

В. Л. Мазур /д. т. н./

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина  
Институт технической механики НАН Украины и Национального космического агентства Украины, г. Днепро, Украина

В. И. Тимошенко /д. т. н./

## Формирование микрорельефа поверхности полос при прокатке с применением смазки. Сообщение 2

V. L. Mazur /Dr. Sci. (Tech.)/

Physical-technological institute of metals and alloys of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

V. I. Timoshenko /Dr. Sci. (Tech.)/

Institute of Technical Mechanics of NAS of Ukraine and National Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine

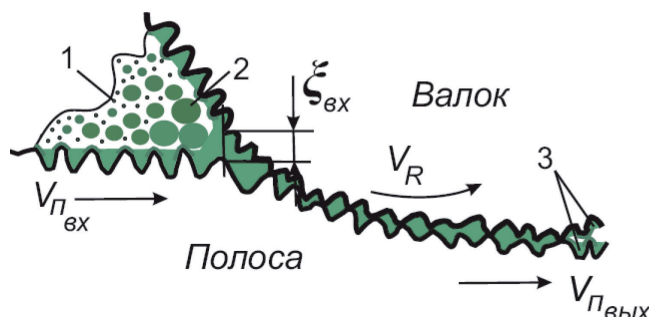
## Formation of surface mount surface microrelifax at rolling with lubrication. Message 2

Рассмотрены механизм и закономерности смазочного действия эмульсий и суспензий при прокатке полос. Раскрыты закономерности влияния смазки, поступающей в очаг деформации при прокатке, на формирование микрорельефа прокатываемого металла. Проанализированы экспериментальные результаты. Даны рекомендации по использованию теоретических решений при выборе технологической смазки и режимов прокатки для обеспечения заданных требований к качеству поверхности готовой металлопродукции. (Ил. 2. Библиогр.: 17 назв.)

**Ключевые слова:** металл, качество, поверхность, микрорельеф, прокатка, смазка, эмульсия, суспензия.

**Формирование микрорельефа поверхности полос при прокатке с применением технологической смазки в виде эмульсий и суспензий.** На рис. 1 представлена модель механизма формирования микрорельефа поверхности полос в процессе их прокатки в шероховатых валках при использовании эмульсии в качестве технологической смазки. На рисунке показано, что в зоне входа смазочной среды в очаг деформации масляная фаза адсорбируется в микровпадинах поверхностей валков и полосы, заполняя их полностью или частично. Микроуглубления в шероховатом слое поверхностей валков и прокатываемого металла являются своего рода микрорезервуарами, в которых смазка механическим путем вносится в очаг деформации.

Влияние этого фактора отчетливо проявляется как при использовании в качестве технологической смазки масел, так и эмульсий, суспензий. Этот вывод подтверждается результатами многочисленных экспериментов. Например, в работе [8, с. 152-153] приведены результаты экспериментов, которые засвидетельствовали, что повышение исходной шероховатости поверхности полос от  $Ra = 0,06$  мкм до  $Ra = 1,3$  мкм при прокатке в



**Рис. 1. Схема очага деформации при прокатке полос в шероховатых валках с применением эмульсии в качестве технологической смазки:** 1 – дисперсионная фаза (вода); 2 – дисперсная фаза (масло); 3 – адгезировавшееся на поверхностях валков и полосы масло;  $\xi_{вх}$  – толщина слоя смазки во входном сечении очага деформации;  $V_R$  и  $V_{П}$  – скорости поверхностей валков и прокатываемого металла

гладких валках со смазкой вязкостью 0,086 Рс существенно увеличивает толщину смазочной пленки в очаге деформации от  $\xi \approx 0,15$  мкм до  $\xi \approx 0,7$  мкм (почти в ~5 раз) при скорости прокатки  $V_R = 0,2$  м/с. С увеличением скорости прокатки до  $V_R = 2$  м/с существенного различия в толщине

смазки уже не наблюдается  $\xi = 1,5-1,7$  мкм. Таким образом, при низкой скорости прокатки вовлечение смазки в очаг деформации происходит в основном путем её захвата микронеровностями поверхности полосы. С возрастанием скорости прокатки на поступление смазки в очаг деформации превалирующее влияние оказывает уже гидродинамический эффект. При этом степень заполнения смазочной средой микровпадин рельефа поверхности рабочих валков и толщина адгезировавшегося на поверхности слоя смазки являются стабильными, поскольку валки работают практически в стационарном режиме.

Заполнение микровпадин поверхности полосы при её движении к очагу деформации постепенно увеличивается по мере выделения масляной фазы из эмульсии под влиянием возрастающего в ней давления. Постепенно возрастает также и толщина адгезировавшегося на поверхности слоя, как в случае шероховатой, так и при гладкой поверхности полосы, независимо от того, смазкой является эмульсия или суспензия (см. рис. 1 в Сообщении 1<sup>1</sup>).

Примерно 0,7–0,9 объема микровпадин занимают застойные зоны смазки, и только её верхний пограничный слой вовлекается в область гидродинамического течения. При прокатке со смазкой в виде суспензий в микровпадины поверхности валков и полосы попадают, кроме масла, ещё и частицы твердой фазы, которые влияют на формирование микрорельефа прокатываемого металла.

В процессе прокатки полос с шероховатой поверхностью гладкими валками смазка, «запертая» в микроуглублениях, затрудняет смятие микровыступов поверхности. Причем жидкое масло частично выжимается валками из микроуглублений поверхности прокатываемых полос. Твердые частицы остаются в микровпадинах и, вдавливаясь в деформируемый металл, увеличивают шероховатость поверхности. Подобная картина наблюдается и в случаях применения в качестве технологической смазки веществ с очень высокой вязкостью. Попадая в очаг деформации в большом объеме, высоковязкая смазка, не обладающая высокой текучестью, вдавливается в поверхность деформируемого металла, увеличивая его шероховатость.

Наглядным примером, иллюстрирующим отмеченную закономерность, служат приведенные в работах [12–14] результаты исследования микрорельефа поверхности холоднокатаных труб из коррозионно-стойких сталей 08X18H10T и 03X17H14M3, а также из сплава Zr1Nb. Величина

шероховатости поверхности труб, предназначенных для транспортирования сверхчистых газов в пищевой и электронной промышленности, для изготовления тепловыделяющих элементов (ТВЕЛ) атомных электростанций, не должна превышать  $Ra \leq 0,3-1,6$  мкм. Применение при холодной прокатке технологической смазки на основе высоковязких полимеров и хлорпарафинов приводило к увеличению шероховатости наружной поверхности труб до  $Ra = 2,9-4,8$  мкм и внутренней – до  $Ra = 5,9-6,3$  мкм. Исключение полимеров из состава смазочной среды обеспечило в трубах первого холодного передела микрорельеф наружной поверхности в пределах  $Ra = 0,9-1,8$  мкм, внутренней –  $Ra = 0,8-1,5$  мкм. Шероховатость поверхности готовых труб размером  $9,13 \times 0,7$  мм из сплава Zr1Nb, предназначенных для изготовления оболочек ТВЕЛ, была в пределах  $Ra = 0,4-0,6$  мкм [12].

При прокатке шероховатыми валками сравнительно гладких полос с целью придания поверхности прокатанного металла заданного микрорельефа его формирование происходит по иной схеме. В таких условиях при прокатке с применением в качестве смазки эмульсий микронеровности поверхности валков превышают толщину смазочной пленки, образующейся в очаге деформации. Крупные микровыступы валков «прошивают» слой смазки и внедряются в поверхность прокатываемого металла. Глубина их внедрения зависит, во-первых, от степени заполнения микровпадин шероховатости поверхности рабочих валков и, во-вторых, от величины контактных напряжений в очаге деформации. Точнее, от коэффициента напряженного состояния, представляющего собой отношение величины контактного давления к величине вынужденного предела текучести деформируемого металла. Чем больше толщина слоя смазки в очаге деформации, чем больший объем смазки поступает в зону контакта валков с деформируемым металлом, тем слабее шероховатость валков переносится на поверхность прокатываемых полос.

В случаях, когда исходная шероховатость полосы соизмерима по величине с шероховатостью валков рассмотренные выше схемы объединяются и дополняются механизмом взаимодействия микронеровностей обеих поверхностей.

*Влияние микрорельефа поверхностей валков и прокатываемого металла на условия трения в очаге деформации.* Смазка в очаге деформации выполняет одновременно несколько функций. Кроме заполнения микровпадин шероховатости

<sup>1</sup>Мазур В. Л. Формирование микрорельефа поверхности полос при прокатке с применением смазки. Сообщение 1 / В. Л. Мазур, В. И. Тимошенко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2017. – № 5. – С. 36–41.

валков и создания разделительной прослойки между поверхностями валков и прокатываемого металла, смазка определяет величины коэффициента трения и контактных напряжений в очаге деформации, решающим образом влияющих на формирование микрорельефа полос. Микрорельеф поверхностей валков и полосы наряду с толщиной слоя смазки определяет протяженность участков граничного и жидкостного трения, а также участков, на которых микровыступы поверхности валков «пропахивают» поверхность деформированного металла. В итоге определяют режим трения в очаге деформации при прокатке.

Схема, иллюстрирующая влияние микрорельефа поверхности валков, прокатываемого металла и технологической смазки на распределение нормальных  $\rho$  и касательных  $\tau$  напряжений в очаге деформации представлена на рис. 2. Направление сил трения на поверхностях валков и полосы на рис. 2 выбрано применительно к зоне отставания в очаге деформации. Суть подхода к анализу условий трения при прокатке со смазкой не изменяется, если рассматривать зону опережения и стрелки на схеме направить в противоположную сторону. Отношение суммы длин  $b_i$  участков граничного трения к длине  $l_D$  дуги контакта характеризует степень превалирования режимов жидкостного или граничного трения в очаге деформации. На участках  $b_i$  граничного трения валок и деформируемый металл разделены прослойкой смазки, адгезировавшейся на их поверхностях.

Предложенная на рис. 2 модель трения в очаге деформации подобна моделям, рассмотренным в монографиях [15, с. 117-126; 16, с. 138]. Заметим, что автор работы [16] коэффициент трения на участках  $b_i$  называет коэффициентом микротрения и обозначает  $f_{\text{микро}}$ . На участках, где смазка разделяет поверхности валков и полосы, коэффициент трения обозначает  $f_{\text{жидро}}$ . Вычисления величины  $f_{\text{жидро}}$  для двух типичных примеров процесса холодной прокатки (1 – исходная толщина полосы  $h_{\text{вх}} = 1,3$  мм, после прокатки  $h_{\text{вых}} = 1$  мм, скорость прокатки  $V_R = 10$  м/с, давление  $p = 1000$  Н/мм<sup>2</sup>, вязкость смазки  $\mu = 10$  мПа·с, средняя толщина смазочного слоя в микровпадинах на участках жидкостного трения  $\xi_{\text{ср}} = 0,5$  мкм;  $2-h_{\text{вх}} = 1,5$  мм;  $h_{\text{вых}} = 1$  мм;  $V_R = 30$  м/с;  $p = 500$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\mu = 100$  мПа·с;  $\xi_{\text{ср}} = 0,2$  мкм) показали [16, с. 140], что в первом примере  $f_{\text{жидро}} = 0,00002$ , во втором  $f_{\text{жидро}} = 0,005$ . Т. е., значения  $f_{\text{жидро}}$  в десять и более раз меньше, чем  $f_{\text{микро}}$ . Эти результаты еще раз подтверждают справедливость сделанных ранее [15, с. 123] выводов, что для условий холодной прокатки тонколистовой стали допустимо принимать  $f \approx f_{\text{ср}} \cdot l_{\text{ср}} / l_D$ .

В слоях смазки, находящейся в образованных неровностями рельефа поверхностей валков и

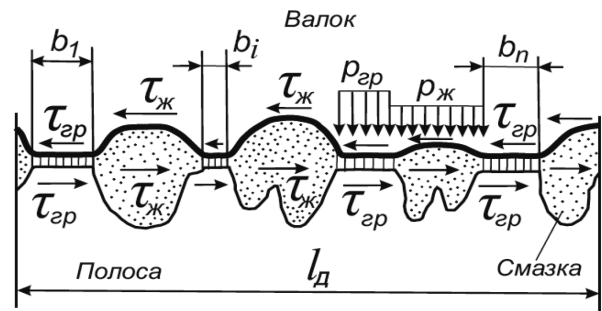


Рис. 2. Схема распределения нормальных  $\rho$  и касательных  $\tau$  контактных напряжений на участках граничного и жидкостного трения в очаге деформации:  $b_1, \dots, b_i, \dots, b_n$  – протяженность отдельных участков граничного трения;  $i$  – номер участка;  $n$  – количество участков;  $l_D$  – длина очага деформации; индексы:  $gr$  – граничное;  $ж$  – жидкостное

полосы микрорезервуарах, величина касательных напряжений согласно закону трения Ньютона равна  $\tau_{ж}(x) = \mu \frac{du}{dy}$ , где  $\mu$  – динамическая вязкость смазки,  $u$  – проекция вектора скоростей её движения на ось  $x$ . Оси  $x$  и  $y$  направлены вдоль оси прокатки и перпендикулярно контактирующим поверхностям валков и полосы (на рис. 2 эти оси показаны). На поверхности валка  $\tau_{ж} = -\mu \cdot \frac{V_R - V_x}{\xi} - \frac{1}{2} \xi \frac{dp}{dx}$ . На поверхности полосы  $\tau_{ж} = \mu \cdot \frac{V_R - V_x}{\xi} - \frac{1}{2} \xi \frac{dp}{dx}$ . Здесь  $\xi$  – толщина слоя смазки,  $V_R$  и  $V_x$  – скорости поверхностей валков и полосы [7].

Полная сила трения  $T$  и полное усилие  $P$  прокатки полосы единичной ширины равны, соответственно,  $T = \tau_{gr} l_{gr} + \tau_{ж} l_{ж}$ , где  $l_{gr}$  – протяженность всех участков граничного трения  $l_{gr} = \sum_{i=1}^{i=n} b_i$ ;  $l_{ж}$  – протяженность участков жидкостного трения  $l_{ж} = l_D - l_{gr}$ . С учетом этих выражений коэффициент внешнего трения  $f = \frac{T}{P} = \frac{\tau_{gr} l_{gr} + \tau_{ж} l_{ж}}{p_{gr} l_{gr} + p_{ж} l_{ж}}$ . При подходе, предложенном в работе [16, с. 207], макроскопический коэффициент трения (в нашем толковании коэффициент внешнего трения в очаге деформации) равен  $f(x) = \bar{l}_{gr}(x) \cdot f_{\text{микро}} + [1 - \bar{l}_{gr}(x)] \cdot f_{\text{жидро}}(x)$ . Здесь  $\bar{l}_{gr} = l_{gr} / l_D$ . Анализ последних зависимостей показывает, что коэффициент трения  $f$  при прокатке со смазкой в условиях, когда поверхности валков и полосы имеют развитый микрорельеф, является функцией площади фактического контакта поверхностей. Прежде всего  $f$  зависит от отношения фактической площади контакта поверхностей валков и полосы, где  $\tau = \tau_{gr}$ , к номинальной площади очага деформации, поскольку  $\tau_{gr} \gg \tau_{ж}$ .

В представленной на рис. 2 схеме без особых сложностей может быть учтено также взаимодействие, непосредственный контакт имеющихся на поверхностях валков и деформированного металла микронеровностей. В этом случае зависимость полной силы трения должна быть дополнена слагаемым, учитывающим компонент удельной силы, обусловленной сопротивлением на сдвиг металла деформируемых микронеровностей полосы. Таким образом в общем случае при прокатке со смазкой в шероховатых валках полос с шероховатой поверхностью полная сила трения  $T$  определяется суммой составляющих, которые отражают вклад элементов граничного и жидкостного трения и сил, обусловленных механическим взаимодействием контактирующих микронеровностей валков и деформируемого металла.

**Технические приложения.** Применительно к рассматриваемой теме наибольшее количество исследований и публикаций выполнены в области производства холоднокатаной листовой стали, в частности автомобильного листа [17], предназначенного для изготовления деталей кузова автомобилей методом холодной штамповки. Требования к шероховатости поверхности холоднокатаной тонколистовой стали, научные основы технологии производства проката с заданной шероховатостью поверхности, способы обеспечения требований к микрорельефу, опыт промышленных предприятий в решении этой проблемы достаточно подробно рассмотрены в названных выше статьях и книгах [1–4, 15 и др.]. Вопросы обеспечения сравнительно гладкой поверхности металлопродукции из черных и цветных металлов, освещены в технической литературе в меньшей мере. Поэтому ниже акцентируем внимание именно на задаче минимизации микронеровностей поверхности металла, прокатываемого с технической смазкой.

Сразу же отметим, что в условиях процесса прокатки, осуществляемого в режиме жидкостного трения, когда поверхности валков и полосы разделены устойчивым смазочным слоем, формирование микрорельефа поверхности прокатываемого металла происходит по схеме «свободной» деформации его поверхностных слоев. В таких условиях смазка не ограничивает свободное перемещение зерен поверхностных слоев металла, и это отражается на микрорельефе его поверхности. Результирующее состояние поверхности определяется размером зерен в структуре прокатываемого металла, степенью деформации при прокатке, количеством смазки в очаге деформации и ещё рядом факторов [4; 7; 15]. Прокатка с полным разделением поверхностей валков и полосы в промышленной практике листопрокат-

ного производства, где технологической смазкой служит эмульсия, наблюдается редко. Но подобные условия довольно часто возникают, как было отмечено выше, при холодной прокатке труб с использованием в качестве смазки высоковязких сред, в том числе суспензий, в зоне контактирования их внутренней поверхности с оправкой. При неудовлетворительном состоянии микрорельефа поверхности металла в подобных случаях решение состоит в замене смазки на менее вязкую, но обеспечивающую низкие значения коэффициента трения и содержащую противозадирные добавки.

При производстве тонколистовой низкоуглеродистой стали, предназначенной для изготовления панелей кузова автомобилей, задача технологов состоит в создании шероховатости величиной  $Ra = 0,8-1,6$  мкм на поверхности полос при минимизации энергосиловых параметров процесса прокатки и соблюдении ряда технологических ограничений. Напротив, при производстве тонколистовой нержавеющей стали в большинстве заказов требуется обеспечить зеркальную поверхность полос с возможно меньшей шероховатостью. В этих условиях подбор технологической смазки играет решающую роль, поскольку увеличение толщины смазочной пленки в очаге деформации ухудшает гладкость поверхности и её блеск. Например, при прокатке полос из нержавеющей стали, содержащей 17 % Cr, с исходной шероховатостью поверхности  $Ra = 0,04$  мкм в валках с зеркальной поверхностью  $Ra = 0,025$  мкм увеличение вязкости технологической смазки ухудшало блеск поверхности полос тем сильнее, чем выше была скорость прокатки [8, с. 155–169]. Причиной являлось увеличение количества смазки, поступающей в очаг деформации, и, как следствие, возрастание протяженности участков с гидродинамическим режимом трения. Таким образом, при производстве нержавеющей тонколистовой стали с зеркальной поверхностью выбранные вязкость технологической смазки, скорость прокатки и степень обжатия полосы за проход должны минимизировать поступление смазки в очаг деформации. При этом рабочие валки должны иметь полированную поверхность с шероховатостью  $Ra \approx 0,1$  мкм.

### Библиографический список / References

1. Мазур В. Л. Шероховатость тонколистовой стали: требования и технология производства / В. Л. Мазур // Сталь. – 2012. – № 1. – С. 29–33.  
Mazur V. L. *Sherokhovatost' tonkolistovoy stali: trebovaniya i tekhnologiya proizvodstva*. *Stal'*. 2012, no. 1, pp. 29–33.
2. Мазур В. Л. Научные основы технологии производства проката с заданной шероховато-

стью поверхности / В. Л. Мазур // Сталь. – 2015. – № 5. – С. 59–66.

Mazur V. L. *Nauchnye osnovy tekhnologii proizvodstva prokata s zadannoy sherokhovatost'yu poverkhnosti* // *Stal'*. 2015, no. 5, pp. 59-66.

3. Мазур В. Л. Обеспечение требований к микрорельефу тонколистовой холоднокатаной стали / В. Л. Мазур // Сталь. – 2007. – № 12. – С. 35–39.

Mazur V. L. *Obespechenie trebovaniy k mikrorel'efu tonkolistovoy kholodnokatanoy stali*. *Stal'*. 2007, no. 12, pp. 35-39.

4. Отделка поверхности листа / В. И. Мелешко, А. П. Чекмарев, В. Л. Мазур, А. П. Качайлов. – М.: Металлургия, 1975. – 272 с.

Meleshko V. I., Chekmarev A. P., Mazur V. L., Kachaylov A. P. *Otdelka poverkhnosti lista*. – Moscow, Metallurgiya Publ. 1975, 272 p.

5. Белов В.К. Профили поверхности: монография / В.К. Белов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – 260 с.

Belov V. K. *Profili poverkhnosti*. Magnitogorsk, GOU VPO "MG TU" Publ. 2007, 260 p.

6. Грудев А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.

Grudev A. P., Zil'berg Yu. V., Tilik V. T. *Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem: spravochnik*. Moscow, Metallurgiya Publ. 1982, 312 p.

7. Мазур В. Л. Теория прокатки (гидродинамические эффекты смазки) / В. Л. Мазур, В. И. Тимошенко. – М.: Металлургия, 1989. – 192 с.

Mazur V. L., Timoshenko V. I. *Teoriya prokatki (gidrodinamicheskie efekty smazki)*. Moscow, Metallurgiya Publ. 1989, 192 p.

8. Azushima A. Tribology in Sheet Rolling Technology / A. Azushima // Springer International Publishing Switzerland. – 2016. – 304 p.

Azushima A. *Tribology in Sheet Rolling Technology*. Springer International Publishing Switzerland. 2016, 304 p.

9. Lo S.-W. The lubricity of oil in water emulsion in cold strip rolling under mixed lubrication / S.-W. Lo, T.-C. Yang, H.-S. Lin // Tribology International. – 2013. – № 66. – P. 125–133.

Lo S.-W., Lo S.-W., Yang T.-C., Lin H.-S. *The lubricity of oil in water emulsion in cold strip rolling under mixed lubrication*. Tribology International. 2013, no. 66, pp. 125-133.

10. Мазур В. Л. Механизм смазочного действия эмульсий при прокатке: научные основы, результаты экспериментов, промышленная практика / В. Л. Мазур, В. И. Тимошенко // Сталь. – 2017. – № 7.

Mazur V. L., Timoshenko V. I. *Mekhanizm smazochnogo deystviya emul'siy pri prokatke: nauchnye*

*osnovy, rezul'taty eksperimentov, promyshlennaya praktika*. *Stal'*. 2017, no. 7.

11. Виноградов Г. А. Прокатка металлических порошков / Г. А. Виноградов, Ю. Н. Семенов, О. А. Катрус, В. П. Каташинский. – М.: Металлургия, 1969. – 382 с.

Vinogradov G. A., Semenov Yu. N., Katrus O. A., Katashinskiy V. P. *Prokatka metallicheskih poroshkov*. Moscow, Metallurgiya. 1969, 382 p.

12. Буряк Т. Н. Формирование качественной поверхности труб из коррозионно-стойких сталей и сплавов / Т. Н. Буряк, В. С. Вахрушева, А. А. Тараненко // Сталь. – 2009. – № 8. – С. 57–60.

Buryak T. N., Vakhrusheva V. S., Taranenko A. A. *Formirovanie kachestvennoy poverkhnosti trub iz korrozionno-stoykikh staley i splavov*. *Stal'*. 2009, no. 8, pp. 57-60.

13. Кузнецов Д. Е. Механизм формирования внутренней поверхности труб в процессе холодной прокатки / Д. Е. Кузнецов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – № 2. – С. 43–50.

Kuznetsov D. E. *Mekhanizm formirovaniya vnutrenney poverkhnosti trub v protsesse kholodnoy prokatki*. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2012, no. 2, pp. 43-50.

14. Кузнецов Е. Д. Закономерности формирования микрорельефа внутренней поверхности труб при холодной прокатке / Е. Д. Кузнецов, Д. Е. Кузнецов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – № 2. – С. 50–55.

Kuznetsov E. D., Kuznetsov D. E. *Zakonomernosti formirovaniya mikrorel'efa vnutrenney poverkhnosti trub pri kholodnoy prokatke*. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2012, no. 2, pp. 50-55.

15. Мазур В. Л. Производство листа с высококачественной поверхностью / В. Л. Мазур. – К.: Техника, 1982. – 165 с.

Mazur V. L. *Proizvodstvo lista s vysokokachestvennoy poverkhnost'yu*. Kyiv, Tekhnika Publ. 1982, 165 p.

16. Pawelski Hartmut. Interfection between mechanics and tribology for cold rolling of strip with special emphasis on surface evolution / Hartmut Pawelski // Technische Universität Bergakademie Freiberg. – 2004. – 335 с.

Pawelski Hartmut. *Interfection between mechanics and tribology for cold rolling of strip with special emphasis on surface evolution*. Technische Universität Bergakademie Freiberg. 2004, 335 p.

17. Беняковский М. А. Производство автомобильного листа / М. А. Беняковский, В. Л. Мазур, В. И. Мелешко. – М.: Металлургия, 1979. – 256 с.

Benyakovskiy M. A., Mazur V. L., Meleshko V. I. *Proizvodstvo avtomobil'nogo lista*. Moscow, Metallurgiya Publ. 1979, 256 p.

*The mechanism and regularities of the lubricating action of emulsions and suspensions during the rolling of strips are considered. The regularities of the influence of the lubricant entering the deformation center during rolling are revealed on the formation of the microrelief of the rolled metal. The experimental results are analyzed. Recommendations are given on the use of theoretical*

*solutions in the selection of process lubrication and rolling regimes to meet specified requirements for the quality of the surface of finished metal products.*

**Key words:** metal, quality, surface, microrelief, rolling, lubrication, emulsion, suspension

**Поступила 17.07.2017**



УДК. 621. 771. 01

Наука

**О. П. Максименко /д. т. н./, Е. В. Кузьмин**

Днепровский государственный технический университет, г. Днипро, Украина  
e-mail: zhenya.kuzmin@gmail.com

## **Саморегулирование процесса с учётом внутренних продольных сил при прокатке в проволочном блоке**

**О. P. Maksimenko /Dr. Sci. (Tech.)/, E. V. Kuzmin**

Dniprovskiy State Technical University, Dnipro, Ukraine  
e-mail: zhenya.kuzmin@gmail.com

## **Self-regulation of the process taking into account internal longitudinal forces during rolling in a wire block**

**Цель.** На основе определения внутренних продольных сил пластически деформируемого металла и константы непрерывной прокатки дать оценку продольной устойчивости процесса.

**Методика.** Режимы прокатки рассчитаны с использованием методики, предложенной в работе [5].

**Научная новизна.** Применение средней результирующей продольных сил для расчета геометрических, силовых и кинематических параметров процесса в проволочном блоке.

**Практическая значимость.** Определение границ саморегулирования процесса прокатки при внешнем воздействии на объект. (Табл. 4. Библиогр. 7 назв.)

**Ключевые слова:** саморегулирование, продольная устойчивость, проволочный блок.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Как известно, эффективным регулятором равновесия сил в очаге деформации при внешнем воздействии является угол нейтрального сечения  $\gamma$ . В случае колебания каких-либо параметров возникает корректировка скоростного режима, что автоматически приводит к новому устойчивому, равновесному состоянию металла в валках. Теоретически, процесс саморегулирования сохраняется вплоть до выклинивания зоны опережения из очага деформации. Вместе с тем опыты [1; 2] показывают, что равновесие сил в зоне пластической деформации может нарушаться, с последующей частичной или полной пробуксовкой полосы в валках, при наличии зоны опережения. Аналогичный вывод получен теоретически на основе анализа взаимодействия контактных и внутренних сил в очаге деформа-

ции [3; 4]. Поэтому предел возможного саморегулирования устойчивого процесса прокатки не всегда ограничивается условием  $\gamma = 0$ . Важную роль при оценке предельных условий прокатки играет результирующая продольных сил пластически деформируемого металла  $Q_{\text{ср.пр}}^*$  [4]. Эта результирующая, являясь силой сопротивления, всегда должна быть направлена противоположно движению полосы. На основе анализа силы  $Q_{\text{ср.пр}}^*$  в работе [5] предложена оценка продольной устойчивости полосы в валках, которая сводится к следующему: при отрицательном значении этой силы процесс совершается устойчиво, без частичных пробуксовок, при нулевом её значении прокатка ведётся в предельных условиях, при положительном – процесс невозможен.

**Постановка задачи.** Аналитически исследовать границы саморегулирования процесса про-