

УДК 621.771.07:621.787.6

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ АВТОМОБИЛЬНОГО ЛИСТА ПРИ ДРЕССИРОВКЕ В ВАЛКАХ ОБРАБОТАННЫХ ДРОБЬЮ

Огарков Н.Н.¹, *д.т.н., профессор кафедры машин и технологий обработки давлением
и машиностроения (ogarkovnikolai@mail.ru)*

Звягина Е.Ю.¹, *к.т.н., старший преподаватель кафедры машин и технологий обработки
давлением и машиностроения (zviagina_mmf@mail.ru)*

Исмагилов Р.Р.², *к.т.н., ведущий специалист управления закупок оборудования
и услуг (ismagilov.rr@mmk.ru)*

¹ **Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова**

(455000, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, ул. Ленина, 38)

² **ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»**

(455026, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, ул. Правды, 27/1)

Аннотация. Представлены способы формирования микрогеометрии поверхности валков дрессировочных станов, обеспечивающих требуемую шероховатость холоднокатаной полосы. Установлено, что при электроэрозионном способе на поверхности валака формируется более равномерная структура, с плавно изменяющимся микрорельефом, по сравнению с механическим воздействием абразива. Рассмотрен наиболее эффективный абразив для формирования микрорельефа на поверхности прокатных валков: литая и колотая стальная дробь. Преимущественно процесс взаимодействия происходит с дробью округлой формы, так как острые грани колотой дроби в процессе работы затупляются. В настоящей работе микровпадина валака аппроксимирована сферической формой. Разработана модель переноса шероховатости валков на полосу с учетом вида обработки валака и условий дрессировки, что позволяет оценить степень заполнения рельефа единичной микровпадины при известных давлении на контакте полосы с валком, коэффициенте трения, параметрах шероховатости валака, режимах дрессировки. Получена количественная оценка репродукции шероховатости валака на дрессируемой полосе, характеризуемая коэффициентом отпечатываемости, который представляет собой отношение глубины затекаемого металла в микровпадину полосы к глубине сферической микровпадины валака. Определены безразмерного давления, необходимого для затекания в нее деформируемого металла, выполнено методом суперпозиций для меридиальных сечений в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Представлены зависимости репродукции микрогеометрии валака дрессировочного стана на прокатываемой полосе от размера дроби, натяжения, высотного параметра шероховатости при дрессировке полос различной толщины, которые могут быть использованы при моделировании процесса переноса микрорельефа валака на прокатываемую полосу.

Ключевые слова: холоднокатаная полоса, прокатный валок, дробь, коэффициент трения, шероховатость, коэффициент отпечатываемости.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-600-605

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В настоящее время требования отечественных и зарубежных предприятий автомобилестроения (Renaul, АВТОВАЗ, Mercedes Benz, BMW, Audi, Volkswagen) к микрогеометрии поверхности автолиста ужесточились. Микрогеометрия поверхности холоднокатаной полосы существенно зависит от микрогеометрии поверхности рабочих валков дрессировочных станов [1 – 6], поэтому проблема формирования шероховатости на поверхности прокатных валков дрессировочных станов и перенос ее на поверхность холоднокатаной полосы являются весьма актуальными.

Из всех способов формирования микрогеометрии поверхности валков дрессировочных станов, обеспечивающих требуемую маслосъемность шероховатых поверхностей холоднокатаной полосы при штамповке деталей, наибольшее распространение полу-

чили два способа: электроэрозионный и дробеметный [7 – 13].

Электроэрозионное текстурирование (ЭРТ) поверхности прокатных валков, используемых на дрессировочном стане, характеризуется меньшей производительностью, но лучшими показателями шероховатости по высотным и шаговым параметрам, применяется преимущественно для лицевых кузовных деталей автомобилей [11 – 14].

Дробеметная обработка (ДМО) характеризуется высокой производительностью и поэтому используется для формирования микрорельефа на поверхности прокатных валков дрессировочных станов для получения требуемой шероховатости автомобильного листа, из которого изготавливают нелицевые детали: пороги, боковины, панели задка, центральные стойки, рамки дверей, внутренние панели дверей, капота и крышки багажника [15 – 18].

На сегодняшний день наиболее эффективным абразивом для обработки поверхности валков являются литая и колотая стальная дробь [19]. Литая дробь имеет круглую форму (рис. 1, а). Колотая дробь характеризуется наличием острых граней, которые в процессе работы затупляются, и формируется рабочая смесь, на 80–85 % состоящая из частиц округлой формы (рис. 1, б).

Таким образом, в процессе ДМО микрорельеф рабочих поверхностей валков формируется преимущественно в результате их взаимодействия с дробью округлой формы, что дает возможность аппроксимировать насеченные дробью микровпадины поверхности валка сферической поверхностью.

В процессе дрессировки холоднокатаной полосы микрорельеф валков репродуцируется на ней в результате частичного или полного заполнения микровпадин поверхности валка деформируемым металлом.

Цель настоящей работы – прогнозирование отпечатываемости микрорельефа поверхности прокатного валка на дрессируемой полосе при известных давлении на контакте полосы с валком, коэффициенте трения, режимах дрессировки.

МЕТОДИКА

Количественную оценку репродукции шероховатости валка на дрессируемой полосе определим через коэффициент K отпечатываемости, который представляет собой отношение глубины y_k затекаемого металла в микровпадину полосы к глубине l сферической микровпадины валка (рис. 2).

Решение плоской задачи для меридионального сечения впадины, моделируемой сферой по определению безразмерного давления $\left(\frac{P_{cp}}{\sigma_s}\right)$, необходимого для затекания в нее деформируемого металла, с учетом работы [19] имеет вид:

$$\frac{P_{cp}}{\sigma_s} = \frac{4}{\sqrt{3\pi}} \left[2 \ln \left(\frac{r}{x_k} \right) - \arcsin \left(\frac{2x_k}{d} \right) + \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{d}{2h} \right) \right], \quad (1)$$

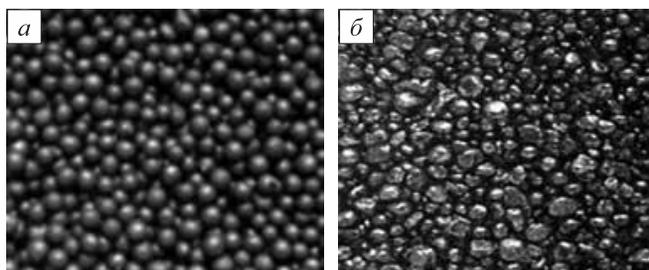


Рис. 1. Дробь диам. 1,4 мм при пятикратном увеличении: а – литая дробь; б – колотая дробь

Fig. 1. Shot \varnothing 1.4 mm at 5-fold magnification: а – cast shot; б – split shot

где x_k – конечное значение координаты x затекаемого металла в меридиональном сечении впадины; d – диаметр отпечатка дробы на поверхности валка; h – толщина дрессируемой полосы.

Между параметрами x_k и y_k имеет место зависимость:

$$x_k = \sqrt{(l - y_k)d}, \quad (2)$$

где l – глубина микровпадины на поверхности валка; y_k – конечное значение координаты y затекаемого металла в меридиональном сечении впадины.

Применяя метод суперпозиции к процессам, протекающим во взаимно перпендикулярных плоскостях, подставляя значение x_k в уравнение (1) и учитывая, что $\frac{y_k}{l} = K$, преобразуем уравнение (1) к следующему виду:

$$\frac{P_{cp}}{\sigma_s} = \frac{8}{\sqrt{3\pi}} \left[2 \ln \left(\frac{r}{\sqrt{(1-K)ld}} \right) - \arcsin \left(\frac{\sqrt{(1-K)ld}}{r} \right) + \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{d}{2h} \right) \right]. \quad (3)$$

Полученное уравнение является трансцендентным по отношению к коэффициенту K отпечатываемости.

Решение выполняем приближенным методом. Разлагая функции \ln и \arcsin в ряды и удерживая только первые члены, получим

$$\frac{P_{cp}}{\sigma_s} = \frac{8}{\sqrt{3\pi}} \left[\frac{2}{\sqrt{1-K}} - 2 - \sqrt{1-K} + \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{d}{2h} \right) \right]. \quad (4)$$

Решая полученное уравнение относительно коэффициента отпечатываемости, получаем приведенное квадратное уравнение:

$$aK^2 + bK - c = 0, \quad (5)$$

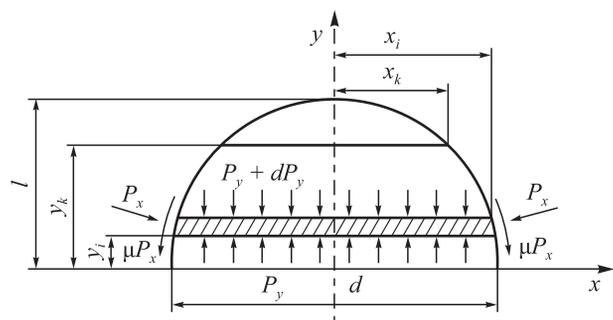


Рис. 2. Схема напряженного состояния дрессируемого металла при затекании его в микровпадину валка при моделировании ее сферической формой (P_x и P_y – давление, соответствующее текущим координатам x_i и y_i)

Fig. 2. Scheme of stressed state of the tempered metal when it flows into the microdepression of the roll during simulation by its spherical shape (P_x and P_y – pressure corresponding to the current x_i and y_i coordinates)

где

$$a = 1; b = \left[\frac{P_{cp} \sqrt{3\pi}}{8\sigma_s} + 2 - \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\sqrt{dl}}{h} \right) \right]^2 + 2;$$

$$c = \left[\frac{P_{cp} \sqrt{3\pi}}{8\sigma_s} + 2 - \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{2\sqrt{dl}}{h} \right) \right]^2 - 1.$$

Из выражения (5) имеем только один положительный корень:

$$K = \frac{1}{2} \left(\sqrt{b^2 + 4ac} - b \right). \quad (6)$$

Безразмерное давление $\frac{P_{cp}}{\sigma_s}$, действующее на валки дрессировочного стана без учета их шероховатостей, определим по зависимости [8]

$$\frac{P_{cp}}{\sigma_s} = \left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_s} \right) \frac{h_0(1-\varepsilon)}{\mu L} \left[\exp \left(\frac{\mu L}{h_0(1-\varepsilon)} \right) - 1 \right], \quad (7)$$

где σ_s – среднее значение предела текучести дрессируемого металла; σ_1 – среднее значение натяжения полосы; μ – коэффициент трения между валком и дрессируемым металлом; L – длина контакта дрессируемой полосы с валком; h_0 – толщина дрессируемой полосы на входе; ε – степень деформации.

Уравнение (7) справедливо при допущении, что нейтральное сечение находится в середине дуги контакта, а толщина прокатываемой полосы от нее до плоскости выхода из очага деформации не изменяется. Ввиду специфики процесса дрессировки металла такие допущения являются обоснованными.

Применительно к процессу «сухой» дрессировки, реализуемой при больших (до $\mu = 0,5$) коэффициентах трения, длина контакта дрессируемого металла с валком согласно исследованиям [18, 19] определяется зависимостью:

$$L = \frac{1}{4} \left[D_b \varepsilon \mu + \sqrt{(D_b \varepsilon \mu)^2 + 8 D_b h_0 \varepsilon} \right], \quad (8)$$

где D_b – диаметр рабочего валка.

Особенностью процесса дрессировки металла является то, что репродукция шероховатой поверхности валка на шероховатой поверхности полосы реализуется в пределах их шероховатых слоев и того «фундамента», на котором они расположены. Принимая во внимание, что несущая способность шероховатых слоев при сближении определяется их опорными поверхностями, закономерность изменения которых зависит от степени участия микронеровностей, допускаем возможность использовать их среднеинтегральные значения [16], характеризующие относительное количество материала в шероховатом слое.

Сближение шероховатых поверхностей валка и дрессируемой полосы приводит к возникновению общей опорной поверхности шероховатых слоев. Допускаем, что общая опорная поверхность определяется соотношением

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2}, \quad (9)$$

где q_1 и q_2 – относительное количество материала в шероховатых слоях валка и полосы [7].

Значения параметра q_1 для различных видов обработки рабочих поверхностей валков дрессировочных станов представлены ниже (в числителе и знаменателе указаны максимальные и минимальные значения величины R_{max}):

R_{max} , мкм	q_1
Дробеметная обработка	
8,6/5,8	0,482/0,538
4,8/3,2	0,503/0,564
1,2/0,8	0,548/0,576
Электроэрозионное текстурирование	
12,1/7,2	0,489/0,543
9,6/4,9	0,533/0,564
4,2/1,2	0,567/0,576

Значения q_1 , представленные для электроэрозионного текстурирования, приведены для сравнения формируемых опорных поверхностей при переносе на дрессируемую полосу. Параметр q_2 , характеризующий количество металла в шероховатом слое полосы при прокатке ее шлифованными валками, составляет 0,43 – 0,59 в зависимости от состояния рабочих поверхностей прокатных валков. Меньшие значения соответствуют шероховатости поверхности полосы, прокатанной изношенными валками.

Фактическое контактное давление шероховатых поверхностей в очаге деформации составляет

$$P_{ш} = \frac{P}{q}. \quad (10)$$

С учетом выражений (9) и (10) безразмерное давление металла на валки дрессировочного стана запишется в следующем виде:

$$\frac{P_{cp}}{\sigma_s} = \left(\frac{\sigma_s - \sigma_1}{q\sigma_s} \right) \frac{h_0(1-\varepsilon)}{\mu L} \left[\exp \left(\frac{\mu L}{h_0(1-\varepsilon)} \right) - 1 \right]. \quad (11)$$

Таким образом, уравнение (6) с учетом зависимостей (7), (8), (11) позволяет рассчитать коэффициент отпечатываемости для различных условий дрессировки металла валками, обработанных дробью.

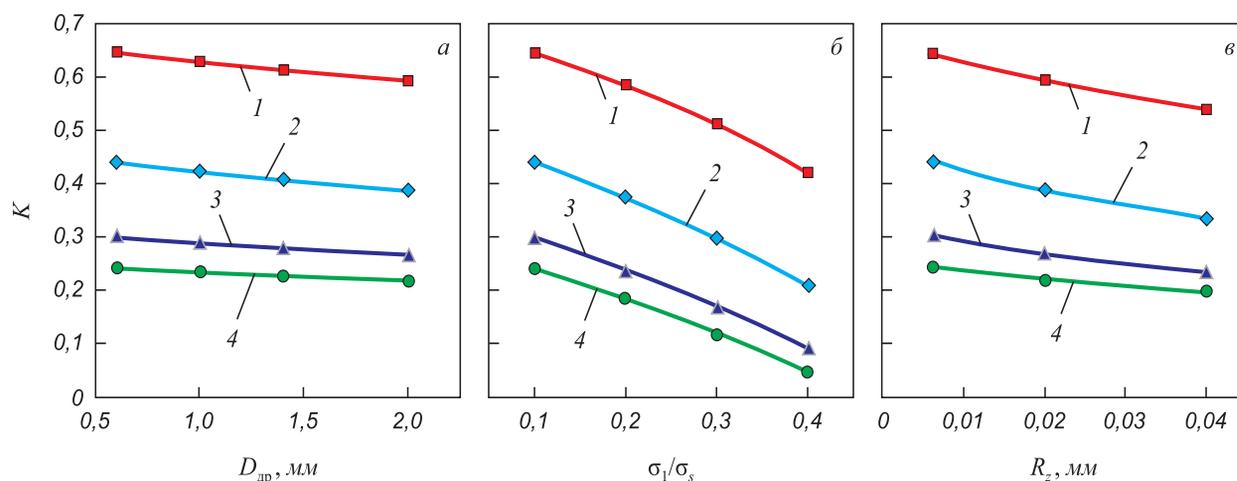


Рис. 3. Зависимость коэффициента отпечатываемости от фракции дроби (а), натяжения (б), параметра шероховатости (в) при $h = 0,6$ (1), 1,0 (2), 2,0 (3) и 3,2 (4)

Fig. 3. Dependence of the roughness ratio on the shot fraction (a), tension (b), roughness parameter (c) at $h = 0,6$ (1), 1,0 (2), 2,0 (3) and 3,2 (4)

На рис. 3 представлена зависимость репродукции микрогеометрии валка дрессировочного стана на прокатываемой полосе от различных факторов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов показывает, что наибольшее влияние на коэффициент отпечатываемости оказывает натяжение, при увеличении которого в четыре раза коэффициент отпечатываемости уменьшается на 38,5 % независимо от толщины полосы. Незначительное влияние на коэффициент отпечатываемости оказывает фракция дроби. При увеличении размеров дроби в 3,3 раза коэффициент отпечатываемости уменьшается на 8 %.

При уменьшении толщины полосы в 5,3 раза коэффициент отпечатываемости на деформируемой полосе увеличивается в 2,6 раза. Соответственно, наиболее полно микрорельеф валка репродуцируется на полосе толщиной 0,6 мм.

Полученные теоретические результаты сравнены с экспериментальными данными, взятыми на ПАО «ММК» в ЛПЦ-5. Экспериментальные значения репродукции микрорельефа варьируются в диапазоне 0,60 – 0,78 при дрессировке тонкой полосы. Расхождение расчетных значений и экспериментальных данных находится в пределах 7 – 17 %, что позволяет сделать вывод об адекватности расчетной модели и возможности принятых допущений.

Выводы

Полученные зависимости позволяют управлять шероховатостью на дрессируемой полосе и могут быть использованы при моделировании процесса формирования микрогеометрии на полосе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Gorbunov A.V., Belov V.K., Begletsov D.O., Sotnikov A.S. Influence of roller treatment on the surface topography of cold-rolled sheet // *Steel in Translation*. 2010. Vol. 40. No. 1. P. 68 – 73.
- Гусев Ю.В., Косоногова С.А., Дубовов Д.А. Оценка микрогеометрии поверхности листа для деталей кузовов автомобилей // *Сталь*. 2001. № 8. С. 84, 85.
- Терентьев Д.В., Огарков Н.Н., Платов С.И., Козлов А.В. Влияние режимов эксплуатации и маслосмочности контактных поверхностей на толщину смазочной пленки в тяжело нагруженных узлах трения металлургических агрегатов // *Черные металлы*. 2018. № 9. С. 60 – 64.
- Tang Jing Gang. Test and analysis on surface roughness and micro-profile of cold-rolled steel sheet // *Iron Steel Vanadium Titanium*. 2004. No. 2. P. 66 – 70.
- Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Залетов Ю.Д., Хоменко Н.Н., Керимова Л.Ф. Повышение плотности пиков микрогеометрии автомобильного листа за счет совершенствования конструкции дробеметной установки // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 12. С. 886 – 890.
- Звягина Е.Ю. Совершенствование оборудования и технологии насечки валков дрессировочных станков дробью для улучшения качества поверхности автолиста: Автореф. дис... канд. тех. наук: 05.02.09. – Магнитогорск, 2017. – 175 с.
- Bocharov Y., Kobayashi S., Thomsen E.G. The Mechanics of the Coining Process. – *Trans. ASME, Series B, J. Eng. Ind.* 1962. Vol. 84. P. 491 – 501.
- Дьяченко В.Ф., Горбунов А.В., Жарков Е.В. и др. Сравнительный анализ микротопографии поверхности оцинкованного проката для лицевых деталей автомобиля // *Производство проката*. 2008. № 10. С. 12 – 17.
- Roberts W.L. An Approximate Theory of Temper Rolling // *Iron and Steel Engineer Year Book*. 1972. P. 530 – 542.
- Мишнев П.А., Адигамов Р.Р., Антонов П.В., Сушкова С.А. Технологические возможности и новые продукты Северстали для автопрома // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2012. № 4. С. 84 – 89.
- Sun Dale, Yao Lisong, Fan Qun etc. Research on Service Performances between Different Textured Cold Rolls // *AIS Tech 2006 Proceedings*. 2006. Vol. II. P. 285 – 289.
- Мухин Ю.А., Рыблов А.В., Бобков Е.Б., Черный В.А. Формирование микрогеометрии поверхности холоднокатаных полос: Учебное пособие. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2014. – 138 с.

13. Rumyantsev M., Belov V., Razgulin I. Prediction model of the flow stress for the computer-aided desing hot rolling sheet and strips pattern // METAL 2015: Conference proceedings. – Ostrava: TANGER Ltd.. 2015. T. 2015. С. 395 – 403.
14. Польшин А.А., Бельский С.М., Мухин Ю.А. Особенности технологии текстурирования рабочих валков станов холодной прокатки // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2017. Т. 33. № 3. С. 36 – 39.
15. Gorbunov A.V., Belov V.K., Krivko O.V., Begletsov D.O. Microtopography of the free surface in trimming // Steel in Translation. 2008. Vol. 38. No. 1. P. 53 – 56.
16. Огарков Н.Н., Залетов Ю.Д., Ласьков С.А., Звягина Е.Ю., Пожидаев Ю.А. Совершенствование дробеметной обработки прокатных валков для производства автомобильного листа // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2010. № 2. С. 41 – 43.
17. Naizabekov A., Lezhnev S., Koinov T., Mazur I., Panin E. Research and Development of Technology for Rolling of High-Quality Plates of Non-Ferrous Metals and Alloys in Relief Rolls // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2016. Vol. 51. No. 4. P. 363 – 370.
18. Rasp W., Wichern C.M. Effects of surface-topography directionality and lubrication condition on frictional behavior during plastic deformation // Journal of material processing technology. 2002. No. 125-126. P. 379 – 386.
19. Borisov S.S., Pogodaev A.K., Mazur I.P. Deformational strip heating effect on the deformation stress of high-strength automotive steels at cold rolling // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2016. Vol. 51. No. 6. P. 715 – 719.
20. Paesold Dieter. Texturiervfahren bei der Herstellung kaltgewalzter Stahlbänder // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2006. Vol. 37. No. 7. С. 619 – 622.

Поступила в редакцию 27 февраля 2019 г.
После доработки 28 марта 2019 г.
Принята к публикации 9 апреля 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 8, pp. 600–605.

THEORETICAL ANALYSIS OF FORMATION OF AUTOMOBILE SHEET ROUGHNESS DURING TEMPER ROLLING IN SHOT-BLASTED ROLLS

N.N. Ogarkov¹, E.Yu. Zvyagina¹, R.R. Ismagilov²

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

²PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works”, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. The methods of microgeometry formation for the surface of temper mills rolls are presented providing the required roughness of the cold rolled strip. It was established that with the electroerosion processing a more uniform structure is formed on the roll surface with a smoothly changing microrelief, compared with the mechanical action of the abrasive. The most effective abrasive for the microrelief formation on the rolls surface is cast and split steel shot. The process of interaction predominantly occurs with round-shaped shot, since the sharp edges of the split shot also become blunt during it. In the present work, the microdepression of the roll is approximated by a spherical shape. A model of roll roughness transfer to the strip was developed taking into account the type of roll processing and tempering conditions, which makes it possible to evaluate the degree of filling of a single microdepression relief at known pressures at contact of the strip with the roller, friction coefficient, roll roughness parameters and tempering modes. A quantitative estimation of reproduction of the roll roughness on the trained strip was obtained, characterized by the roughness ratio, which is the ratio of the depth of the metal flow into the strip microdepression to the depth of the roll spherical microdepression. Determination of the dimensionless pressure required for flowing a deformable metal into it was performed using the superposition method for meridian sections in two mutually perpendicular planes. The reproduction dependencies of the micro-geometry of a temper mill roll on a rolled strip on the shot size, tension, and the height parameter of roughness are presented during the tempering of stripes with various thickness, which can be used to simulate the transfer of the roll micro-relief to the rolled strip.

Keywords: cold rolled strip, mill roll, shot, coefficient of friction, roughness, roughness ratio.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-600-605

REFERENCES

1. Gorbunov A.V., Belov V.K., Begletsov D.O., Sotnikov A.S. Influence of roller treatment on the surface topography of cold-rolled sheet. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 1, pp. 68–73.
2. Gusev Yu.V., Kosonogova S.A., Dubovov D.A. Evaluation of surface microgeometry of sheets for automotive body parts. *Stal'*. 2001, no. 8, pp. 84–85. (In Russ.).
3. Terentyev D.V., Ogarkov N.N., Platov S.I., Kozlov A.V. Effect of operating modes and contact surface oil absorption on lubricant film thickness in heavy-duty friction units of metallurgical plants. *Chernye metallurgiya*. 2018, no. 9, pp. 60–64. (In Russ.).
4. Tang Jing Gang. Test and analysis on surface roughness and microprofile of cold-rolled steel sheet. *Iron Steel Vanadium Titanium*. 2004, no. 2, pp. 66–70.
5. Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu., Zaletov Yu.D., Khomenko N.N., Kerimova L.F. Increasing the density of peaks microgeometry of automobile sheet due to improvement of the shot-blasting unit design. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 12, pp. 886–890. (In Russ.).
6. Zvyagina E.Yu. *Sovershenstvovanie oborudovaniya i tekhnologii nasechki valkov dressirovochnykh stanov drob'yu dlya uluchsheniya kachestva poverkhnosti avtolista: Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* [Improving the equipment and technology of notching the rolls of temper mills by shot to improve the quality of sheet surface: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Magnitogorsk, 2017, 175 p. (In Russ.).
7. Bocharov Y., Kobayashi S., Thomsen E.G. The Mechanics of the Coining Process. *Trans. ASME, Series B, J. Eng. Ind.* 1962, vol. 84, pp. 491–501.
8. D'yachenko V.F., Gorbunov A.B., Zharkov E.V. etc. Comparative analysis of microtopography of galvanized steel surface for the car front parts. *Proizvodstvo prokata*. 2008, no. 10, pp. 12–17. (In Russ.).
9. Roberts W.L. An approximate theory of temper rolling. *Iron and Steel Engineer Year Book*. 1972, pp. 530–542.
10. Mishnev P.A., Adigamov R.R., Antonov P.V. Sushkova S.A. Technological capabilities and new products of Severstal for the automotive industry. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2012, no. 4, pp. 84–89. (In Russ.).
11. Sun Dale, Yao Lisong, Fan Qun etc. Research on service performances between different textured cold rolls. *AIS Tech 2006 Proceedings*. 2006, vol. II, pp. 285–289.
12. Mukhin Yu.A., Ryblov A.V., Bobkov E.B., Chernyi V.A. *Formirovanie mikrogeometrii poverkhnosti kholodnokatanykh polos: Uchebnoe posobie* [Formation of the surface microgeometry of cold-rolled strips: Tutorial]. Lipetsk: Izd-vo Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2014. 138 p. (In Russ.).
13. Rumyantsev M., Belov V., Razgulin I. Prediction model of the flow stress for the computer-aided desing hot rolling sheet and strips pat-

- tern. In: *METAL 2015: Conference proceedings*. Ostrava: TANGER Ltd, 2015, pp. 395–403.
14. Pol'shin A.A., Bel'skii S.M., Mukhin Yu.A. Features of texturing technology for work rolls of cold rolling mills. *Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017, vol. 33, no. 3, pp. 36–39. (In Russ.).
 15. Gorbunov A.V., Belov V.K., Krivko O.V., Begletsov D.O. Microtopography of the free surface in trimming. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 1, pp. 53–56.
 16. Ogarkov N.N., Zaletov Yu.D., Las'kov S.A., Zvyagina E.Yu., Pozhidaev Yu.A. Improving the shot blasting of rolling rolls for the production of automotive sheet. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2010, no. 2, pp. 41–43. (In Russ.).
 17. Naizabekov A., Lezhnev S., Koinov T., Mazur I., Panin E. Research and development of technology for rolling of high-quality plates of non-ferrous metals and alloys in relief rolls. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016, vol. 51, no. 4, pp. 363–370.
 18. Rasp W., Wichern C.M. Effects of surface-topography directionality and lubrication condition on frictional behavior during plastic deformation. *Journal of material processing technology*. 2002, no. 125-126, pp. 379–386.
 19. Borisov S.S., Pogodaev A.K., Mazur I.P. Deformational strip heating effect on the deformation stress of high-strength automotive steels at cold rolling. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016, vol. 51, no. 6, pp. 715–719.
 20. Paesold D. Texturierverfahren bei der Herstellung kaltgewalzter Stahlbänder. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2006, vol. 37, no. 7, pp. 619–622. (In Germ.).

Information about the authors:

N.N. Ogarkov, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Chair of Machinery and Technologies for Pressure Processing and Mechanical Engineering (ogarkovnikolai@mail.ru)

E.Yu. Zvyagina, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Machinery and Technologies for Pressure Processing and Mechanical Engineering (zviagina_mmf@mail.ru)

R.R. Ismagilov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Specialist of the Department of Equipment and Services Procurement (ismagilov.rr@mmk.ru)

Received February 27, 2019

Revised March 28, 2019

Accepted April 9, 2019