

УДК 621.771.07/.787.6
DOI

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАБОЧИХ ВАЛКОВ И ПОЛОСЫ В ПРОЦЕССЕ ДРЕССИРОВКИ

Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, e-mail: zviagina_mmf@mail.ru

В работе выполнен теоретический анализ изменения параметров шероховатого слоя рабочего вала дрессировочного стана и полосы в процессе ее дрессировки. Проанализировано изменение параметров шероховатости поверхностей рабочих валков дрессировочного стана, исходя из закономерностей деформации, в местах фактического контакта микронеровностей поверхности рабочего вала с дрессируемой полосой и с опорным валком. Получены математические зависимости между параметрами шероховатого слоя рабочего вала и полосы и количеством дрессируемого металла с учетом их исходной шероховатости, вида обработки, размеров рабочего и опорного валков, режимов дрессировки, условий трения и эргодичности процесса взаимодействия микронеровностей контактирующих поверхностей. Установлено, что на долю износа шероховатости поверхности рабочего вала в контакте с дрессируемым металлом приходится в среднем 40%, а в контакте с опорным валком 60%. Сформулированы ограничения, накладываемые на выполнение операции дрессировки металла, исходя из регламентированных допустимых отклонений параметров шероховатой поверхности дрессируемого металла с учетом условий дрессировки и коэффициента репродукции шероховатости вала на дрессируемой полосе. Полученные результаты могут применяться для прогнозирования износа шероховатости поверхности прокатных валков и холоднокатаной полосы в процессе ее дрессировки.

Ключевые слова: валки, дрессируемая полоса, шероховатость поверхности, коэффициент репродукции

THEORETICAL STUDY OF CHANGES IN THE ROUGHNESS PARAMETERS OF THE SURFACES OF WORKING ROLLS AND STRIPS DURING TRAINING

Zvyagina E.Yu., Ogarkov N.N.

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk,
e-mail: zviagina_mmf@mail.ru

The paper presents a theoretical analysis of changes in the parameters of the rough layer of the working roll of the training mill and the strip during its training. The change in the roughness parameters of the surfaces of the working rolls of the training mill is analyzed, based on the patterns of deformation, at the places of actual contact of the micro-dimensions of the surface of the working roll with the trained strip and with the support roll. Mathematical dependences are obtained between the height parameters of the rough layer of the working roll and strip and the amount of metal being trained, taking into account their initial roughness, the type of processing, the size of the working and support rolls, training modes, friction conditions and the ergodicity of the interaction of the micro-dimensions of the contacting surfaces. It was found that the share of wear of the roughness of the surface of the working roll in contact with the trained metal accounts for an average of 40%, and in contact with the support roll 60%. The restrictions imposed on the performance of the metal training operation are formulated based on the regulated permissible deviations of the height parameters of the rough surface of the trained metal, taking into account the conditions of training and the coefficient of reproduction of the roughness of the roll on the trained strip. The results obtained can be used to predict the wear of the surface roughness of rolling rolls and cold-rolled strips during its training.

Keywords: Rolls, trained strip, surface roughness, reproduction coefficient

Отечественные и зарубежные потребители холоднокатаной полосы контролируют качество шероховатого слоя ее поверхности по параметрам R_a и P_c , которые влияют на штампуемость, оптические свойства, адгезию к лакокрасочному покрытию и зрительное восприятие после окраски [1; 2]. В зависимости от назначения холоднокатаной листовой стали эти показатели строго регламентированы с определенными допустимыми отклонениями их значений. Основной операцией, формирующей требуемые показатели шероховатого слоя холодно-

катаной стали, является прокатка на станах кварто с небольшими обжатиями в шероховатых валках дрессировочного стана с получением на поверхности дрессируемой полосы негативного отпечатка от взаимодействия с шероховатой поверхностью вала.

В процессе дрессировки холоднокатаной стали параметры микрогеометрии шероховатого слоя поверхности валков снижаются по мере их эксплуатации, вследствие смятия и истирания микровыступов при их взаимодействии с контактируемым с ними дрессируемым металлом. Измене-

ний параметра P_c в процессе эксплуатации валков наблюдается в меньшей степени.

Уменьшение параметров микронеровностей поверхности рабочих валков, с учетом репродукции на поверхность деформируемого ими металла, не должно выходить за допустимые пределы, регламентируемые потребителями холоднокатаной полосы. Выход параметров микрогеометрии за пределы допустимых значений влечет за собой перевалку валков [3].

Теоретические исследования изменения параметров шероховатости поверхности валков и дрессируемой ими холоднокатаной полосы сводятся в основном к установлению регрессионных зависимостей параметров шероховатостей от объема дрессируемого металла [4-6]. Универсальные зависимости к настоящему времени отсутствуют. Отсутствуют также данные о вкладе в общий износ шероховатости рабочей поверхности валка, который вносит его контактирование с дрессируемым металлом и с опорным валком.

В настоящей работе проанализировано изменение параметров шероховатости поверхностей рабочих валков дрессировочного стана, исходя из закономерностей деформации, в местах фактического контакта микронеровностей поверхности рабочего валка с дрессируемой полосой и с опорным валком.

Материалы и методы исследования

В процессе дрессировки холоднокатаной полосы на рабочий валок действует давление, определяемое зависимостью [7]:

$$P = \sigma_d \left[\frac{h_0(1-\varepsilon)}{\mu L} \right] \left\{ \exp \left[\frac{\mu L}{h_0(1-\varepsilon)} \right] - 1 \right\}, \quad (1)$$

где P – давление дрессируемого металла на рабочие валки;

σ_d – минимальное давление при дрессировке, необходимое для деформации полосы;

ε – обжатие, выраженное в виде десятичной дроби;

μ – коэффициент трения в очаге деформации, имеющий значение при «сухой» дрессировке 0,25...0,3, а при подаче в зону деформации смазочно-охлаждающей эмульсии принимает значения 0,08...0,12;

h_0 – толщина дрессируемой полосы на входе;

L – длина контакта «валок – дрессируемая полоса», определяемая зависимостью:

$$L = 0,5 \left[R_p \varepsilon \mu + \left\{ (R_p \varepsilon \mu)^2 + 4R_p h_0 \varepsilon \right\}^{\frac{1}{2}} \right], \quad (2)$$

где R_p – радиус рабочего валка.

Минимальное давление при дрессировке, необходимое для деформации полосы, определяется по зависимости [7]:

$$\sigma_d = 1,15(\sigma_s + d \lg 1000 \dot{\varepsilon}) - \sigma_t, \quad (3)$$

где σ_s – предел текучести, определяемый при испытаниях на растяжение;

d – динамический коэффициент, учитывающий влияние скорости при десятикратном увеличении скорости деформации. По данным С.И. Губкина, $d = 1,05...1,10$ [8];

σ_t – растягивающее напряжение в очаге деформации;

$\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации при дрессировке, определяемая как среднее значение по приближенной зависимости:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{R_p \mu}, \quad (4)$$

где V – окружная скорость валка при дрессировке полосы.

Растягивающее напряжение в очаге деформации соответствует напряжению натяжения полосы между дрессировочной клетью и моталкой, принимаемое на практике $\sigma_t = 0,15...0,25\sigma_s$.

Формула (1) характеризует давление, действующее на всей площади контакта валка с дрессируемой полосой без учета реальной площади в местах фактического контакта микронеровностей шероховатостей валка и полосы.

Согласно работе [9], при сближении шероховатых поверхностей фактическая площадь контакта совпадает с площадью сечения микронеровностей, эквивалентной шероховатой поверхности на аналогичном уровне. Поэтому при сближении микровыступов шероховатых поверхностей валка и дрессируемой полосы фактическая площадь определяется опорными кривыми их микропрофилей.

Распределение микровыступов и микровпадин в шероховатом слое регламентируется опорной кривой микропрофиля по ГОСТ 2789-73. Начальный участок этой кривой удовлетворительно описывается уравнением [9]:

$$t_p = b \cdot \eta^v, \quad (5)$$

где η – относительное сближение, определяемое отношением расстояния от линии выступов до сечения профиля к расстоянию между линией впадин и линией выступов профиля поверхности;

t_p – отношение суммы сечений выступов на данном уровне к длине обрабатываемой профиллограммы;

b и v – параметры микрогеометрии поверхности, получаемые в результате обработки профиллограмм.

В соответствии с вышеизложенным реальное давление дрессируемой полосы на валок в местах фактического контакта возрастает до значений:

$$P_r = P / t_p, \quad (6)$$

Параметр t_p , входящий в формулу (6), зависит от величины сближения шероховатостей контактирующих тел η , которая в свою очередь является функцией давления дрессируемой полосы на валок. Для получения замкнутого решения сформируем дополнительное условие, заключающееся в том, что фактическая площадь контакта при высоких давлениях является функцией

$$t_{p_{cp}} = q = \frac{1}{\nu+1} \left(\frac{1}{b}\right)^{\frac{2}{\nu-1}} + 1 - \left(\frac{1}{b}\right)^{\frac{1}{\nu-1}} - \frac{1}{\nu+1} \left[1 - \left(\frac{1}{b}\right)^{\frac{1}{\nu-1}}\right]^2, \quad (8)$$

На поверхности контакта «валок – дрессируемая полоса» во взаимодействии участвуют в равных долях шероховатые слои поверхностей рабочего валка и дрессируемой полосы, поэтому за общее относительное количество их материалов принимаем среднее значение:

$$q_{pn} = (q_p + q_n) / 2, \quad (9)$$

где q_{pn} – среднее значение относительного количества материалов на контакте «рабочий валок – дрессируемая полоса»;

q_p и q_n – соответственно количество материала в шероховатом слое рабочего валка и дрессируемой полосы.

С учетом уравнений (8) и (9) уравнение (6) принимает вид:

$$P_{pn} = P / q_{pn}, \quad (10)$$

С целью упрощения последующих выкладок форму вершин микровыступов шероховатостей контактирующих поверхностей аппроксимируем сферой. Для принятой аппроксимации переход от упругой деформации к пластической происходит в тех местах контакта микровыступов, где нормальное напряжение достигает твердости по шкале Бринелля НВ.

С учетом принятых допущений относительное изменение микрорельефа рабочей поверхности валка в контакте с дрессируемой холоднокатаной полосой описывается зависимостью:

$$\eta = \left(\frac{P}{q_{pn} b_1 HB}\right)^{\frac{1}{\nu_1}}, \quad (11)$$

где $b_1 = (b_p + b_n) / 2$; $\nu_1 = (\nu_p + \nu_n) / 2$;

относительного количества материала в шероховатом слое.

Распределение материала в шероховатом слое описывается уравнением (5) до перегиба опорной кривой микропрофиля и уравнением (7) после перегиба [9]:

$$t_p = 1 - \left\{ (1-\eta)^\nu / \left[1 - \left(\frac{1}{b}\right)^{\frac{1}{\nu-1}}\right]^{\nu-1} \right\}. \quad (7)$$

Среднеинтегральные значения кривых микропрофиля t_p определяют относительное количество материала в шероховатом слое q и рассчитываются по зависимости:

b_p, b_n, ν_p, ν_n – параметры степенной аппроксимации кривой опорной поверхности соответственно для рабочего валка (b_p, ν_p) и полосы (b_n, ν_n).

Дрессировка холоднокатаной полосы обычно реализуется на станах кварто, поэтому шероховатая поверхность рабочего валка находится в контакте с шероховатой поверхностью дрессируемой полосы и с шероховатой поверхностью опорного валка.

Для небольших контактных поверхностей, характерных для сопряжения криволинейных контуров, когда на них волнистость не обнаруживается, контурная площадь принимается равной номинальной [8], и поэтому для расчета контурных давлений в контакте рабочего валка с опорным воспользуемся формулой Герца [10]:

$$P_{co} = \left[\frac{Q_2}{\pi(1-\mu_1^2)} \frac{E_p \cdot E_o (R_p + R_o)}{(E_p + E_o) R_p \cdot R_o} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

где Q_2 – усилие сжатия валков в процессе дрессировки, приходящееся на единицу длины бочки валка;

μ_1 – коэффициент Пуассона;

E_p, E_o – модули упругости материалов рабочего и опорного валков;

R_p, R_o – радиусы контактируемых рабочего и опорного валков.

Учитывая, что рабочие и опорные валки дрессировочных станков изготавливаются стальными, принимаем $\mu_1 = 0,3$ и $E_p = E_o = E$. С учетом принятой зависимости (12) упрощается:

$$P_{co} = 0,418 \left[\frac{Q_2 E (R_p + R_o)}{R_p \cdot R_o} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Считая, что давление дрссируемого металла на рабочие валки полностью передается на опорные валки, и принимая во внимание, что контакт между рабочим и опорным валками происходит через шероховатые слои, давление в местах фактического контакта $P_{рп}$ с учетом формул (1, 2) и подстановкой значения $Q_2 = PL$ в зависимость (13) равно:

$$P_{co} = \frac{0,836}{q_p + q_o} \left[\frac{PLE(R_p + R_o)}{R_p \cdot R_o} \right]^{1/2}, \quad (14)$$

где q_p, q_o – соответственно количество материала в шероховатых слоях рабочего и опорного валков.

Значения величин сближения шероховатостей рабочего валка с дрссируемой полосой $\eta_{рп}$ и с опорным валком $\eta_{ро}$ получим, решая уравнение (5) относительно параметра η с подстановкой соответствующих реальных давлений, действующих в местах фактического контакта:

$$\eta_{рп} = \left(\frac{P}{q_{рп} b_{рп} HB} \right)^{1/v_1},$$

$$\eta_{ро} = \left\{ \frac{0,836}{q_p + q_o} \left[\frac{PLE(R_p + R_o)}{b_2 R_p R_o HB} \right]^{1/2} \right\}^{1/v_2}, \quad (15)$$

где $b_2 = (b_p + b_o) / 2$; $v_2 = (v_p + v_o) / 2$;

b_o, v_o – параметры степенной аппроксимации кривой опорной поверхности опорного валка.

Значения параметров для шероховатых поверхностей рабочих и опорных валков, обработанных различными методами, и дрссируемой полосы приведены в таблице.

Относительные сближения шероховатости рабочего валка представляют собой следующие соотношения

$$\eta_{рп} = \Delta_{рп} / R_{max} \quad \text{и} \quad \eta_{ро} = \Delta_{ро} / R_{max}, \quad (16)$$

где $\Delta_{рп}, \Delta_{ро}$ – абсолютные сближения шероховатости рабочего валка соответствен-

но на контактах с дрссируемой полосой и опорным валком.

С учетом соотношений (16) параметры шероховатости рабочего валка в первом приближении могут быть определены из соотношений:

$$- \text{ для контакта с дрссируемой полосой} \\ R_{max} = R_{max_u} (1 - \eta_{рп}); \quad (17)$$

- для контакта с опорным валком

$$R_{max} = R_{max_u} (1 - \eta_{ро}); \quad (18)$$

или, учитывая, что между R_{max} и R_a существует корреляционная связь, имеем соответственно:

$$R_a = R_{a_u} (1 - \eta_{рп}) \quad \text{и} \quad R_a = R_{a_u} (1 - \eta_{ро}), \quad (19)$$

где R_{max_u} и R_{a_u} – исходные параметры шероховатости поверхности рабочего валка дрссировочного стана перед завалкой его в клеть.

Зависимости (17)-(19) предполагают однократное контактирование каждой микронеровности с дрссируемой полосой и опорным валком. В действительности контактирование микронеровностей в процессе дрссировки полосы включает элементы случайного характера [5; 9; 12], и поэтому процесс следует рассматривать как эргодичный с функцией случайного взаимодействия микровыступов шероховатостей валка при каждом обороте с микровыступами поверхности дрссируемого металла и опорного валка. Очевидно, что вероятность взаимодействия микровыступов поверхности рабочего валка с микровыступами дрссируемого металла и опорного валка возрастает с увеличением длины дрссируемой полосы.

Число оборотов рабочего валка дрссировочного стана в зависимости от длины продрссированной полосы равно:

$$n = l / \pi D, \quad (20)$$

где l – длина продрссированной полосы; D – диаметр рабочего валка.

Значения параметров, определяющих опорные кривые шероховатых поверхностей, сформированных различными способами, и относительное количество металла в шероховатых поверхностях [9; 11]

Вид обработки	R_{max} , МКМ	b	v	q
Шлифование (q_o)	4,7/1,0	1,2/2,4	1,9/1,5	0,402/0,566
Дробеметная (q_p)	8,6/0,8	1,8/3,0	2,0/1,7	0,482/0,576
Электроэрозионная (q_p)	12,1/1,2	2,0/2,9	2,1/1,5	0,489/0,576
Подкат в шлифованных валках (q_p)	2,4/1,1	2,5/3,6	1,6/1,5	0,565/0,584

Вводя параметр вида $\xi^{5000\pi D/l}$ для аппроксимации функции эргодичности, получаем возможность оценивать текущее значение высотных параметров исходной шероховатости рабочего валка для каждого значения длины продрессированной полосы по зависимостям:

- для контакта с дрессируемым металлом:

$$R_{ав} = R_{ав} \left(1 - \xi^{5000\pi D/l} \eta_{рп}\right); \quad (21)$$

- для контакта с опорным валком:

$$R_{ав} = R_{ав} \left(1 - \xi^{5000\pi D/l} \eta_{ро}\right). \quad (22)$$

Параметр ξ , входящий в аппроксимирующую функцию, зависит от конструктивных параметров клетки, профиля и точности настройки валков. Для широкополосных дрессировочных станков $\xi = 10^{-2}$.

Используя принцип аддитивности при изменении исходной шероховатости в результате контактирования микровыступов поверхности рабочего валка с дрессируемым металлом и опорным валком, получаем окончательную зависимость для расчета высотных параметров шероховатости рабочего валка дрессировочного стана в процессе дрессировки металла и параметров шероховатости на поверхности полосы:

$$R_{ав} = R_{ав} \left[1 - \xi^{5000\pi D/l} (\eta_{рп} + \eta_{ро})\right]. \quad (23)$$

$$R_{ап} = R_{ав} \cdot K, \quad (24)$$

где K – коэффициент репродукции шероховатости валка на дрессируемой полосе, определяемый по зависимости [11]:

$$K = \frac{1}{2} \left(\sqrt{b^2 + 4ac} - b \right), \quad (25)$$

где

$$a = 1; \quad b = i + 2; \quad c = i - 1;$$

$$i = \left[\frac{P_{рп} \sqrt{3} \pi}{4\sigma_d (q_p + q_o)} + 2 - \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{S}{h_o} \right) \right]^2,$$

S – шаг микронеровностей.

Полученная зависимость позволяет оценивать высоту микровыступов шероховатой поверхности рабочего валка дрессировочного стана по параметру R_a в процессе дрессировки с учетом его исходной шероховатости ($R_{ав}$), вида обработки (b, v), размеров и физико-механических свойств материала валков (R_p, R_o, HB, E), режимов дрессировки (v, t, ε) и условий трения (μ).

В тех случаях, когда регламентируются допустимые отклонения параметров исход-

ной шероховатости, уравнение (23) позволяет сформулировать условие в виде:

$$R_{ав} \geq R_{ав} \xi^{5000\pi D/l} (\eta_{рп} + \eta_{ро}), \quad (26)$$

где $R_{ав}$ – регламентируемые допустимые отклонения параметра шероховатой поверхности рабочего валка дрессировочного стана при дрессировке нормированного объема холоднокатаной полосы.

Если регламентируются допустимые отклонения параметра R_a шероховатой поверхности дрессируемой полосы, то соотношение (24) сводится к условию:

$$R_{ап} \geq R_{ав} K \xi^{5000\pi D/l} (\eta_{рп} + \eta_{ро}). \quad (27)$$

Поскольку ранее форма вершин микровыступов шероховатостей аппроксимирована сферой, то шаг микронеровностей приближенно может быть оценен по зависимости [13]:

$$S \approx 8,14 R_{ав}^{0,75}. \quad (28)$$

На рисунке 1б приведены расчетные и экспериментальные данные по изменению параметра R_a поверхности металла в зависимости от длины продрессированной полосы.

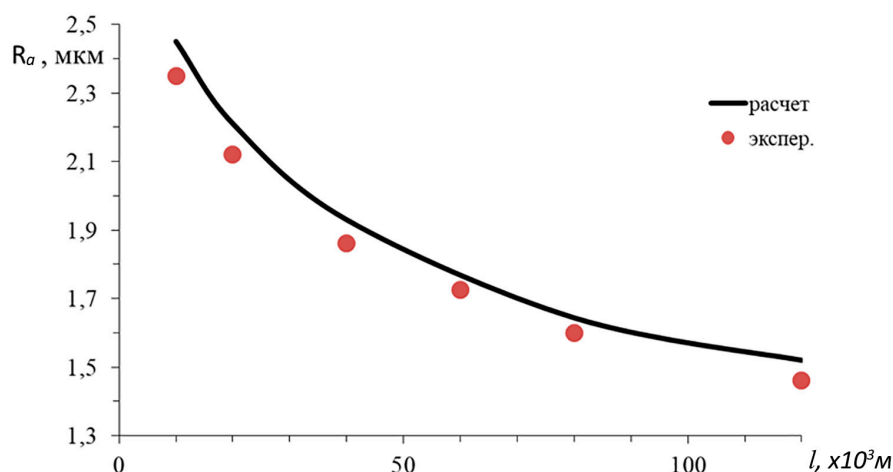
Рисунок 1а иллюстрирует изменение параметра R_a рабочего валка в зависимости от длины дрессируемой полосы. На рисунке 1б приведены расчетные и экспериментальные данные по изменению параметров R_a поверхности металла в зависимости от длины продрессированной полосы.

Результаты исследования и их обсуждение

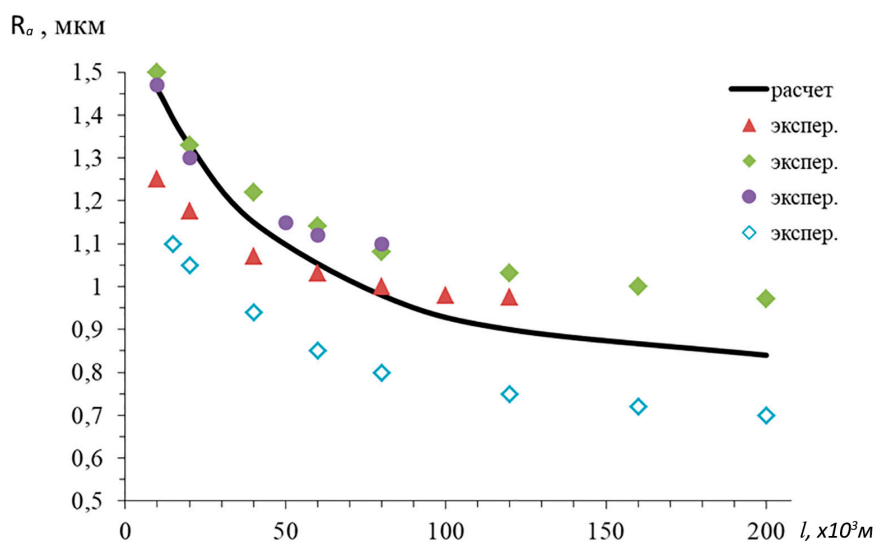
Анализ графиков по изменению параметра R_a рабочей поверхности валков и дрессируемой полосы, приведенных на рисунках 1а и 1б, свидетельствует об удовлетворительной сходимости расчетных и экспериментальных данных. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями параметра R_a не превышает для поверхности валков 5% и для поверхности холоднокатаного металла 13%.

Показано, что снижение параметра R_a шероховатости дрессированной полосы в начальный период ее дрессировки длиной до 40×10^3 м составляет 0,2-0,3 мкм и еще на 0,16-0,33 мкм при дальнейшей дрессировке до 120×10^3 м.

Снижению интенсивности износа в начальный период дрессировки способствует применение холостой обкатки валков перед операцией дрессировки холоднокатаной полосы [16].



а)



б)

Рис. 1. График изменения параметра шероховатости R_a в зависимости от длины продессированной полосы: а) на поверхности рабочего вала; б) на поверхности металла: — — расчетные данные, ●, ● — экспериментальные данные [6], ▲ — экспериментальные данные [14], ◆, ◆ — экспериментальные данные [15]

Установлено, что износ шероховатости поверхности рабочего вала в контакте с опорным валком значительно больше, чем в контакте с дрессировочным металлом.

Применительно к дрессировочному стану 1700 ПАО «ММК» на долю износа шероховатости рабочего вала в контакте с дрессировочным металлом приходится в среднем 40%, а в контакте с опорным валком 60%.

Выводы

В работе представлены результаты теоретического исследования деформирова-

ния поверхностного слоя с формированием требуемой потребителем структуры шероховатости поверхности холоднокатаной полосы, обеспечивающей повышение возможностей пластического формообразования на дальнейших переделах обработки металлов давлением.

Полученные результаты могут применяться для прогнозирования изменения шероховатого слоя на поверхности полосы в процессе ее дрессировки с учетом износа шероховатости поверхности прокатных валков дрессировочного стана.

Список литературы

1. Коль Т., Бретшнайдер М., Клинберг Т., Лютер Ф., Маас Б. Оптимизация поверхности оцинкованной стальной полосы за счет улучшения процесса дрессировки // Черные металлы. 2017. № 8. С. 44-48.
2. Лимарев А.С., Маркварт Т.Ю. Улучшение показателей качества поверхности автомобильного листа // Качество в обработке материалов. 2014. № 2(2). С. 65-69.
3. Польшин А.А., Бельский С.М., Черешнев В.В., Белоусов В.А. Совершенствование технологии производства оцинкованного проката с улучшенной микрогеометрией поверхности в ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» // Производство проката. 2014. № 12. С. 8-12.
4. Тимофеева А.А., Гарбер Э.А. Новая методика моделирования параметров трения в очаге деформации дрессировочного стана // Черная Металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 8. С. 60-64.
5. Румянцев М.И., Ахметкужина И.А. Модель шероховатобразования полосы в очаге деформации при холодной прокатке // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2018. № 24. С. 24-32.
6. Аркулис Г.Э., Куприн М.И., Тихановский М.Г., Девятченко Л.Д., Голев Д.В., Уваровский С.С. Стойкость насечки валков дрессировочного стана // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. 1973. № 5. С. 37-38.
7. Roberts. An approximate theory of temper rolling // Iron and steel engineer yeak book. 1972. P. 530-542.
8. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов: в 3-х томах. М.: Металлургиздат, 1960. Т. 3. 306 с.
9. Огарков Н.Н. Формирование шероховатости проката с высококачественной отделкой поверхности посредством регулирования состояния поверхностного слоя валков: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Магнитогорск, 1996. 24 с.
10. Демидов С.П. Теория упругости. М.: Высшая школа, 1979. 423 с.
11. Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю. Расчет параметров шероховатости при текстурировании поверхности прокатных валков электроэрозионным методом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21, № 2. С. 29-36.
12. Белов В.К., Губарев Е.В. Сравнение микрофотографии автолиста, произведенного по различной технологии // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы 80-й междунар. науч.-техн. конференции. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. 151 с.
13. Armarego E.J.A., Brown R.H. The machining of metais. Prentice-Hall, 1969. 325 p.
14. Горбунов А.В. Совершенствование технологии производства холоднокатаной листовой стали с требуемыми характеристиками микрофотографии поверхности для автомобильной промышленности: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2011. 227 с.
15. Бутылкина Л.И., Нагаев С.А., Рыжков В.В. Шероховатость поверхности холоднокатаных полос // Сталь. 1970. № 2. С. 144-146.
16. Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Козлов А.В. Стабилизация параметров шероховатости рабочих валков дрессировочного стана в процессе холостой обкатки в клетке // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Т. 22, № 1. С. 28-34.