

Я. Д. Василев, д-р техн. наук, профессор

Р. А. Замогильный, мл. науч. сотр., e-mail: rz90@i.ua

Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина

Особенности технологии холодной полосовой прокатки и разработка методики расчета режимов деформации на двухклетевых реверсивных станах

Рассмотрены особенности технологии и возможные схемы прокатки на двухклетевых реверсивных станах. Показано, что прокатка на этих станах может производиться за один, два, три или более пропусков. С целью минимизации негативного влияния применения рабочих валков в клетях двухклетевых реверсивных станов с разной шероховатостью и, как следствие, повышения параметров точности продукции, предложено осуществлять процесс прокатки каждого сорта размера на двухклетевых реверсивных станах с постоянной силой в обеих клетях во всех пропусках. С использованием предложенной методики расчета режимов деформации и технологических параметров на двухклетевых реверсивных станах холодной прокатки, учитывающей особенности технологии реверсивной прокатки, были разработаны режимы деформации при холодной прокатке жести толщиной 0,12 и 0,18 мм и тонких полос толщиной 0,35 и 0,50 мм на двухклетевых реверсивных станах 1400 и 1750, сооружение которых намечается в Украине. Впервые в качестве критерия оптимизации при разработке режимов деформации использовано условие постоянства силы прокатки по клетям и пропускам для каждого сорта размера прокатываемых полос, что обеспечивает более высокую стабильность параметров технологии и показателей точности продукции, выпускаемой на двухклетевых реверсивных станах.

Ключевые слова: двухклетевой реверсивный стан, холодная прокатка, методика, алгоритм, режим деформации, сила.

Двухклетевые реверсивные станы – это новый тип компактных высокопроизводительных станов холодной прокатки ССМ (Compact Cold Mill), первые сведения о которых появились примерно 20 лет тому назад [1, 2]. Их основное преимущество состоит в удачном сочетании технологической гибкости с относительно высокой производительностью (до 0,8–1,2 млн т в год) при более низкой стоимости технологического оборудования. Поэтому строительство таких станов целесообразно как на крупных, так и на предприятиях средней мощности. Оснащение этих станов высокоэффективными системами регулирования и управления параметрами процесса позволило существенно сократить количество технологических отходов (концевой обрезки) металла и обеспечить высокий уровень качества выпускаемой продукции [3, 4], что способствовало их быстрому и широкому распространению. По данным зарубежных фирм, в настоящее время в мире построено около 20 двухклетевых реверсивных станов холодной прокатки, которые успешно эксплуатируются в развитых и в развивающихся странах. Интерес к этим станам проявили и в Украине. В частности, на ОАО «Запорожсталь» намечается строительство двухклетевого реверсивного стана 1750 для производства автомобильного листа [5]. В работах [6, 7] предложен комплекс для производства жести и тонких полос высокого качества в Украине, оснащенный двухклетевым реверсивным станом.

Основным элементом технологии производства холоднокатаного проката является режим деформации, который учитывает особенности холодной про-

катки (непрерывная или реверсивная) на конкретном стане и определяет уровень технологических параметров процесса. Поэтому расчет режима деформации и технологических параметров производят для каждого сорта размера прокатываемых полос. В ходе расчета режима деформации определяют толщину исходного подката, значения частных относительных обжатий и относительных натяжений по клетям (пропускам), температурно-скоростных и энергосиловых параметров прокатки, проверяют соблюдение технологических ограничений и выполнение принятых критериев оптимизации [8].

В настоящее время в литературе предложены методики расчета технологических параметров только на непрерывных станах холодной прокатки [8, 9]. Технология холодной прокатки на двухклетевых реверсивных станах существенно отличается от технологии холодной прокатки на непрерывных станах. Поэтому обоснование подходов и принципов при разработке режимов деформации на двухклетевых реверсивных станах и создание соответствующей расчетной методики, учитывающей особенности технологии реверсивной холодной прокатки, – актуально. Решению этой задачи посвящена данная статья.

Двухклетевые реверсивные станы холодной полосовой прокатки (рис. 1) состоят из разматывателя, двух моталок и двух рабочих клетей, которые могут быть четырех- или шестивалковыми. Длина бочки валков этих станов составляет 1200–1750 мм, а диаметры рабочих валков, в зависимости от конструкции рабочих клетей (четырёх- или шестивалковые), находятся в пределах от 200–240 до 360–450 мм.

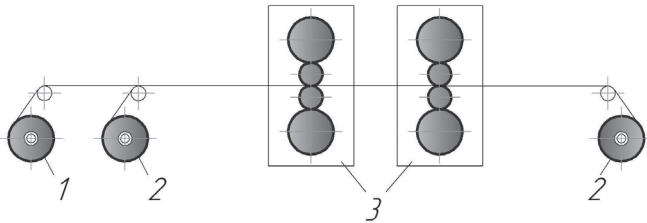


Рис. 1. Схема двухклетевого реверсивного стана холодной прокатки: 1 – разматыватель; 2 – моталки; 3 – рабочие клетки

Двухклетевые реверсивные станы являются по существу непрерывными станами, которые могут работать и в режимах реверсивной прокатки. На рис. 2 показаны возможные схемы прокатки, применяемые на этих станах. Из представленных схем видно, что прокатка на двухклетевых станах может производиться за один (рис. 2, а), два (рис. 2, б, в), три (рис. 2, г, д) или более пропусков (рис. 2, е). При этом в последней клетке последнего пропуска может быть предусмотрена возможность установки рабочих валков другого диаметра или с другой шероховатостью (рис. 2, в, д). В первом случае (рис. 2, а) прокатка осуществляется как на обычном двухклетевом непрерывном стане. Во всех остальных случаях (рис. 2, б-е) прокатка реализуется в реверсивных режимах. Для обеспечения устойчивости процесса прокатки и формирования требуемой шероховатости готовой продукции в каждой клетке двухклетевых реверсивных станом применяют, как правило, рабочие валки с разной шероховатостью.

В сортамент двухклетевых реверсивных станом входят тонкие и особо тонкие полосы толщиной менее 0,8–1,0 мм, вплоть до 0,35 мм из углеродистых и высокопрочных сталей, а также жесть одинарной прокатки с минимальной толщиной 0,08–0,10 мм. Величина суммарного обжатия при прокатке на этих станах достигает 0,8–0,925 и более, что при-

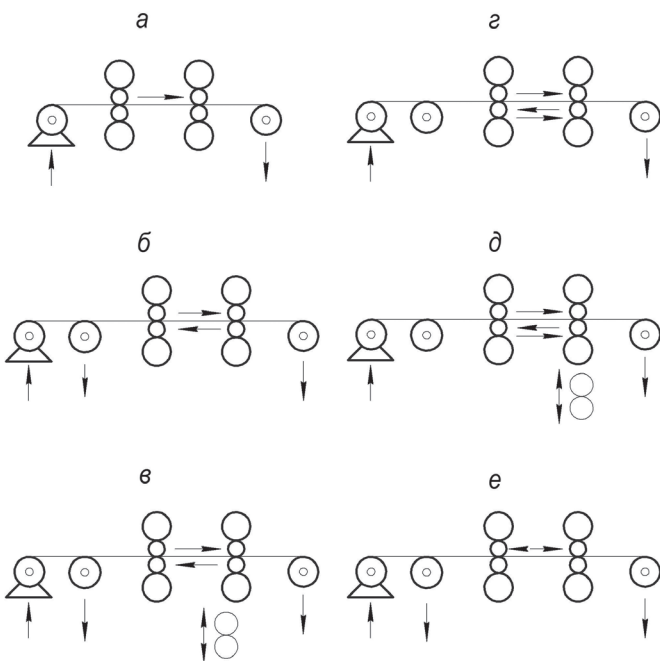


Рис. 2. Схемы прокатки на двухклетевых реверсивных станах

водит к увеличению предела текучести материала полосы и нормальных контактных напряжений до 750–1000 Н/мм² и 1000–1500 Н/мм² соответственно. Прокатка на двухклетевых реверсивных станах осуществляется всегда с применением высокоэффективных технологических смазок и с натяжением. Ранее было установлено, что для повышения энергетической и технологической эффективности процесса холодной полосовой прокатки величины относительных задних q_0/σ_{T0} и относительных передних q_1/σ_{T1} натяжений в каждой клетке должны увеличиваться от пропуска к пропуску, и для их определения были рекомендованы зависимости [10]:

$$\frac{q_0}{\sigma_{T0}} = 1,15k_q \left(\frac{1+f}{1+5\sqrt{\frac{h_0}{R}}} + \frac{1+\varepsilon\varepsilon_\Sigma}{1+\varepsilon} \right); \quad (1)$$

$$\frac{q_1}{\sigma_{T1}} = 2,3k_q \sqrt{1 - \left(\frac{q_0}{\sigma_{T0}} \right)^2}, \quad (2)$$

где k_q – коэффициент, определяющий возможный уровень относительных натяжений, исходя из особенностей технологии прокатки на конкретном стане ($k_q = 0,05–0,20$); $q_0, q_1, \sigma_{T0}, \sigma_{T1}$ – абсолютные величины напряжений натяжения и предела текучести материала полосы на входе и выходе из очага деформации соответственно; f, R, h_0 – коэффициент трения, радиус рабочего валка и толщина полосы на входе в очаг деформации; $\varepsilon, \varepsilon_\Sigma$ – частное и суммарное относительное обжатие полосы при прокатке в данной клетке, доли единицы.

Рассчитанные по этим формулам значения q_0/σ_{T0} и q_1/σ_{T1} при $k_q = const$ для каждой клетки не могут превышать 0,45–0,50, и согласно данным работы [11], должны удовлетворять условию:

$$0,17 < \frac{q}{\sigma_T} < 0,49, \quad (3)$$

поскольку в этом случае обеспечивается высокое самовыравнивание вытяжек по ширине полосы и предотвращается потеря устойчивости последней [11].

Как уже отмечалось, деформация металла в каждой клетке осуществляется в валках с разной шероховатостью. В связи с этим после каждого пропуска в каждой клетке чередуются условия прокатки «шероховатой полосы» в «гладких валках» и «гладкой полосы» в «шероховатых валках». Это вызывает изменение условий (коэффициента) трения и, как следствие, изменение энергосиловых, температурных и кинематических параметров процесса после каждого пропуска в каждой клетке. Для расчетного определения коэффициента трения, когда параметры шероховатости валков и полосы существенно отличаются, рекомендуется формула (12) [12], использованная в рекомендуемой ниже расчетной методике.

Из приведенного анализа особенностей технологии холодной прокатки на двухклетевых реверсивных

станах следует, что в самом общем случае в каждом следующем пропуске силовое, тепловое и кинематическое взаимодействие полосы с валками будет другим и будет вызывать существенное изменение (нестабильность) всех технологических параметров, что нежелательно. Нестабильность силовых, температурных и кинематических параметров после каждого пропуска приводит к ухудшению плоскостности и к увеличению разнотолщинности, то есть к снижению точности геометрических размеров прокатываемых полос [13]. Устранение этих дефектов, даже при оснащении стана соответствующими быстродействующими автоматическими системами регулирования оказывается не всегда достаточно эффективным. Очевидно, что для успешного решения этой проблемы необходимы решения, направленные на изыскании дополнительных технологических возможностей для стабилизации параметров процесса. По мнению авторов статьи, это может быть достигнуто при ведении процесса прокатки на двухклетевых реверсивных станах с постоянной силой в обеих клетях во всех пропусках для каждого сорта размера прокатываемых полос. Это условие должно рассматриваться в качестве основного или одного из необходимых критериев оптимизации при разработке режимов деформации на двухклетевых реверсивных станах холодной прокатки. Соблюдение данного условия позволит стабилизировать уровень параметров технологии при прокатке каждого сорта размера полос и будет способствовать получению продукции с высокими показателями качества.

С использованием условия ведения процесса холодной прокатки с постоянной силой в каждой клетке во всех пропусках и выражений (1), (2) для определения оптимальных значений относительных натяжений были разработаны энергетически эффективные режимы деформации на двухклетевых реверсивных станах. Расчет технологических параметров при холодной прокатке производили по современной методике, изложенной в работах [8, 9, 12]. Методика учитывает особенности и закономерности фрикционного, упруго-пластического, силового, теплового и кинематического взаимодействия тонкой полосы с валками и обеспечивает высокую точность и надежность прогнозирования технологических параметров на станах холодной полосовой прокатки [14]. Ниже приведены формулы (модели) для определения основных технологических параметров холодной прокатки на двухклетевых реверсивных станах [8, 9, 12]: длины упруго-пластического очага деформации:

$$l_c = x_1 + \sqrt{R\Delta h + x_1^2}, \quad (4)$$

где

$$x_1 = x_{1п} + 6\theta_B \rho_{срс} R \left(1 - 2 \frac{x_{1п}}{l_c}\right) \left[4 \frac{x_{1п}}{l_c} \left(1 - \frac{x_{1п}}{l_c}\right) + 1\right]; \quad (5)$$

$$\frac{x_{1п}}{l_c} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}\right) \frac{E_n}{\beta \sigma_{т1} \xi_1}}}; \quad (6)$$

среднего контактного нормального напряжения:

$$\rho_{срс} = \frac{\beta}{2(1 - v_n^2)} \left(\sigma_{т0} \xi_0 \frac{x_{0п}}{l_c} + \sigma_{т1} \xi_1 \frac{x_{1п}}{l_c} \right) + \frac{\beta \sigma_{тср} \xi_{ср}}{1 - v_n^2} \left\{ 1 + \frac{f_B}{3h_{ср}} \left[1 + \left(\frac{f_B}{4h_{ср}} \right)^2 \right] \right\} \frac{l_B}{l_c}, \quad (7)$$

где

$$\frac{x_{0п}}{l_c} = \left(1 - \frac{x_{1п}}{l_c} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\beta \sigma_{т0} \xi_0}{\varepsilon E_n + \beta \sigma_{т1} \xi_1 (1 - \varepsilon)}} \right]; \quad (8)$$

$$h_{ср} = 0,5(h_0 + h_1); \quad (9)$$

$$\frac{l_B}{l_c} = 1 - \frac{x_{0п}}{l_c} - \frac{x_{1п}}{l_c}; \quad (10)$$

$$l_B = l_c - x_{0п} - x_{1п}; \quad (11)$$

коэффициента трения:

$$f = \left(2,4 - \sqrt{1 + \frac{ЧОМ+КЧ}{ЧОМ_{пм}+КЧ_{пм}}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + 0,25\sqrt{v_{50}} - 0,005 \cdot v_{50}} \right) \times \\ \times \left[1 + \sqrt{\varepsilon} \left(1 + \frac{1,2R_{авуст}}{0,05 + \varepsilon} \right) \left(0,4 + \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon_{пр}} \right) \right] \times \\ \times \left[0,07 - \frac{0,1V_B^2}{2(1 + V_B) + 3V_B^2} \right] \left(1 + 0,3\sqrt{\frac{t_{деф} - 50}{200}} \right) \times \\ \times \left\{ 1 + a_p \left[\left(\frac{\rho_{срс}}{600} \right)^2 - 1 \right] \right\} \left\{ 1 + a_{шп} \left[\left(\frac{R_{ашпуст}}{R_{авуст}} \right)^2 - 1 \right] \right\} \times \\ \times \left(1 + \frac{l_c - x_1}{R} \right) \left[1 + \frac{1}{(1 + 5C_3)^2} \right], \quad (12)$$

где $t_{деф} = \frac{1}{4}(t_{0п} + t_{0в} + 2t_{1п}); \quad (13)$

силы, момента и мощности прокатки*:

$$P_c = \rho_{срс} l_c b; \quad (14)$$

$$M_c^* = P_c \psi_c l_c + Rb(q_0 h_0 - q_1 h_1); \quad (15)$$

$$N_c^* = M_c^* \frac{V_B}{R}, \quad (16)$$

где

$$\psi_c = \frac{1}{6} \left[\frac{\rho_0}{\rho_{срс}} \left(1 - \frac{\gamma_c}{\alpha_c} - \frac{x_{1п}}{l_c} \right) \left(1 - \frac{x_{1п}}{l_c} \right) - \right. \quad (17)$$

$$\left. - \frac{\rho_1}{\rho_{срс}} \left(\frac{\gamma_c}{\alpha_c} + \frac{x_1}{l_c} \right) \left(1 - \frac{x_{0п}}{l_c} \right) + 2 \left(1 + \frac{\gamma_c}{\alpha_c} + \frac{x_{1п}}{l_c} - 2 \frac{x_1}{l_c} - \frac{x_{0п}}{l_c} \right) \right];$$

* – Без учета потерь на трение качения между валками и в подшипниках последних

$$p_0 = \frac{1,15\sigma_{T0}\xi_0}{1 - v_n^2}; \quad (18)$$

$$p_1 = \frac{1,15\sigma_{T1}\xi_1}{1 - v_n^2}; \quad (19)$$

$$\frac{x_1}{l_c} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{R\Delta h}{l_c^2} \right); \quad (20)$$

$$\frac{\gamma_c}{\alpha_c} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{(\Delta h + \Delta_{1n}) \left(2 - 3 \frac{x_{1n}}{l_c} \right)}{4nfl_c \left(1 - \frac{x_{1n}}{l_c} \right)^2} \right] - \frac{q_0 h_0 - q_1 h_1}{4fp_{срc} l_c} - \frac{x_1}{l_c}; \quad (21)$$

$$\Delta_{1n} = \frac{\beta\sigma_{T1}}{E_n} \xi_1 h_1; \quad (22)$$

$$n = 1 + 0,12 \left(\frac{\alpha}{f} \right)^2. \quad (23)$$

В формулах (3)–(23) приняты обозначения: индекс «с» означает, что данный параметр рассчитан с учетом совместного влияния упругих деформаций валков и полосы; ε_{np} , ε – предварительное и частное относительное обжатие полосы, доли единицы; l_c , l_b – длина упруго-пластического очага деформации и протяженность пластического участка контакта полосы с валком при прокатке ($l_c = x_{он} + l_b + x_{1n}$), мм; $x_{он}$, x_{1n} – протяженность участков упругого контакта полосы с валками, определяемая соответственно упругим сжатием и упругим восстановлением последней, мм; Δh , R – частное абсолютное обжатие полосы при прокатке и радиус рабочего валка, мм; h_0 , h_1 , $h_{ср}$ – толщина полосы на входе и выходе из очага деформации и ее среднее значение в очаге соответственно, мм; v_b , v_n , E_b , E_n – коэффициент Пуассона и модуль упругости (Н/мм²) материала рабочих валков и полосы соответственно; σ_{T0} , σ_{T1} , $\sigma_{Tср}$ – предел текучести материала полосы на входе и выходе из очага деформации и среднее значение напряжения текучести материала полосы в очаге деформации, рассчитанное с учетом совместного влияния степени, температуры и скорости деформации при прокатке, Н/мм²; t_{0n} , t_{1n} , t_{0b} , t_{1b} – температура полосы и валков на входе и выходе из очага деформации соответственно, °С; q_0 , q_1 – абсолютные значения напряжений заднего и переднего удельных натяжений, Н/мм²; ξ_0 , ξ_1 , $\xi_{ср}$ – коэффициенты, определяющие количественное влияние заднего и переднего напряжений натяжения и их среднего значения на параметры процесса; γ_c , α_c – нейтральный угол и угол контакта полосы с валком при прокатке, рад; $p_{срc}$ – среднее контактное нормальное напряжение, рассчитанное с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы, Н/мм²; f – коэффициент трения при холодной прокатке; v_{50} – кинематическая вязкость технологической смазки (эмульсола) при температуре 50 °С, мм²/с; ЧОМ, КЧ, ЧОМ_{пм}, КЧ_{пм} – число омыления и кислотное число конкретной технологической смазки (эмульсо-

ла) и пальмового масла соответственно, мг КОН/г. $R_{авуст}$, $R_{ануст}$ – установившаяся шероховатость поверхности рабочих валков и установившаяся шероховатость поверхности полосы на входе в очаг деформации данной клетки в данном пропуске, мкм; V_b – окружная скорость рабочих валков при прокатке, м/с; a_p , $a_{шп}$ – безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние соответственно среднего контактного нормального напряжения и шероховатости полосы на коэффициент трения ($a_p = 0,01-0,025$; $a_{шп} = 0,01-0,03$); x_1 – приращение длины очага деформации за линейной, соединяющей центры вращения валков, вызванное радиальным упругим сжатием последних и упругим восстановлением полосы, мм; C_3 – концентрация смазки (эмульсола) в эмульсии, %; P_c , M_c , N_c – сила (МН), момент (кН·м) и мощность прокатки (кВт) соответственно; ψ_c – коэффициент, определяющий положение точки приложения равнодействующей силы на контакте полосы с валком; p_0 , p_1 – контактное нормальное напряжение при холодной прокатке на границе перехода упругого состояния полосы в пластическое в зоне отставания и опережения соответственно, Н/мм²; Δ_{1n} , b – упругое восстановление полосы и ее ширина, мм.

Как известно, длина упруго-пластического очага деформации l_c не может быть определена точно без знания среднего контактного нормального напряжения $p_{срc}$, величина которого со своей стороны зависит от значения l_c . Поэтому расчет l_c производится методом итераций [8]:

$$\frac{l_{ci} - l_{ci-1}}{l_{ci-1}} \leq \Delta. \quad (24)$$

Точность расчета l_c в данной работе составляла 0,001.

Неотъемлемой частью методики расчета технологических параметров и режимов деформации на двухклетевых реверсивных станах холодной прокатки является проверка технологических ограничений, выполнения критериев оптимизации и вычисления часовой производительности стана. Общепринятые технологические ограничения подробно изложены в литературе [8], а методика расчета производительности двухклетевых станов опубликована в работе [15], поэтому из-за ограниченного объема данной статьи они не приводятся. В качестве критерия оптимизации принято условие постоянства силы прокатки ($P_c = const$) при прокатке каждого сорта размера полосы во всех клетях и пропусках:

$$\frac{P_{ci} - P_{ci-1}}{P_{ci-1}} \leq 0,01 - 0,02. \quad (25)$$

На базе этой методики были составлены алгоритм и программа расчета режимов деформации на двухклетевых реверсивных станах, отражающая особенности технологии холодной прокатки на этих станах. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3. Буква N на блок-схеме соответствует количеству пропусков при прокатке данного профиля.

Логика расчета режимов деформаций на двухклетевых реверсивных станах понятна из приведенной схемы и не требует дополнительных пояснений. Отметим лишь, что расчет ведется по ходу прокатки.

С помощью предложенной методики были выполнены расчеты режимов обжатий и технологических параметров при прокатке жести и тонких полос на двухклетевых реверсивных станах холодной прокатки 1400 и 1750, сооружение которых предусматривается в Украине. Расчеты производили для случая прокатки полос из стали 08кп, когда диаметры рабочих валков в обеих клетях одинаковы ($R_1 = R_2 = 225$ мм), а в качестве технологической смазки применяется 4 % эмульсия пальмового масла.

Влияние упрочнения на предел текучести $\sigma_{те}$ стали 08кп рассчитывали по известной формуле А. В. Третьякова [8].

При определении исходного предела текучести $\sigma_{тисх}$ горячекатаного подката учитывали, что с уменьшением толщины последнего, значения $\sigma_{тисх}$ увеличиваются. Толщину горячекатаного подката определяли исходя из величин суммарного относительного обжатия ε_{Σ} , применяемых на практике [3, 8, 11, 14].

В таблице, в качестве примера, представлены расчетные данные о режимах деформации и технологических параметрах при прокатке жести 0,12x750 мм и 0,18x1020 мм на стане 1400 и полосу 0,35x1050 мм и 0,5x1250 мм на стане 1750.

Из таблицы видно, что прокатка каждого из приведенных сортиразмеров полос осуществляется по режимам деформации, которые обеспечивают ведение процесса с постоянной силой в каждой клетке во всех пропусках. Это достигается в результате применения сравнительно больших частных относительных обжатий, которые, в каждом пропуске за исключением третьего пропуска при прокатке жести 0,12x750 мм, мало отличаются между собой. Предлагаемые режимы деформации характеризуются также приемлемым использованием возможностей электрического оборудования станов 1400 и 1750. Вместе с тем, высокие значения контактных нормальных напряжений (до 800–1150 Н/мм²) и температуры прокатываемой полосы (до 150–180 °С) показывают, что рабочие валки двухклетевых реверсивных станов холодной прокатки эксплуатируются в жестких силовых и температурных условиях.

Приведенные в таблице результаты расчетов технологических параметров процесса холодной прокатки согласуются с опубликованными в литературе данными [14]. Это служит подтверждением работоспособности и надежности методики расчета режимов деформации и технологических параметров холодной прокатки на двухклетевых реверсивных станах, и дает основание рекомендовать ее для практического применения.

Выводы

Рассмотрены особенности технологии и возможные схемы прокатки на двухклетевых реверсивных станах. Показано, что прокатка на этих станах может производиться за один, два, три или более пропусков. С целью обеспечения устойчивости процесса реверсивной прокатки и требуемых параметров качества

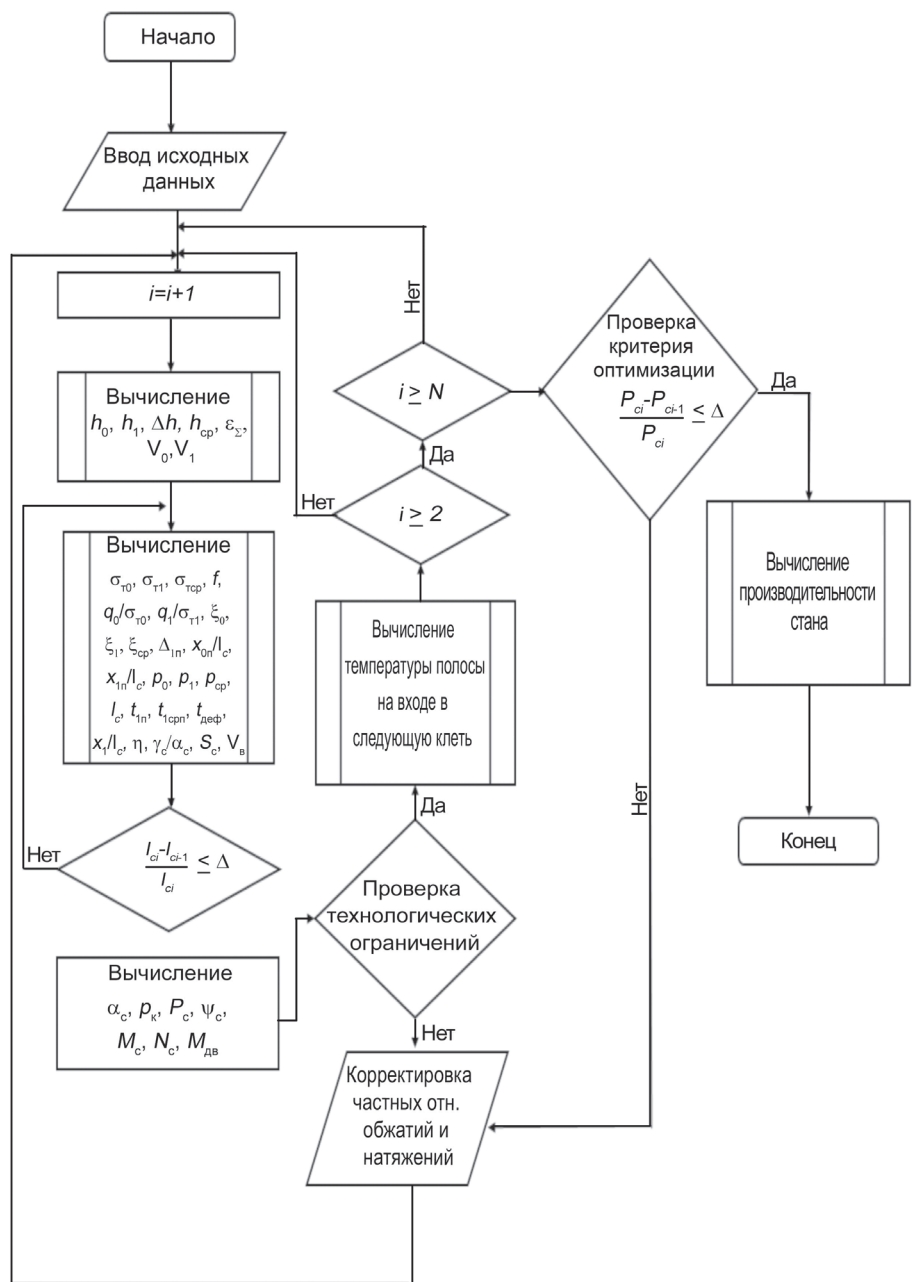


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета параметров процесса холодной прокатки на двухклетевом реверсивном стане

Режимы деформации и расчетные значения технологических параметров при прокатке жести и тонких полос на двухклетевых реверсивных станах 1400 и 1750

№ пр.	№ кл.	h_0 , мм	ε	R_a , мкм	q_0 , Н/мм ²	q_1 , Н/мм ²	σ_{TE} , Н/мм ²	f	t_{np} , °C	l_c	$P_{срс}$, Н/мм ²	P_c , МН	V_n , м/с	M_c , кН·м	$N_{дв}$, кВт	$N_{мот}$, кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Режим 1 Стан 1400, прокатка жести 0,12x750 мм из подката 1,6x750 мм [$\sigma_{TE} = 310 + 34,6(100\varepsilon_\Sigma)^{0,6}$] $\varepsilon_\Sigma = 0,925$; $V_{np} = 18$ м/с; $k_q = 0,15$																
1	1	1,60	0,321	0,6	40	157	587	0,050	75	13,06	624	6,107	3,48	33,0	692	65
	2	1,09	0,357	0,3	157	189	699	0,040	112	11,74	696	6,126	5,95	51,0	1676	588
2	3	0,70	0,408	0,3	189	209	768	0,041	144	10,48	777	6,106	6,53	44,8	1628	588
	4	0,41	0,425	0,6	209	222	808	0,045	161	9,04	901	6,111	8,81	32,7	1682	349
3	5	0,24	0,382	0,6	222	230	828	0,043	165	7,82	1044	6,120	13,96	19,9	1913	349
	6	0,15	0,185	0,3	230	40	833	0,035	178	7,11	1148	6,117	18,04	11,1	1911	65
Режим 2 Стан 1400, прокатка жести 0,18x1020 мм из подката 2,2x1020 мм [$\sigma_{TE} = 260 + 34,6(100\varepsilon_\Sigma)^{0,6}$] $\varepsilon_\Sigma = 0,918$; $V_{np} = 15$ м/с; $k_q = 0,15$																
1	1	2,20	0,290	0,6	39	137	521	0,049	69	14,15	529	7,641	3,20	42,7	825	106
	2	1,56	0,289	0,3	137	165	620	0,039	96	12,39	603	7,621	4,72	68,4	1782	881
2	3	1,11	0,323	0,3	165	185	687	0,040	123	11,33	662	7,647	4,85	64,6	1733	881
	4	0,75	0,362	0,6	185	199	733	0,045	146	10,23	732	7,639	5,63	56,2	1767	547
3	5	0,48	0,415	0,6	199	208	765	0,045	164	9,19	814	7,636	8,66	46,2	2287	547
	6	0,28	0,359	0,3	208	40	781	0,038	181	7,88	952	7,647	15,01	33,0	3163	110
Режим 3 Стан 1750, прокатка полосы 0,35x1050 мм из подката 1,8x1050 мм [$\sigma_{TE} = 300 + 34,6(100\varepsilon_\Sigma)^{0,6}$] $\varepsilon_\Sigma = 0,805$; $V_{np} = 12$ м/с; $k_q = 0,175$																
1	1	1,80	0,297	0,6	41	162	565	0,049	78	13,23	592	8,218	4,65	40,6	1172	358
	2	1,27	0,330	0,3	162	203	674	0,043	115	12,01	652	8,218	6,94	71,0	2706	1252
2	3	0,85	0,388	0,3	203	235	747	0,044	152	10,93	717	8,223	8,09	67,2	2977	1461
	4	0,52	0,326	0,6	235	40	782	0,047	170	9,09	860	8,206	12,01	57,9	3951	175
Режим 4 Стан 1750, прокатка полосы 0,5x1250 мм из подката 2,0x1250 мм [$\sigma_{TE} = 290 + 34,6(100\varepsilon_\Sigma)^{0,6}$] $\varepsilon_\Sigma = 0,750$; $V_{np} = 10$ м/с; $k_q = 0,175$																
1	1	2,00	0,269	0,6	40	153	539	0,049	74	12,71	546	8,671	4,45	36,2	1115	445
	2	1,46	0,290	0,3	153	190	643	0,042	106	11,57	600	8,679	6,26	72,9	2690	1542
2	3	1,04	0,326	0,3	190	219	714	0,043	137	10,58	655	8,668	7,15	69,8	2941	1760
	4	0,70	0,285	0,6	219	40	751	0,047	157	9,05	766	8,672	10,00	73,1	4300	250

готовой продукции в каждой клетке двухклетевых реверсивных станов применяют, обычно, рабочие валки с разной шероховатостью.

Установлено, что в результате применения рабочих валков в клетках двухклетевых реверсивных станов с разной шероховатостью после каждого пропуска в каждой клетке чередуются условия прокатки «шероховатой полосы» в «гладких валках» и «гладкой полосы» в «шероховатых валках». Это приводит к нестабильности энергосиловых, температурных и кинематических параметров от пропуска к пропуску, и, как следствие, к снижению параметров точности прокатываемых полос. С целью минимизации негативного влияния данной особенности технологии реверсивной прокатки, предложено осуществлять деформацию полосы на двухклетевых реверсивных станах с постоянной силой в обеих клетках во всех пропусках для каждого сорта размера прокатываемых полос.

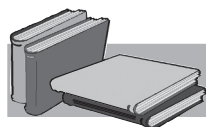
Создана методика расчета режимов деформации и технологических параметров на двухклетевых ре-

версивных станах холодной прокатки, учитывающая особенности реверсивной полосовой прокатки. Впервые в качестве критерия оптимизации при разработке режимов деформации использовано условие постоянства силы прокатки по клеткам и пропускам для каждого сорта размера прокатываемых полос, что обеспечивает более высокую стабильность параметров технологии и показателей точности продукции, выпускаемой на двухклетевых реверсивных станах. Результаты расчетов показали, что предложенная методика расчета режимов деформации на двухклетевых реверсивных станах работоспособна во всем диапазоне условий реализации процесса холодной прокатки, отличается надежностью и удовлетворительной точностью, что дает основание рекомендовать ее для практического применения.

С использованием предложенной методики разработаны режимы деформации при холодной прокатке жести толщиной 0,12 и 0,18 мм и тонких полос толщиной 0,35 и 0,50 мм на двухклетевых реверсивных

станах 1400 и 1750, сооружение которых намечается в Украине. Режимы деформации жести и тонких полос обеспечивают ведение процесса прокатки на этих станах с постоянной силой по клетям и пропу-

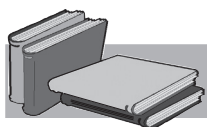
скам и характеризуются удовлетворительным использованием возможностей технологического оборудования.



ЛИТЕРАТУРА

1. The compact cold mill (CCM) // *Steel Times Int.* – 1997. – Vol. 21. – № 2. – P. 38.
2. Хекуэт Р. Новый двухклетевой реверсивный стан холодной прокатки на металлургическом заводе фирмы «Heartland Steel» // *Черные металлы.* – 2000. – сентябрь. – С. 84–88.
3. Рашиников В. Ф., Тахтаутдинов Р. С., Антипенко А. И. и др. Создание и освоение двухклетевого реверсивного стана холодной прокатки // *Сталь.* – 2003. – № 7. – С. 41–45.
4. Бендяев И. И., Дюмлер А., Польстер Р. и др. Современные концепции управления двухклетевым реверсивным станом холодной прокатки // *Сталь.* – 2004. – № 5. – С. 70–72.
5. Василев Я. Д., Путноки А. Ю., Симененко О. В. Современный стан холодной прокатки для комбината «Запорожсталь» // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2007. – № 1. – С. 37–40.
6. Василев Я. Д. Концепция развития и модернизации прокатного производства на ОАО «Запорожсталь» // *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация».* – 2016. – № 6. – С. 25–33.
7. Василев Я. Д., Замогильный Р. А. О создании собственного комплекса для производства жести и тонких холоднокатаных полос высокого качества в Украине // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2018. – № 2. – С. 42–47.
8. Василев Я. Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
9. Василев Я. Д., Самокиш Д. Н., Дементюенко А. В., Завгородний М. И. Единая методика расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки // *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация».* – 2014. – № 1. – С. 50–58.
10. Василев Я. Д., Самокиш Д. Н. Теоретическое обоснование энергосберегающих режимов натяжений на полосовых станах холодной прокатки // Тематический сборник: «Пластическая деформация металлов». – Днепропетровск: ПП «Акцент». – 2014. – Т. 1. – С. 13–17.
11. Кузнецов Л. А. Применение УВМ для оптимизации тонколистовой прокатки. – М.: Металлургия, 1988. – 304 с.
12. Василев Я. Д. Основы теории продольной холодной прокатки. Пластическая деформация металлов. Коллективная монография. – Днепропетровск: ПП «Акцент», 2014. – С. 107–125.
13. Тимошенко Э. В., Самецкий А. А. Синтез систем управления параметрами полос при холодной прокатке. – Киев: НВК КІА, 1999. – 264 с.
14. Василев Я. Д., Самокиш Д. Н., Дементюенко А. В., Завгородний М. И. Экспериментальная проверка точности и работоспособности единой методики расчета, энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки // *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация».* – 2014. – № 2. – С. 65–73.
15. Василев Я. Д. Определение производительности двухклетевых реверсивных станов холодной прокатки // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2012. – № 5. – С. 40–43.

Поступила 04.06.2018



REFERENCES

1. The compact cold mill (CCM). *Steel Times Int.* 1997. Vol. 21. No. 2, p. 38 [in English].
2. Khekuet, R. (2000). New double-stand reversing cold rolling mill at the metallurgical plant of the "Heartland Steel" company [Novyi dvukhkletevoi reversivnyi stan kholodnoi prokatki na metallurgicheskom zavode firmy "Heartland Steel"]. *Chernye metally – Black metals*, September, pp. 84–88 [in Russian].
3. Rashnikov, V.F., Takhtautdinov, R.S., Antipenko, A.I. et al. (2003). Creation and development of a double-stand reverse cold rolling mill [Sozдание i osvoenie dvukhkletevogo reversivnogo stana kholodnoj prokatki]. *Stal' – Steel*, no. 7, pp. 41–45 [in Russian].
4. Bendiaev, I.I., Diumler, A., Pol'ster, R. et al. (2004). Modern concepts of controlling a double-stand cold-rolling reversing mill [Sovremennye kontseptsii upravleniia dvukhkletevym reversivnym stanom kholodnoi prokatki]. *Stal' – Steel*, no. 5, pp. 70–72 [in Russian].
5. Vasilev, Ya.D., Putnoki, A.Yu., Simenenko, O.V. (2007). Modern cold rolling mill for the Zaporozhstal plant [Sovremennyi stan kholodnoi prokatki dlia kombinata "Zaporozhstal"]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, no. 1, pp. 37–40 [in Russian].
6. Vasilev, Ya.D. (2016). The concept of development and modernization of rolling production at JSC "Zaporizhstal" [Kontseptsiiia razvitiia i modernizatsii prokatnogo proizvodstva na OAO "Zaporozhstal"]. *Chernaia metallurgii: Biul. in-ta "Chermetinformatsiia" – Ferrous metallurgy: Bulletin of the Institute "Chermetinformation"*, no. 6, pp. 25–33 [in Russian].

7. Vasilev, Ya.D., Zamogil'nyi, R.A. (2018). On the creation of its own complex for the production of tin and thin cold-rolled strips of high quality in Ukraine [O sozdanii sobstvennogo kompleksa dlia proizvodstva zhesti i tonkikh kholodnokatanykh polos vysokogo kachestva v Ukraine]. *Metallurgicheskaia i gornorudnaia promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, no. 2, pp. 42–47 [in Russian].
8. Vasilev, Ya.D. (1995). Engineering models and algorithms for calculating the parameters of cold rolling [Inzhenernye modeli i algoritmy rascheta parametrov kholodnoj prokatki]. Moscow: Metallurgii, 368 p. [in Russian].
9. Vasilev, Ya.D., Samokish, D.N., Dementienko, A.V., Zavgorodnii, M.I. (2014). A unified methodology for calculating the energy-strength and temperature-velocity parameters of the cold strip rolling process [Edinaia metodika rascheta energosilovykh i temperaturno-skorostnykh parametrov protsessa kholodnoi polosovoi prokatki]. *Chernaia metallurgii: Biul. in-ta "Chermetinformatsiia" – Ferrous metallurgy: Bulletin of the Institute "Chermetinformation"*, no. 1, pp. 50–58 [in Russian].
10. Vasilev, Ya.D., Samokish, D.N. (2014). Theoretical substantiation of energy-saving tension regimes on cold-rolling strip mills [Teoreticheskoe obosnovanie energosberegaiushchikh rezhimov natiazhenii na polosovykh stanakh kholodnoi prokatki]. *Tematicheskii sbornik: "Plasticheskaia deformatsiia metallov. T. 1" – Thematic collection. "Plastic deformation of metals. Vol. 1"*, Dnepropetrovsk: PP "Aktsept", pp. 13–17 [in Russian].
11. Kuznetsov, L.A. (1988). Application of Control Computers to optimize thin-film rolling [Primenenie UVM dlia optimizatsii tonkolistovoi prokatki]. Moscow: Metallurgii, 304 p. [in Russian].
12. Vasilev, Ya.D. (2014). Fundamentals of the theory of longitudinal cold rolling [Osnovy teorii prodol'noi kholodnoi prokatki]. *Plasticheskaia deformatsiia metallov: Kollektivnaia monografiia – Plastic deformation of metals: Collective monograph*, Dnepropetrovsk: PP "Aktsept", pp. 107–125 [in Russian].
13. Timoshenko, E.V., Sametskii, A.A. (1999). Synthesis of control systems for the parameters of strips during cold rolling [Sintez sistem upravleniia parametrami polos pri kholodnoi prokatke]. Kyiv: NVK KIA, 264 p. [in Russian].
14. Vasilev, Ya.D., Samokish, D.N., Dementienko, A.V., Zavgorodnii, M.I. (2014). Experimental verification of the accuracy and efficiency of a single calculation technique, energy-force and temperature-velocity parameters of the cold strip rolling process [Eksperimental'naia proverka tochnosti i rabotosposobnosti edinoi metodiki rascheta, energosilovykh i temperaturno-skorostnykh parametrov protsessa kholodnoi polosovoi prokatki]. *Chernaia metallurgii: Biul. in-ta "Chermetinformatsiia" – Ferrous metallurgy: Bulletin of the Institute "Chermetinformation"*, no. 2, pp. 65–73 [in Russian].
15. Vasilev, Ya.D. (2012). Determination of the productivity of double-strand reversible cold rolling mills [Opredelenie proizvoditel'nosti dvukhkletevykh reversivnykh stanov kholodnoi prokatki]. *Metallurgicheskaia i gornorudnaia promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, no. 5, pp. 40–43 [in Russian].

Received 04.06.2018

Анотація

Я. Д. Василев, д-р техн. наук, професор; **Р. О. Замогильний**, мол. наук. співр., e-mail: rz90@i.ua

Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна

Особливості технології холодної штабової прокатки і розробка методики розрахунку режимів деформації на двохкільтових реверсивних станах

Розглянуто особливості технології та можливі схеми прокатки на двохкільтових реверсивних станах. Показано, що прокатка на цих станах може проводитися за один, два, три або більше пропуски. З метою мінімізації негативного впливу застосування робочих валків в клітях двохкільтових реверсивних станів з різною шорсткістю і, як наслідок, підвищення параметрів точності прокатних ділянок продукції, запропоновано здійснювати процес прокатки кожного сорторозміру на двохкільтових реверсивних станах з постійною силою в обох клітях у всіх пропусках.

З використанням запропонованої методики розрахунку режимів деформації та технологічних параметрів на двохкільтових реверсивних станах холодної прокатки, що враховують особливості реверсивної штабової прокатки, було розроблено режими деформації при холодній прокатці жерсті товщиною 0, 12 і 0, 18 мм, та тонких штаб товщиною 0,35 і 0,50 мм на двохкільтових реверсивних станах 1400 і 1750, будівництво яких намічається в Україні. Вперше в якості критерію оптимізації при розробці режимів деформації було використано умову постійності сили прокатки по клітям та пропускам для кожного сорторозміру прокатних штаб, що забезпечує більш високу стабільність параметрів технології та показників точності продукції, що випускається на двохкільтових реверсивних станах.

Ключові слова

Двохкільтовий реверсивний стан, холодна прокатка, методика, алгоритм, режим деформації, сила.

Summary

Ya. D. Vasilev, Doctor of Engineering Sciences, Professor;
R. A. Zamogil'nyi, Junior Researcher, e-mail: rz90@i.ua

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Peculiarities of cold strip rolling technology and development of the method of calculation for deformation modes on two stand reversing mills

Features of the technology and possible rolling schemes on two stand reversing mills are considered. It is shown that rolling on these mills can be carried out for one, two, three or more passes. In order to minimize the negative impact of the use of work rolls in the stand of double-stand reversible mills with different roughness and, as a result of improving the parameters of product accuracy, it has been proposed to carry out the rolling process of each sorter on double-stand reversible mills with a constant force in both stands in all passes.

Using the proposed method for calculating the deformation modes and technological parameters on double-stand reversing mills taking into account the features of reversible strip rolling, deformation modes were developed for cold rolling of tinplate with a thickness of 0.12 and 0.18 mm and thin strips with thickness 0.35 and 0.50 mm on double-stand reversing mills 1400 and 1750, the construction of which is planned in Ukraine. For the first time, as a criterion of optimization in the development of strain regimes, the condition of the constant rolling strength for the cages and passes for each sorbent size of the rolled strips is used, which ensures a higher stability of the technology parameters and the accuracy indices of the products manufactured on double-stand reversing mills.

Keywords

Two-stand reversing mills, cold rolling, methodology, algorithm, the deformation mode, force.