

УДК 621.771.07:621.787.6

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ И СТЕПЕНИ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРОКАТНОГО ВАЛКА ПРИ ТЕКСТУРИРОВАНИИ ЕГО ДРОБЬЮ

*Звягина Е.Ю., к.т.н., доцент кафедры «Машины и технологии обработки давлением  
и машиностроения» (zviagina\_mmf@mail.ru)*

*Огарков Н.Н., д.т.н., профессор кафедры «Машины и технологии обработки давлением  
и машиностроения» (ogarkovnikolai@mail.ru)*

*Полякова М.А., д.т.н., профессор кафедры технологий обработки  
материалов (m.polyakova@magtu.ru)*

*Сухова М.Д., магистр кафедры «Машины и технологии обработки давлением  
и машиностроения» (suhova.mash@yandex.ru)*

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, ул. Ленина, 38)

**Аннотация.** Представлен наиболее распространенный способ формирования микрогеометрии поверхности валков дрессировочных станов, обеспечивающий требуемую шероховатость холоднокатаной полосы (дробеметная обработка). Исследования по насечке поверхности проведены на промышленной установке «Виллибратор», металлографические исследования выполнены на оптическом микроскопе MEIJI 2700 и растровом электронном микроскопе JSM-6490LV. Выявлено измельчение структуры поверхностного слоя при взаимодействии материала валка с дробью. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке упрочняющего действия дробеметной обработки (ДМО) на формируемый шероховатый слой прокатного валка. Для теоретического анализа процесса ДМО использован один из методов теории пластичности (метод нижней оценки). Для упрощения математических выкладок микровпадина на валка аппроксимирована сферической поверхностью. Получена количественная оценка степени деформации и глубины упрочненного слоя, которые определяются скоростью дробы и твердостью поверхности валка и твердостью текстурируемой поверхности. При анализе литературных источников установлено, что увеличение твердости на одну единицу влечет повышение стойкости в среднем на 3 %. Применение ДМО позволяет сократить время перевалки валков дрессировочных станов на 6,0 – 10,5 % в зависимости от используемых режимов насечки валков дробью. Повышение твердости поверхностного слоя является следствием измельчения его структуры в процессе взаимодействия с дробью. Выявлено, что увеличение твердости поверхностного слоя приводит к повышению его износостойкости и устойчивой прочности. Установлено, что при скорости 60 м/с твердость повышается примерно на 3,5 единицы.

**Ключевые слова:** дробь, глубина упрочнения, степень упрочнения, дробеметная обработка, твердость, текстурируемая поверхность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-9-735-741

### ВВЕДЕНИЕ

Шероховатость поверхности холоднокатаной полосы устанавливается в зависимости от ее последующего служебного назначения. Регламентируемые параметры шероховатости реализуются на стадии отделочной операции на дрессировочном стане за счет репродукции на поверхности полосы соответствующей шероховатости рабочей поверхности прокатных валков. Одним из наиболее распространенных способов получения соответствующей шероховатости на поверхности валков дрессировочных станов является дробеметная обработка (ДМО) [1 – 7].

Положительной стороной ДМО является то, что она обеспечивает не только геометрические параметры шероховатости, но и за счет локальной пластической деформации оказывает упрочняющее действие на ше-

роховатый слой, способствует повышению сопротивления износа в процессе эксплуатации на дрессировочном стане.

К настоящему времени выполнен комплекс исследований по установлению зависимостей между режимами ДМО и геометрическими параметрами текстурируемой поверхности прокатного валка [4, 8 – 10], но имеются лишь единичные сведения по влиянию режимов ДМО на глубину и степень упрочнения текстурированного слоя при выполнении этой операции.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Металлографические исследования проводили в ресурсном центре нанотехнологий и наноматериалов при Научно-исследовательском институте наносталей Магнитогорского государственного технического уни-

верситета им. Г.И. Носова на оптическом микроскопе MEIJ 2700 (Япония) (увеличение от 500 до 10 000 крат) и растровом электронном микроскопе JSM-6490LV (Япония) (увеличение от 500 до 10 000 крат).

Исследования по насечке поверхности образцов дробью проводили на промышленной дробеметной установке «Виллибратор». Определение глубины упрочнения и степени деформации проводили на дисковых образцах диам. 40 мм, длиной 20 мм из стали марки 9Х2МФ, с которых сошлифовывали часть материала для образования косых срезов после каждого двойного прохода.

В настоящей работе излагаются результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке упрочняющего действия ДМО на формируемый шероховатый слой прокатного вала. Для теоретического анализа процесса ДМО использовали один из методов теории пластичности – метод нижней оценки. Для упрощения математических выкладок форму дробки аппроксимировали сферической поверхностью. Схема взаимодействия дробки с поверхностью вала представлена на рис. 1.

В соответствии с теоремой о нижней границе несущей способности жесткопластического материала допустимое напряженно-деформированное состояние материала вала в зоне контакта с дробью обусловлено напряженным состоянием двух полос [11]. В каждой из полос осуществляется простое сжатие величиной  $2\tau_s$ . В меридиональном сечении зоны контакта дробки с валом напряженные состояния в областях 1 и 2 определяются кругами Мора I и II (рис. 2).

В области 1 нормальные и касательные напряжения равны

$$\begin{aligned} \sigma_\eta &= 2\tau_s \cos^2 \eta; \quad \sigma_\eta + \frac{\pi}{2} = 2\tau_s \sin^2 \eta; \\ \tau_\eta &= \tau_s \sin(2\eta), \end{aligned} \quad (1)$$

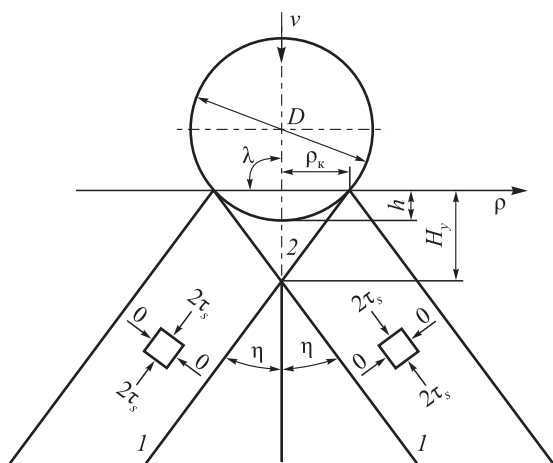


Рис. 1. Моделирование напряженно-деформированного состояния при взаимодействии дробки с поверхностью вала

Fig. 1. Modeling of stress-strain state at grit interaction with the roll surface

где  $\eta$  – угол между направлением полосы 1 и нормальным напряжением  $\sigma_\eta$ ;  $\tau_s$  – предел прочности деформируемого материала на сдвиг, МПа.

Поскольку угол, составляемый полосами 1, равен  $2\eta$ , то максимальное и минимальное главные напряжения в области 2 составят

$$\sigma_{\max} = 4\tau_s \cos^2 \eta; \quad \sigma_{\min} = 4\tau_s \sin^2 \eta. \quad (2)$$

В силу равенства напряженных состояний в полосах 1 направление в области 2 главных напряжений совпадает с биссектрисой угла  $2\eta$  между полосами 1 и нормалью к ней.

Из условия пластичности  $\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\tau_s$  минимальное значение  $\eta = \eta_{\min}$ . При  $\eta = 30^\circ$  в области 2 наибольшие главные напряжения становятся максимальными. При значениях  $\eta > \eta_{\min}$  в области 2 перед дробью появляется жесткая зона.

Нормальные и касательные напряжения на поверхности дробки, соответствующие углу  $\lambda$  на диаграмме Мора, равны

$$\sigma_n = \tau_s (2 + \cos 2\lambda) \tau_n = \tau_s \sin 2\lambda, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – угол между нормалью к биссектрисе угла  $2\eta$  и проекцией поверхности контакта дробки с валком на плоскость, перпендикулярную вектору скорости дробки (рис. 1);  $\tau_n$  – касательные напряжения на поверхности дробки.

Поскольку для лобового удара дробки о поверхность вала  $\lambda = 90^\circ$ , то в соответствии с уравнением (3)  $\sigma_n = 3\tau_s$ ,  $\tau_n = 0$ , то есть  $\sigma_n$  не является функцией от глубины внедрения дробки в поверхность вала. Соответственно усилие  $P$  внедрения дробки в поверхность вала зависит только от проекции площади их контакта на плоскость, перпендикулярную вектору скорости дробки. Проекция площади контакта, в соответствии с принятой формой дробки, является функцией координаты  $\rho$  (рис. 1). Таким образом

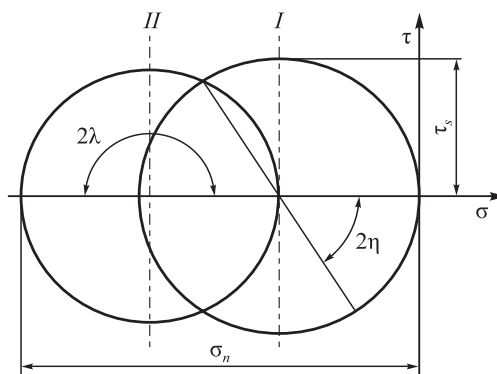


Рис. 2. Круги Мора для плосконапряженного состояния в меридиональном сечении зоны деформирования

Fig. 2. Mohr circles for a plane-stress state in meridional section of deformation zone

$$P = 3\pi\tau_s\rho_k^2, \quad (4)$$

где  $\rho_k$  – радиус отпечатка дроби на поверхности валка.

Выражая  $\rho_k$  через радиус дроби  $R$  и глубину ее внедрения в поверхность валка  $h$  и подставляя выражение  $\rho_k = \sqrt{2Rh}$  в уравнение (4), имеем

$$P = 6\pi\tau_sRh. \quad (5)$$

Поскольку  $P$  и  $h$  связаны линейной зависимостью, то энергия, необходимая для внедрения дроби в поверхность валка на глубину  $h$  с учетом уравнения (5), составит

$$W = 3\pi\tau_sRh^2. \quad (6)$$

Согласно теории пластичности энергия, диссипируемая в очаге деформации, определяется выражением:

$$W = \int_0^\varepsilon \sigma V d\varepsilon, \quad (7)$$

где  $W$  – энергия деформации;  $V$  – объем материала в очаге деформации;  $\sigma$  – действительные напряжения в очаге деформации;  $\varepsilon$  – степень деформации материала.

Решая интеграл применительно к лобовому удару дроби и преобразуя уравнение (7) относительно степени деформации  $\varepsilon$  с учетом формулы (6), получаем

$$\varepsilon = \frac{\pi Rh^2}{V}. \quad (9)$$

Объем смоделированного очага деформации (рис. 1) составляет

$$V = \frac{2}{3}\pi RhH_y, \quad (9)$$

где  $H_y$  – глубина деформации поверхностного слоя валка при внедрении дроби.

При подстановке уравнения (9) в формулу (8) имеем

$$\varepsilon = \frac{3h}{2H_y}. \quad (10)$$

Глубину отпечатка  $h$  определим из условия равенства диссипируемой энергии потере кинетической энергии при ударе дроби о поверхность валка. Потеря кинетической энергии в процессе центрального упругопластического соударения двух тел, одно из которых имеет поступательную скорость равную нулю, и массу, на много порядков большую массы другого тела, применительно к соударению дроби с валком определяется по зависимости [12, 13]

$$W_1 - W_2 = \frac{(1 - \beta^2)mv^2}{2}, \quad (11)$$

где  $W_1$  и  $W_2$  – кинетическая энергия системы в начале и в конце удара;  $m$  – масса дроби;  $v$  – скорость дроби в момент удара о поверхность валка;  $\beta$  – коэффициент восстановления кинетического состояния при ударе (для закаленных поверхностей  $\beta = 0,93 \div 0,95$ ).

Равенство уравнений (6) и (11) с учетом формулы (5) позволяет определить глубину отпечатка дроби на поверхности валка:

$$h = v\sqrt{\frac{(1 - \beta^2)m}{6\pi\tau_s R}}. \quad (12)$$

Выражая массу дроби через ее размеры и плотность материала  $m = \frac{4\pi\gamma_1 R^2}{3g}$  (здесь  $\gamma_1$  – плотность материала дроби, МПа·с<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>), и используя соотношение между единицей массы и единицей силы, преобразуем уравнение (12) к виду:

$$h = 0,47Rv\sqrt{\frac{(1 - \beta^2)\gamma_1}{\tau_s}}. \quad (13)$$

Глубина деформации (рис. 1) поверхностного слоя валка при внедрении в нее дроби составляет

$$H_y = \rho_k \operatorname{ctg} \frac{\pi}{6} = \sqrt{2Rh} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{6}. \quad (14)$$

Подстановка развернутых значений  $h$  и  $H_y$  в уравнение (10) и его преобразование к степенным показателям дает выражение для расчета степени деформации при текстурировании валка методом ДМО:

$$\varepsilon = 0,418v^{0,5} \left[ \frac{(1 - \beta^2)\gamma_1}{\tau_s} \right]^{0,25}. \quad (15)$$

На практике в качестве механической характеристики сопротивления деформации поверхностного слоя материала валка используют показатель твердости. Сопротивление внедрению индентора при динамическом ударе в диапазоне скоростей 10 – 100 м/с с учетом инерционной составляющей определяется зависимостью [14]:

$$HB_d = (HB_c + \gamma_2 v^2 \chi) \left( \frac{v}{v_c} \right)^n, \quad (16)$$

где  $HB_d$  – динамическая твердость материала по Бринеллю при ударе по нему со скоростью  $v$ ;  $HB_c$  – твердость материала по Бринеллю при внедрении в него индентора со скоростью  $v_c$  в процессе статического испытания;  $\gamma_2$  – плотность материала, в который внедряется индентор;  $\chi = \sin^2 \alpha$  – коэффициент сопротивления головной части внедряющегося индентора;  $\alpha$  – угол, со-

ставляемый касательной к поверхности головной части внедряющегося индентора с вектором скорости.

Для колотой дроби  $\alpha = 45 \pm 15^\circ$ , поэтому среднее значение  $\chi$  составляет 0,5. Для литой дроби  $\alpha \approx 90^\circ$  и  $\chi = 1$ .

Принимая для закаленной стали  $\beta = 0,94$  и  $\gamma_1 = = 0,078 \text{ МПа} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$  и учитывая соотношение  $\tau_s = 0,18HB_d$ , получаем

$$\varepsilon \approx 0,2v^{0,5} HB_d^{-0,25}. \quad (17)$$

С учетом функции эргодичности процесса ДМО при повторных проходах факала дроби по поверхности валака запишем окончательно

$$\varepsilon \approx 0,2v^{0,5} HB_d^{-0,25} \xi^n n^{\frac{1}{4n}}, \quad (18)$$

где  $\xi$  – показатель эргодичности процесса;  $n$  – число проходов факала дроби.

Для дробеметной установки фирмы «Виллибратор»  $\xi = 1,02$ .

Применительно к использованию твердости в единицах Шора (HSD) уравнение (16) принимает вид

$$\varepsilon \approx 0,2v^{0,5} (75,75HSD_{исх} - 500)^{-0,25} \xi^n n^{\frac{1}{4n}}. \quad (19)$$

В процессе удара дроби о поверхность валака механическая энергия, затрачиваемая на упругую и пластическую деформации материала валака, преобразуется в тепловую. Поскольку время взаимодействия дроби с валком составляет микросекунды, то процесс перехода механической энергии в тепловую можно считать адиабатическим. Применительно к принятой схеме взаимодействия дроби с валком (рис. 1) прирост температуры в очаге деформации составит

$$\Delta T = \frac{6204\gamma_1^{0,25} HB^{0,75} v^{1,25}}{c\rho},$$

где  $c\rho$  – объемная теплоемкость материала валака.

Применительно к  $c\rho = 5,04 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$  прирост температуры в очаге деформации в момент удара дроби о поверхность валака не превышает  $85^\circ\text{C}$ . Таким образом, деформация поверхностного слоя валака сопровождается только упрочнением без рекристаллизации.

Твердость упрочненной поверхности валака после ДМО определяется по зависимости

$$HB = HB_{исх} (1 + k\varepsilon)^v$$

или в единицах Шора

$$HSD = HSD_{исх} (1 + k\varepsilon)^v,$$

где  $HB_{исх}$  и  $HSD_{исх}$  – исходная твердость поверхности валака перед ДМО по Бринеллю и Шору;  $k$  – коэффи-

циент пропорциональности, учитывающий природу упрочняемого материала (для закаленных сталей  $k = 1$ );  $v$  – показатель степени зависимости упрочнения от степени деформации (для стали марки 9Х2МФ  $v = 0,2$ ).

Глубина упрочненного слоя  $H_y$  определяется из соотношений (13), (14) и (16) с учетом эргодичности процесса:

$$H_y = 0,79Rv^{0,5} (75,75HSD - 500)^{-0,25} \xi^n n^{\frac{1}{4n}}.$$

Прирост твердости при ДМО составляет

$$\Delta_{HSD} = HSD - HSD_{исх}.$$

На рис. 3 показаны влияние скорости полета дроби и количества проходов ее факала на степень деформации. На рис. 4 представлены зависимости глубины

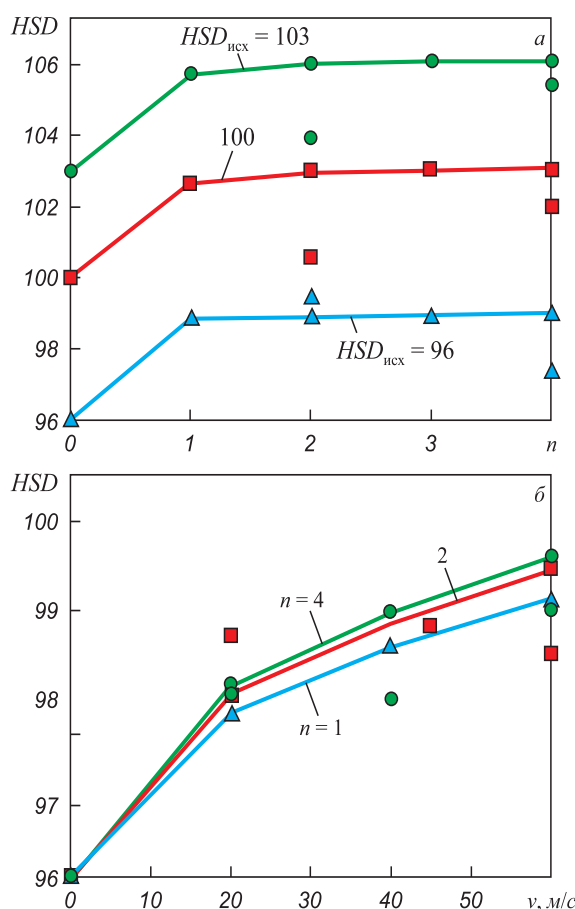


Рис. 3. Зависимость изменения твердости поверхностного слоя от числа проходов факала дроби при скорости ее полета  $v = 40 \text{ м/с}$  и первоначальных значениях твердости  $HSD_{исх}$  96, 100, 103 (а) и от скорости полета дроби при начальной твердости  $HSD_{исх} = 96 \text{ ед.}$  (б):

▲ – эксперим. 1; ■ – эксперим. 2; ● – эксперим. 3

Fig. 3. Dependence of changes in surface layer hardness on: а – the number of passes of grit torch at its speed  $v = 40 \text{ m/s}$  and initial values of hardness  $HSD_{ref} = 96$  (1); 100 (2); 103 (3); б – flight speed of grit with an initial hardness of  $HSD_{ref} = 96$  units: ▲ – experiment 1; ■ – experiment 2; ● – experiment 3

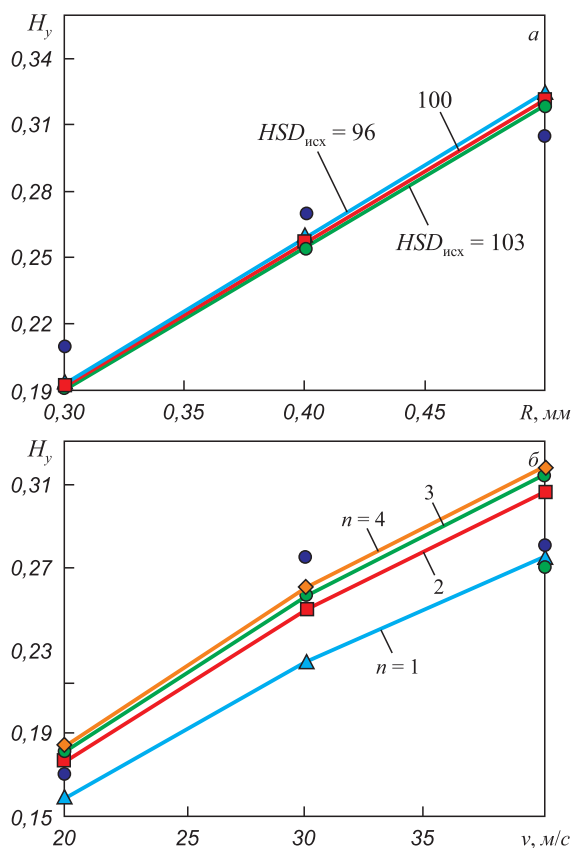


Рис. 4. Зависимость глубины упрочнения от размера дробы при различной исходной твердости поверхности при двойном проходе факела дробы (а) и от скорости полета дробы diam. 0,8 мм при  $HSD = 96$  ед. (б):  
● – эксперим.

Fig. 4. Dependence of hardening depth on:  
а – the size of grit at different initial surface hardness with a double pass of the grit torch; б – flight speed of grit with a diameter of 0.8 mm at  $HSD = 96$  units:  
● – experiment

упрочнения от размера дробы при различной исходной твердости поверхности и скорости полета дробы.

Полученные в настоящей работе результаты коррелируют с результатами исследований в работах [5, 15, 16] применительно к дробеструйной обработке машиностроительных материалов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Степень деформации и упрочнение текстурируемой поверхности вала определяются скоростью дробы и твердостью поверхности вала, но не зависят от фракции дробы. Глубина упрочненного слоя в наибольшей степени определяется размерами используемой дробы, в меньшей степени скоростью соударения дробы о поверхность вала, в наименьшей степени твердостью текстурируемой поверхности.

Например, увеличение радиуса дробы от 0,3 до 0,5 мм (то есть в 1,66 раза) увеличивает прямо пропорционально глубину упрочнения в 1,66 раза. Рост

скорости взаимодействия дробы в три раза приводит к увеличению глубины упрочнения только в два раза. Изменение твердости с 96 до 103 ед. (то есть на 6,8 %) приводит к изменению глубины не более чем на 2 %. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 9,5 %. Полученные в настоящей работе результаты коррелируют с результатами исследований других авторов применительно к дробеструйной обработке машиностроительных материалов.

Из графиков видно, что изменение твердости происходит в основном при первом проходе. Остальные проходы влияют на изменение твердости незначительно. Применение низких скоростей позволяет повысить твердость при двойном проходе на 2 единицы по Шору.

Анализ микроструктуры на оптическом микроскопе MEIJI 2700 и растровом электронном микроскопе JSM-6490LV показывает, что повышение твердости поверхностного слоя является следствием измельчения его структуры в процессе взаимодействия с дробью. Повышение твердости поверхностного слоя обычно приводит к повышению его износостойкости и усталостной прочности [5, 8, 13, 17 – 19]. Применение скорости 60 м/с позволяет повысить твердость примерно на 3,5 единицы. Согласно [20] увеличение твердости на одну единицу влечет к увеличению стойкости в среднем на 3 %. Применение ДМО позволяет сократить время перевалки валков дрессировочных станков на 6,0 – 10,5 % в зависимости от используемых режимов насечки валков дробью.

### Выводы

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования по оценке упрочняющего действия дробеструйной обработки на формируемый шероховатый слой прокатного вала.

Теоретический анализ по упрочнению поверхностного слоя валков в процессе ДМО выполнен с использованием одного из методов теории пластичности (метода нижней оценки). Установлено, что степень деформации и упрочнение текстурируемой поверхности вала определяются скоростью дробы и твердостью поверхности вала, но не зависят от фракции дробы.

Глубина упрочненного слоя в наибольшей степени определяется размерами используемой дробы, в меньшей скоростью соударения дробы о поверхность вала и твердостью текстурируемой поверхности.

Анализ микроструктуры на оптическом микроскопе MEIJI 2700 и растровом электронном микроскопе JSM-6490LV показывает, что повышение твердости поверхностного слоя является следствием измельчения его структуры в процессе взаимодействия с дробью. Повышение твердости поверхностного слоя обычно приводит к повышению его износостойкости и усталостной прочности. Применение скорости 60 м/с позволяет повысить твердость примерно на 3,5 единицы. Увеличе-

ние твердости на одну единицу влечет к увеличению стойкости в среднем на 3 %. Применение ДМО позволяет сократить время переделки валков дрессировочных станков на 6,0 – 10,5 % в зависимости от используемых режимов насечки валков дробью.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bel'skii S.M., Mazur S.I., Mukhin Y.A., Goncharov A.I. Influence of the cross section of hot – rolled steel on the flatness of cold-rolled strip // *Steel in Translation*. 2013. Vol. 43. No. 5. P. 313 – 316.
2. Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Исмагилов Р.Р. Теоретический анализ формирования шероховатости автомобильного листа при дрессировке в валках обработанных дробью // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 8. С. 600 – 605.
3. 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 Магнитогорского Государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2010. № 2 (30). С. 41 – 43.
4. 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. Vol. 125. Special Issue. P. 379 – 386.
5. Лебеденко В.Г. Математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя и параметров упрочнения при обработке деталей дробью // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2008. Т. 8. № 4 (39). С. 202 – 212.
6. Stone M.D. Rolling of Thin Strip. Part 1. – In: *Iron and Steel Engineer Year Book*, 1953. P. 115 – 128.
7. Зык Е.Н. Оценка возможности повышения уровня усталостной прочности деталей в период эксплуатации ударными методами ППД // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 11-1. С. 36 – 40.
8. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Лебеденко В.Г. Исследование параметров качества поверхностного слоя при обработке дробью // *Вестник машиностроения*. 2010. № 2. С. 51 – 54.
9. Дудкина Н.Г., Абраменко С.А., Баринков В.В. Определение толщины упрочненного поверхностного слоя стальных деталей, подвергнутых дробеструйной обработке // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2018. Т. 14. № 12 (168). С. 547 – 549.
10. Utsch M., Vinke P. Roll Texturing Technology as a Base of Modern Surfaces in Automotive Cold Mill Flat Products. – In: *MS&T: Conf. Proc.*, 2004. P. 599 – 607.
11. Джонсон У., Меллор П.Б. Теория пластичности для инженеров / Пер. с англ. А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
12. Shkatov V.V., Pogodaev A.K., Romanenko D.N., Mazur I.P. The influence of nanoscale precipitation of aluminum nitride on the formation of recrystallization texture in aluminum deoxidized low-carbon steels // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017. Vol. 52. No. 4. P. 617 – 620.
13. Ogarkov N.N., Platov S.I., Zvyagina E.Yu., Molochkova O.S., Markarova I.V. Choosing the materials performance and the form of an indenter for arrangement of texture at the surface of skin mill rolls. – In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Article 012195.
14. Shmyrin A.M., Mazur I.P., Kavygin V.V., Yartsev A.G. Parametrical Neighborhood Modelling of the Process of Forming the Temperature of Hot-Rolled Strip Coiling // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016. Vol. 51. No. 4. P. 401 – 404.
15. Roberts W.L. An Approximate Theory of Temper Rolling. – In: *Iron and Steel Engineer Year Book*, 1972. P. 530 – 542.
16. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос. – М.: Теплотехник, 2008. – 608 с.
17. Efremov D.B., Gerasimova A.A., Gorbatyuk S.M., Chichenev N.A. Study of kinematics of elastic-plastic deformation for hollow steel shapes used in energy absorption devices // *CIS Iron and Steel Review*. 2019. Vol. 18. P. 30 – 34.
18. Надежность и долговечность валков холодной прокатки / В.П. Полушин, В.А. Николаев, М.А. Тылкин и др. – М.: Металлургия, 1976. – 448 с.
19. Ogarkov N.N., Platov S.I., Zvyagina E.Yu. Modeling of roll roughness transfer process to strip during skin-pass rolling // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 2. P. 1 – 7.
20. Отений Я.Н., Привалов Н.И., Щеголев Н.Г., Муравьев О.П., Ткачева Ю.О. Особенности формирования глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 12-3. С. 452 – 455.

Поступила в редакцию 19 ноября 2019 г.  
После доработки 26 марта 2020 г.  
Принята к публикации 29 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. No. 9, pp. 735–741.

## ESTIMATION OF DEPTH AND DEGREE OF MILL ROLL SURFACE HARDENING DURING GRIT TEXTURING

*E.Yu. Zvyagina, N.N. Ogarkov, M.A. Polyakova, M.D. Sukhova*

G.I. Novos Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

**Abstract.** The paper presents shot blasting (SB) as the most common method of arrangement of temper mills rolls surface microgeometry, providing required roughness of the cold-rolled strip. The surface riffling studies were carried out at the Willibrator industrial unit; metallographic studies were performed using MEIJI 2700 optical microscope and JSM-6490LV scanning electron microscope. Refinement of the surface layer structure during interaction of the roll material with the grit was revealed. In the work the lower bound method, one of the methods of plasticity theory, is used for theoretical analysis of the SB process. To make computations easier, the roll microcave is approximated to spherical shape. Quantitative estimates of deformation degree and the depth of hardened layer

were determined by speed of the grit and hardness of the roll surface. The depth of hardened layer is obtained by the size of used grit, and to a lesser extent, by the speed of grit impact on the roll surface and textured surface hardness. It has been searched out in literature that increase in hardness by one unit leads in average to 3 % increase in resistance. Thus, SB application allows reduction of time of rolls rehandling of temper mills by 6.0 – 10.5 %, depending on application modes of rolls riffling with grit. Analysis of microstructure have shown that increase in hardness of the surface layer is a consequence of refinement of its structure in process of interaction with the grit. It has been revealed that increase in hardness of the surface layer leads to an increase in its wear resistance and fatigue strength. The authors of the work have found that at speed of 60 m/s the hardness increases by 3.5 units.

**Keywords:** fraction, depth and degree of hardening, shot blasting (SB), hardness, textured surface.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-9-735-741

## REFERENCES

1. Bel'skii S.M., Mazur S.I., Mukhin Y.A., Goncharov A.I. Influence of the cross section of hot – rolled steel on the flatness of cold-rolled strip. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 5, pp. 313–316.
2. Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu., Ismagilov R.R. Theoretical analysis of formation of automobile sheet roughness during temper rolling in shot-blasted rolls. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 8, pp. 600–605. (In Russ.).
3. Ogarkov N.N., Zaletov Yu.D., Las'kov S.A., Zvyagina E.Yu., Pozhidaev Yu.A. Improvement of shot blasting for rolling mill production. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2010, no. 2 (30), pp. 41–43. (In Russ.).
4. 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, vol. 125, Special Issue, pp. 379–386. (In Russ.).
5. Lebedenko V.G. Mathematical modeling of formation of surface layer geometric and hardening parameters at parts grit processing. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2008, vol. 8, no. 4 (39), pp. 202–212. (In Russ.).
6. Stone M.D. Rolling of Thin Strip. Part 1. In: *Iron and Steel Engineer Year Book*. 1953, pp. 115–128.
7. Zyk E.N. Assessment of possibility of increasing fatigue strength level of machine parts during operation by impact SPD methods. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016, no. 11-1, pp. 36–40. (In Russ.).
8. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Lebedenko V.G. Surface-layer quality in shot treatment. *Russian Engineering Research*. 2010, vol. 30, no. 2, pp. 144–148.
9. Dudkina N.G., Abramenko S.A., Barinov V.V. Determination of thickness of hardened surface layer of steel parts subjected to shot blasting. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2018, vol. 14, no. 12 (168), pp. 547–549. (In Russ.).
10. Utsch M., Vinke P. Roll Texturing technology as a base of modern surfaces in automotive cold mill flat products. In: *MS&T: Conference Proceeding*. 2004, pp. 599–607.
11. Johnson W., Mellor P.B. *Engineering plasticity*. London, New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1973, 646 p. (Russ. ed.: Johnson W., Mellor P.B. *Teoriya plastichnosti dlya inzhenerov*. Ovchinnikov A.G. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 567 p.).
12. Shkatov V.V., Pogodaev A.K., Romanenko D.N., Mazur I.P. The influence of nanoscale precipitation of aluminum nitride on the formation of recrystallization texture in aluminum deoxidized low-carbon steels. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017, vol. 52, no. 4, pp. 617–620.
13. Ogarkov N.N., Platov S.I., Zvyagina E.Yu., Molochkova O.S., Makarova I.V. Choosing the materials performance and the form of an indenter for arrangement of texture at the surface of skin mill rolls. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, article 012195.
14. Shmyrin A.M., Mazur I.P., Kavygin V.V., Yartsev A.G. Parametrical neighborhood modelling of the process of forming the temperature of hot-rolled strip coiling. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016, vol. 51, no. 4, pp. 401–404.
15. Roberts W.L. An Approximate Theory of Temper Rolling. In: *Iron and Steel Engineer Year Book*. 1972, pp. 530–542.
16. Kononov Yu.V. *Spravochnik prokatchika. Kniga 2. Proizvodstvo kholodnokatanaykh listov i polos* [Rollerman's Handbook. Book 2. Production of Cold Rolled Sheets and Strips]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 608 p. (In Russ.).
17. Efremov D.B., Gerasimova A.A., Gorbatyuk S.M., Chichenev N.A. Study of kinematics of elastic-plastic deformation for hollow steel shapes used in energy absorption devices. *CIS Iron and Steel Review*. 2019, vol. 18, pp. 30–34.
18. Polukhin V.P., Nikolaev V.A., Tylkin M.A. etc. *Nadezhnost' i dolgovechnost' valkov kholodnoi prokatki* [Reliability and Durability of Rolls for Cold Rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 448 p. (In Russ.).
19. Ogarkov N.N., Platov S.I., Zvyagina E.Yu. Modeling of roll roughness transfer process to strip during skin-pass rolling. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019, vol. 2, pp. 1–7.
20. Otenii Ya.N., Privalov N.I., Shchegolev N.G., Murav'ev O.P., Tkacheva Yu.O. Features of formation of hardening depth at parts processing by surface plastic deformation *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2016, no. 12-3, pp. 452–455. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**E.Yu. Zvyagina**, Cand. Sci. (Eng), Assist. Professor of the Chair “Machinery and Metal Forming Technology and Mechanical Engineering” (zviagina\_mmf@mail.ru)

**N.N. Ogarkov**, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Chair “Machinery and Metal Forming Technology and Mechanical Engineering” (ogarkovnikolai@mail.ru)

**M.A. Polyakova**, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Chair “Materials Processing Technologies” (m.polyakova@magtu.ru)

**M.D. Sukhova**, MA Student of the Chair “Machinery and Metal Forming Technology and Mechanical Engineering” (suhova.mash@yandex.ru)

Received November 11, 2019

Revised March 26, 2020

Accepted June 29, 2020