 мм сматывают в рулон в буферной подогревательной печи. Таким образом, температура подката на всех полосовых станах находится в пределах 1000–1150 °С. Самую высокую температуру имеют подкаты толщиной 50–70 мм.

Наиболее эффективно влияние на температуру полосы скорости прокатки. Однако процесс заполнения чистовой группы клетей полосой (прокатка переднего конца) нельзя обеспечить по условиям захвата валками, транспортирования по отводящему рольгангу и заправки переднего конца полосы в моталки на скорости выше 10–11 м/с. Этот уровень скорости при тонких (10–20 мм) подкатах чаще всего не обеспечивают требуемую температуру конца прокатки полос толщиной 0,8–1,5 мм.

Так, значения коэффициента  $K_{\Delta t}$  для особо тонких полос толщиной 0,6–1,0 мм при скорости прокатки 10 м/с составляет в среднем 0,2. Поэтому повышение температуры подката толщиной 10–20 мм на 100 °С увеличивает температуру конца прокатки лишь на 10–25 °С.

С увеличением толщины подката до 40–60 мм и уменьшением числа рабочих клетей с 7 до 6 или до 5 даже при температуре подката 1000 °С обеспечивается требуемая температура конца прокатки. При этом резко возрастает нагрузка клетей при скорости прокатки 20 м/с (для полос шириной 1000 мм сила прокатки возрастает до 50 МН, момент – до 4,3 МНм, мощности – до 27 МВт).

Установлено, что прокатка переднего конца полосы толщиной 0,6 мм на скорости 10 м/с не обеспечивает требуемую температуру конца прокатки при толщинах подкатов 10, 20 и 30 мм и при числе клетей 5, 6 и 7. Наибольшая температура 833 °С получена при прокатке полосы из подката толщиной 20 мм в пятиклетевой чистовой группе. Сила прокатки по клетям составила 26 – 32 МН, момент – до 1,2 МНм, мощность – до 12 МВт. Повышение температуры подката до 1100 °С обеспечивает требуемую температуру конца прокатки и несколько снижает силовые нагрузки. При прокатке полос толщиной 0,6 мм в 6 – 7 клетевых чистовых группах клетей температура составляет 670–780 °С при скорости 10 м/с и 840–930 °С при скорости 20 м/с.

После заправки полосы в моталку чистовую группу клетей разгоняют. Если температура переднего конца соответствует требуемой, то ускорение обеспечивает компенсацию температурного клина. Если температура ниже требуемой, то чистовую группу ускоряют до скорости прокатки, обеспечивающей требуемую температуру. В этом случае с целью уменьшения длины полосы с низкой температурой скорость прокатки повышают с максимальным ускорением (0,5–2 м/с<sup>2</sup>), а затем при наличии температурного клина подката ускорение снижают для его компенсации.

Высокие скорости мало влияют на силовые условия прокатки. В первых чистовых клетях сила и момент прокатки повышаются, а в последующих снижаются. Мощность прокатки в первых клетях увеличивается пропорционально скорости, а в последних изменяется

мало ( $\pm 10\%$ ). При прокатке полос толщиной 0,6–0,8 мм шириной 1000 мм из стали Ст 3сп из относительно тонкого подката (10–30 мм) сила, момент и мощность прокатки на переднем конце полосы составляет в пятиклетевой группе 28 – 32 МН; 0,3–1,75 МНм и 3,8–26 МВт соответственно; на заднем конце с более низкой температурой подката 20–45 МН; 0,2–4 МНм и 9–27 МВт соответственно. В 6 и 7 клетевых группах клетей уровень энергосиловых параметров в первых клетях снижается, а в последних увеличивается за счет снижения температуры. При использовании подката толщиной 40–60 мм уровень энергосиловых параметров прокатки в 6 и 7 клетевых группах увеличивается. Особенно момент прокатки в первой чистой клетке, где обжатие достигает до 63 %.

Из приведенного выше анализа следует, что прокатка особо тонких полос шириной 1000 мм с требуемой температурой конца прокатки можно реализовать в мощных чистовых клетях, обеспечивающих силу прокатки до 40 МН, момент прокатки (в первых клетях) – до 3,5 МНм, скорость прокатки 20 м/с и более, ускорение – до 2 м/с<sup>2</sup>, мощность двигателей до 25 МВт.

### ВЫВОДЫ

На основании результатов исследования процесса прокатки особо тонких полос установили.

Рабочие клетки широкополосных станов различных типов должны обеспечивать высокие значения энергосиловых и деформационных параметров прокатки (для полос шириной 1000 мм сила до 40 МН; момент до 3 МНм, скорость свыше 20 м/с, мощность до 25 МВт).

Прокатка должна производиться за минимальное число обжатий на максимально высокой скорости.

Для повышения температуры металла и разгрузки клетей в первых проходах длинный подкат толщиной 10–20 мм целесообразно перед прокаткой сматывать в рулон. Подкат толщиной 30–40 мм следует предварительно обжимать и сматывать в рулон, а толщиной 50 мм и более обжимать и сматывать в рулон последовательно два раза.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дубина О. В. Производство сверхтонких горячекатаных, в том числе и оцинкованных полос и листов с целью частичной замены холоднокатаного листа на внутреннем рынке Украины / О. В. Дубина, Ю. В. Коновалов // *Сучасні проблеми металургії*. – Т. 5 – С. 78–86.
2. Условия производства особотонкой горячекатаной полосовой стали на комбинате «Запорожсталь» / А. И. Молчанов, С. П. Солтан, В. П. Яланский [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 10. – С. 11–14.
3. Разработка технологии производства горячекатаных полос толщиной 1,5 мм методом прямой транзитной прокатки на станах слябинг-НТЛС 1680 / В. Т. Тилик, О. Н. Шахно, А. Ю. Путноки [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 10. – С. 84–87.
4. Освоение технологии производства тонких полос и гнутых профилей / В. А. Сацкий, А. Ю. Путноки, В. Т. Тилик [и др.] // *Сталь*. – 2003. – № 10. – С. 33–37.
5. Программное обеспечение проектирования технологии прокатки / А. Л. Остапенко, Э. Е. Бейгельзимер, Н. В. Миненко [и др.] // *Сталь*. – 2006. – № 8. – С. 56–59.

Руденко Е. А. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;

Курдюкова Л. А. – науч. сотрудник ДонНТУ;

Тимошенко Н. В. – студент ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: smirnov@fizmet.dgtu.donetsk.ua