

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗЕРВА СИЛ ТРЕНИЯ НА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА

Фастыковский А.Р.¹, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (omd@sibsisu.ru)

Базайкин В.И.¹, д.т.н., профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» (bazaykin@yandex.ru)

Евстифеев В.В.², д.т.н., профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» (VladEvst@mail.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет
(644080, Россия, Омск, пр. Мира, 5)

Аннотация. Процесс прокатки реализуется за счет мощности, подводимой в очаг деформации благодаря использованию контактных сил трения. Процесс прокатки происходит в две стадии: захвата и установившегося процесса. Определяющей возможностью деформирования в валках является стадия захвата. В этот период втягивающие силы трения используются с максимальной отдачей. Основной процесс прокатки проходит на установившейся стадии, где возможности контактного трения не используются в полном объеме. Создается резерв сил трения, который и можно использовать для повышения эффективности процесса прокатки. Для уравнивания избыточных сил трения на контактной поверхности в очаге деформации при установившемся процессе появляются зоны опережения и прилипания. Протяженность этих зон характеризует величину избыточных сил трения. Приведены теоретические зависимости для определения зон скольжения и прилипания, учитывающие многообразие факторов при прокатке. Предложен показатель оценки возможностей резерва сил трения на установившейся стадии. Предложена зависимость для его определения. Аналитически установлено, что на установившейся стадии прокатки на гладких валках при соотношениях $\alpha/\mu_3 = 1$ за счет имеющегося резерва сил трения можно подвести энергию в 1,7 – 2,0 раза большую, чем на стадии захвата при меньших соотношениях α/μ_3 . При использовании калиброванных валков эти цифры еще больше. Приведена зависимость, по которой можно определить дополнительную мощность, обеспеченную резервом сил трения. Показаны перспективные направления использования резерва сил трения на установившейся стадии процесса прокатки для повышения его эффективности. На примере прокатки в приводной – не приводной клетки установлено увеличение коэффициента полезного действия (КПД) процесса прокатки при более полном использовании возможностей сил трения на стадии установившейся прокатки. Приведены теоретические зависимости для определения КПД при обычном процессе прокатки и при более полном использовании резерва сил трения.

Ключевые слова: прокатка, резерв контактных сил трения, зона прилипания, повышение эффективности, коэффициент полезного действия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-810-815

ВВЕДЕНИЕ

Особенность процесса прокатки заключается в том, что необходимая для деформирования энергия подводится к заготовке валками. Подводимая мощность зависит от силы трения на контактной поверхности очага деформации при прокатке. В процессе заполнения очага деформации горизонтальная составляющая контактных сил трения, втягивающих металл в сужающееся пространство между валками, постоянно меняется в большую сторону до достижения стадии установившегося процесса. За счет разных углов приложения равнодействующих сил трения на стадиях захвата и установившегося процесса прокатки возникает избыток (резерв) втягивающих сил трения, который уравнивается зоной опережения и переходной зоной прилипания,

которая уменьшает площадь [1]. Таким образом, зоны опережения и прилипания характеризуют резерв сил трения. Для оценки протяженности зон отставания ($\gamma_{от}$), опережения ($\gamma_{оп}$) и прилипания ($\gamma_{пр}$) можно воспользоваться полученными уточненными зависимостями [2].

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ

ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗЕРВА СИЛ ТРЕНИЯ НА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ УСТАНОВИВШЕЙСЯ СТАДИИ ПРОКАТКИ

Целью настоящей работы является оценка перспективности использования резерва сил трения на контактной поверхности очага деформации стадии установившейся прокатки.

Для достижения поставленной цели были проведены аналитические исследования, базирующиеся на основополагающих принципах теории обработки металлов давлением и экспериментальная проверка.

Оценим перспективность использования резерва контактных сил трения. Для этой цели введем понятие показатель K_N возможностей очага деформации и определим количественно его значения:

$$K_N = \frac{N_y}{N_d}, \quad (1)$$

где N_y – мощность, которую валки могут подвести в очаг деформации при полном использовании сил трения, кВт; N_d – мощность, необходимая для деформирования, кВт.

Мощность, необходимую для деформирования полосы прямоугольного сечения в гладких валках, можно найти, используя формулу С. Финка [3, 4].

Мощность, которую валки могут подвести в очаг деформации, найдем по формуле:

$$N_y = 2p_{cp}\mu_y b_{cp} l_d v, \quad (2)$$

где p_{cp} – среднее нормальное давление, МПа; μ_y – коэффициент трения на установившейся стадии процесса прокатки; b_{cp} – средняя ширина полосы, мм; l_d – длина дуги захвата, мм; v – скорость прокатки мм/с.

Заменяем в выражении (2) коэффициент μ_y трения на стадии установившейся прокатки на коэффициент μ_3 трения при захвате. Для этого воспользуемся известными результатами исследований А.П. Грудева [5, 6], согласно которым при горячей прокатке соотношение $\frac{\mu_3}{\mu_y} \approx 1,2, \dots, 1,4$. Подставив соответствующие зависимости в уравнение (1), после преобразований с учетом замены μ_y на μ_3 получим показатель K_N :

$$K_N = \frac{\mu_3 l_d}{0,65 h_{cp} \ln \frac{h_0}{h_1}}, \quad (3)$$

где h_{cp} – средняя высота полосы, мм; h_0 и h_1 – высота полосы до и после деформации, мм.

Проведем аналитические исследования зависимости (3). Обычно на практике при определении максимально допустимых обжатий рекомендуется принимать значение $\alpha/\mu_3 = 0,9 - 0,8$, тем самым обеспечивая стабильный захват. При проектировании калибровок величина α/μ_3 зачастую бывает меньше 0,8, что вызвано условиями заполнения калибров, необходимостью получения заданного профиля и другими причинами. На рис. 1 приведены результаты аналитических исследований с использованием зависимости (3), показателя использования возможностей очага деформации от величины α/μ_3 и коэффициента трения при захвате. Резуль-

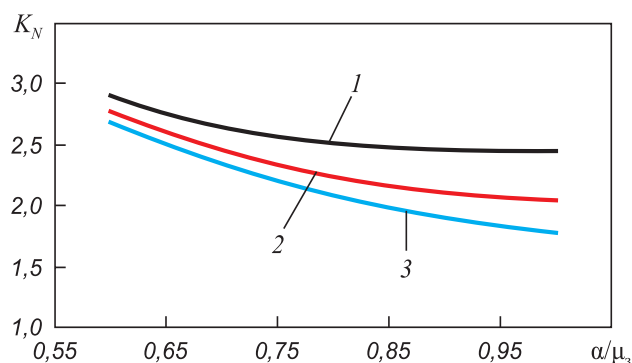


Рис. 1. Аналитические исследования влияния отношения α/μ_3 на показатель возможностей очага деформации K_N :

1 – прямоугольный калибр ($\mu_3 = 0,45$);
2 и 3 – гладкие валки ($\mu_3 = 0,45$ и $\mu_3 = 0,25$)

Fig. 1. Analytical study of the effect of α/μ_3 on indicator of deformation hearth capabilities K_N :

1 – rectangular gauge ($\mu_3 = 0,45$);
2 and 3 – smooth rolls ($\mu_3 = 0,45$ and $\mu_3 = 0,25$)

таты исследований подтверждают, что наиболее полно силы трения на контакте используются при величине $\alpha/\mu_3 = 1$. Однако при этом показатель $K_N = 1,7 - 2,0$, т.е. за счет полного использования сил трения можно подвести в очаг деформации энергию в 1,7 – 2,0 раза большую, чем возможно из условий захвата, и применить ее для повышения эффективности процесса прокатки за счет увеличения обжатия или совмещения различных процессов с использованием неприводных устройств.

С уменьшением величины α/μ_3 показатель K_N увеличивается, достигая в исследуемом диапазоне 2,8. При прокатке в прямоугольном калибре показатель K_N в 1,20 – 1,35 раза больше, чем при прокатке в гладких валках в сопоставимых условиях, что объясняется увеличением активной площади очага деформации за счет боковых стенок калибра. Согласно полученным результатам на стадии установившейся прокатки имеется большой неиспользованный потенциал сил трения на контактной поверхности очага деформации, который можно реализовать для интенсификации процесса прокатки. Дополнительная мощность ΔN , которая обеспечивает полное использование сил трения, можно определить по формуле:

$$\Delta N = N_y - N_d = p_{cp} v b_{cp} \left(1,54 \mu_3 l_d - h_{cp} \ln \frac{h_0}{h_1} \right). \quad (4)$$

Проведенные аналитические исследования показали перспективность использования контактных сил трения на стадии установившейся прокатки для повышения эффективности процесса, особенно при деформировании в калиброванных валках с высокими коэффициентами трения.

Использовать резерв силы трения на установившейся стадии процесса прокатки можно либо при увели-

чении обжатия (прокатка с поджатием), либо за счет выполнения дополнительных операций в неприводных устройствах, установленных в непосредственной близости за прокатными валками: деформирование в неприводных валках [7], продольное разделение неприводными устройствами [8 – 10], прокатка – прессование [11 – 16].

Использование резерва сил трения на установившейся стадии процесса прокатки для выполнения дополнительных операций с использованием неприводного инструмента позволит повысить КПД процесса формоизменения.

Для оценки эффективности использования резерва сил трения сравним КПД при обычном процессе прокатки и при более полном использовании сил трения на примере дополнительной деформации в неприводных валках. Для обычного случая прокатки КПД (η) можно найти как отношение мощности N_d , необходимой для деформирования, к мощности N_b , подводимой валками в очаг деформации:

$$\eta = \frac{N_d}{N_b}. \quad (5)$$

Мощность, подводимую валками в очаг деформации, можно найти по формуле, приведенной в работе [17].

Подставляя в уравнение (5) зависимости из работ [3, 4, 17], после преобразований получим уравнение для определения КПД обычного процесса прокатки:

$$\eta = \frac{(h_1 + R\gamma_{он}^2) \ln \frac{h_0}{h_1}}{2R\mu_y(\alpha - \gamma_{пр} - \gamma_{он})}, \quad (6)$$

где R – радиус валков, мм; α – угол захвата, рад.

КПД оборудования главной линии прокатного стана при использовании резерва сил трения для дополнительной деформации в неприводных валках ($\eta_{ин}$) можно найти по формуле:

$$\eta_{ин} = \frac{N_d + N_{пн}}{N_b}, \quad (7)$$

где $N_{пн}$ – мощность, затраченная на дополнительную деформацию в неприводных валках, Вт.

Мощность $N_{пн}$ можно определить при решении уравнения энергетического баланса мощностей при прокатке с передним подпором [18 – 20]:

$$N_b - N_d - N_{тр} - N_{пн} = 0, \quad (8)$$

где $N_{тр}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в очаге деформации, Вт.

После решения уравнения энергетического баланса получим:

$$N_{пн} = \frac{2\mu_y p_{cp} v h_{cp} b_{cp} R}{h_1 + R\gamma_{он}^2} \left\{ (h_1 + R\gamma_{пр}^2) \times \right. \\ \times \sqrt{\frac{1}{Rh_1}} \left[\arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} - \arctg \left(\sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma_{пр} \right) \right] + \\ \left. + (h_1 + R\gamma_{он}^2) \sqrt{\frac{1}{Rh_1}} \arctg \sqrt{\frac{R}{h_1}} \right\} - p_{cp} v h_{cp} b_{cp} \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (9)$$

где Δh – абсолютное обжатие, мм.

Углы, характеризующие протяженность зон скольжения и прилипания с учетом более полного использования контактных сил трения при деформировании в неприводных валках, можно найти последующим формулам:

$$\gamma_{от} = \frac{b_1}{b_{cp}} \gamma_{он} + \frac{\alpha^2 p_{cp}}{2\tau_{cp}} \pm \frac{Q_p}{2\tau_{cp} R b_{cp}}; \quad (10)$$

$$\gamma_{пр} = \alpha - \left(1 + \frac{b_1}{b_{cp}} \right) \gamma_{он} + \frac{\alpha^2 p_{cp}}{2\tau_{cp}} \pm \frac{Q_p}{2\tau_{cp} R b_{cp}}; \quad (11)$$

$$\gamma_{он} = \left\{ k_1 - \sqrt{[k_1]^2 - 4 \frac{b_1}{b_{cp}} \left(1 + \frac{b_1}{b_{cp}} \right) \frac{\alpha p_{cp}}{\tau_{cp}}} \times \right. \\ \times \left. \sqrt{\frac{1}{\psi} \left(1 \pm \frac{2Q_p}{R b_{cp} p_{cp} \alpha^2} \right) - k_2} \right\} / \left[2 \left(1 + \frac{b_1}{b_{cp}} \right) \frac{b_1}{b_{cp}} \right]; \quad (12)$$

$$\frac{1}{\psi} = \frac{1}{1 \pm \frac{2Q_p}{R b_{cp} p_{cp} \alpha^2}} \left\{ \frac{\tau_{cp}}{8 \frac{b_1}{b_{cp}} \left(1 + \frac{b_1}{b_{cp}} \right) \alpha p_{cp}} [k_1]^2 + k_2 \right\}, \quad (13)$$

где Q_p – усилие подпора со стороны неприводных устройств; b_1 – высота после пропуска, мм; τ_{cp} – среднее касательное напряжение, МПа;

$$k_1 = \frac{b_1}{b_{cp}} \left(2\alpha - \frac{\alpha^2 p_{cp}}{\tau_{cp}} \pm \frac{Q_p}{R b_{cp} \tau_{cp}} \right);$$

$$k_2 = 2 + \alpha^2 - \frac{\alpha^3 p_{cp}}{4\tau_{cp}} \pm \frac{Q_p}{R b_{cp} p_{cp}} \pm \frac{\alpha Q_p}{R b_{cp} 2\tau_{cp}} - \frac{Q_p^2}{R^2 b_{cp}^2 4\tau_{cp} \alpha}.$$

Подставив соответствующие мощности в уравнение (8), после преобразований получим:

$$\eta_{ин} = \left\{ \sqrt{\frac{1}{Rh_1}} \left[(h_1 + R\gamma_{пр}^2) \left(\arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} - \arctg \sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma_{пр} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - (h_1 + R\gamma_{он}^2) \arctg \sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma_{он} \right] \right\} / (\alpha - \gamma_{пр} - \gamma_{он}). \quad (14)$$

Проанализируем, как влияет на изменение КПД процесса прокатки дополнительная загрузка при исполь-

зовании неприводных валков, размещенных в непосредственной близости за приводными. Деформацию в неприводных валках будем характеризовать коэффициентом λ вытяжки. Параметры прокатки в приводной клети – диаметр валков 300 мм, угол захвата 0,2 рад, коэффициент трения 0,3, отношение $h_0/D = 0,047$, в неприводной – диаметр валков 200 мм, коэффициент трения 0,3. Степень загрузки неприводной клети задавали изменением в ней коэффициента вытяжки. Результаты аналитических исследований с применением приведенных выше зависимостей показаны на рис. 2. С увеличением загрузки неприводных валков КПД процесса увеличивается, протяженность зон опережения и прилипания, снижающих активную площадь очага деформации, уменьшается.

Максимального значения КПД процесса возможно добиться при полном использовании резерва сил трения на дополнительное формоизменение при условии $\gamma_{пр} = \gamma_{оп} = 0$. С учетом вышесказанного зависимость (14) примет вид:

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{\frac{h_1}{R}} \arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}}}{\alpha} \quad (15)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ

Для проверки возможностей резерва сил трения на установившейся стадии процесса прокатки был проведен лабораторный эксперимент. Прокатку осуществляли в системе приводная – неприводная клеть. Диаметр валков в обоих случаях 130 мм, образцы свинцовые 30×30×300 мм. Деформирование в неприводной клети осуществляли за счет резерва сил трения в приводной клети. На рис. 3 показаны фрагменты кинограмм. В первом ($\alpha/\mu_3 = 1$) опыте (рис. 3, а) максимально возможное из условий захвата обжатие в приводной клети

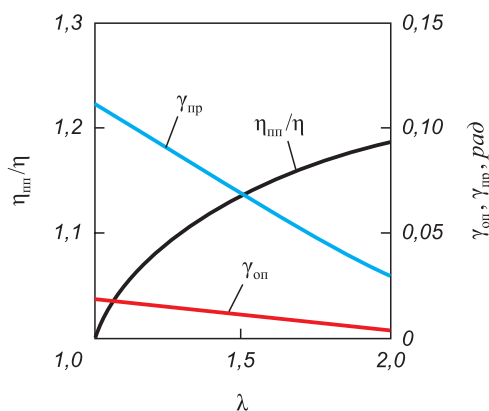


Рис. 2. Изменение КПД прокатной клети с увеличением загрузки неприводных валков

Fig. 2. Change of efficiency of the rolling stand with increasing the load of non-driven rolls

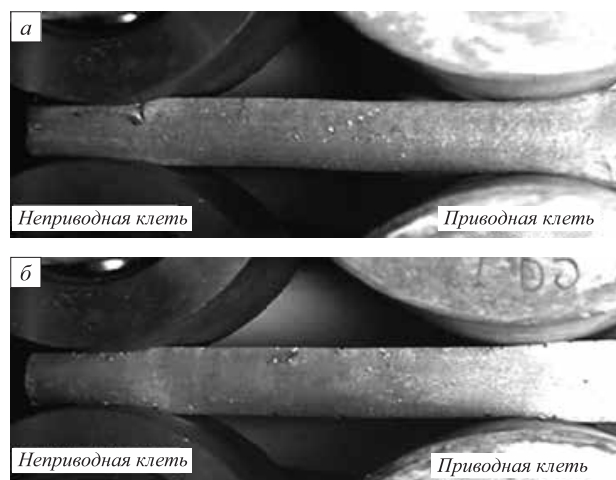


Рис. 3. Деформирование в приводной – неприводной клети за счет использования резерва сил трения:

а – опыт 1 ($\alpha/\mu_3 = 1$); б – опыт 2 ($\alpha/\mu_3 = 0,7$)

Fig. 3. Deformation in drive – non-drive stand using the reserve of friction forces:

а – experiment 1 ($\alpha/\mu_3 = 1$); б – experiment 2 ($\alpha/\mu_3 = 0.7$)

8 мм обжатие, в неприводной клети – 6 мм; во втором ($\alpha/\mu_3 = 0,7$) опыте обжатие в приводной клети – 4 мм, в неприводной – 6 мм. В обоих случаях процесс проходил устойчиво, что подтверждает большие возможности резерва сил трения на установившейся стадии процесса прокатки, количественно оцененные в теоретической части.

Выводы

Доказана перспективность более полного использования контактных сил трения на стадии установившейся прокатки для повышения эффективности процесса. Предложены зависимости, позволяющие количественно оценить дополнительную мощность, которую можно подвести в очаг деформации и использовать для работы неприводных устройств, что повысит эффективность процесса прокатки. Установлено и количественно оценено по полученным зависимостям увеличение КПД процесса прокатки при более полном использовании резерва сил трения на контактной поверхности очага деформации. Показана связь протяженности зон скольжения и прилипания на контактной поверхности очага деформации со степенью использования возможностей сил контактного трения. Приведены зависимости для определения протяженности зон скольжения и прилипания на контактной поверхности очага деформации при прокатке. Экспериментально подтверждены теоретические положения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Berezhnoy V.L. Friction – assisted extrusion as an alternative to the indirect and direct extrusion of hard aluminium alloys // Light Metal Age. 1997. Vol. 55. No. 3, 4. P. 8 – 13.

2. Фастыковский А.Р., Перетягко В.Н. Изучение влияния переднего подпора на протяженность зон скольжения и прилипания в очаге деформации при прокатке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2002. № 2. С. 15 – 17.
3. Berezhnoi V.L. Multipurpose friction – assisted indirect extrusion (FAIE) Technology // The Proceed. Techn. Seminar. Chicago. 2000. Vol. 1. P. 177 – 196.
4. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 399 с.
5. Грудев А.П. Теория прокатки. – М.: СП Интермет Инжиниринг, 2001. – 280 с.
6. Грудев А.П. Захватывающая способность прокатных валков. – М.: СП Интермет Инжиниринг, 1998. – 283 с.
7. Жучков С.М., Кулаков Л.В., Лохматов А.П. и др. Энергосбережение при непрерывной прокатке с неприводными рабочими клетями. Факторы влияния // Изв. вуз. Черная металлургия. 2001. № 9. С. 26 – 28.
8. Palmer L.W. Slit rolling technology // World Steel & Metalworking. 1984. 1985. Vol. 6. P. 147 – 149.
9. Фастыковский А.Р. К вопросу продольного разделения полосы неприводными устройствами в потоке прокатного стана // Производство проката. 2009. № 3. С. 4 – 8.
10. Matsuo G., Suzuki M. The latest technology of multy – slit rolling // SEA. ISI Quarterly. 1995. No. 3. P. 49 – 58.
11. Avitzur B. Extrolling: Combine Extrusion and Rolling // Wire Technology. 1974. Vol. 3. No. 2. P. 55 – 58.
12. Avitzur B. Handbook of Metal Forming Processes. – New York: John Wiley and Sons, 1981. – 280 p.
13. Fastyskovskii A.R. Region for extrolling and effective deformation modes // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2011. Vol. 52. No. 3. P. 230 – 233.
14. Sidelnikov S., Galiev R., Lopatina E., Samchuk A. Analysis of energy-force parameters of combined processing for receiving modifying bars from Al – 5Ti – 1B alloy // Non-ferrous Metals. 2017. Vol. 42. No. 1. P. 30 – 35.
15. Tuschy E. Strangpressen – Neue Verfahren // Metall. 1992. Vol. 36. No. 3. P. 269 – 279.
16. Sidelnikov S.B., Galiev R.I., Bespalov V.M., Samchuk A.P. Determining power-energy parameters of combined rolling-extrusion process for low-plastic aluminium alloys // Metal Professing. Non-ferrous Metals. 2018. No. 1. P. 30 – 36.
17. Фастыковский А.Р., Савельев А.Н. Конструкции и расчеты оборудования прокатных клетей сортовых и листовых станов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2008. – 316 с.
18. Леванов А.Н. Состояние и перспективы исследований контактного трения в процессах обработки металлов давлением // Сталь. 2000. № 9. С. 31 – 35.
19. Выдрин В.Н., Федосиенко А.С., Крайнов В.И. Процесс непрерывной прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.
20. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станов. – Свердловск: Металлургия, 1960. – 255 с.

Поступила в редакцию 26 февраля 2019 г.
 После доработки 11 апреля 2019 г.
 Принята к публикации 8 июля 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 10, pp. 810–815.

PROSPECTS FOR USE OF THE RESERVE FORCES OF FRICTION ON CONTACT SURFACE IN DEFORMATION ZONE AT ROLLING TO INCREASE PROCESS EFFICIENCY

A.R. Fastyskovskii¹, V.I. Bazaikin¹, V.V. Evstifeev²

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

²Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

Abstract. Rolling process is carried out due to power supplied to the center of deformation using contact friction forces. Rolling takes place in two stages – the capture stage and the steady-state process. The capture stage determines possibility of deformation in rolls. During this period, retracting forces of friction are used with maximum efficiency. The main stage of rolling is the steady-state stage of the process, where contact friction capabilities are not fully used and reserve of friction forces is created, which can increase efficiency of rolling process. To balance excessive friction forces on contact surface in deformation zone during the steady-state process, zones of advance and adhesion appear. Their length characterize amount of excessive friction forces. Theoretical dependences for determining slip and adhesion zones are given taking into account variety of rolling factors. Estimation indicator of abilities of friction forces reserve at the steady-state stage is offered as well as dependence for its definition. It is analytically established that in steady-state stage of rolling on smooth rolls with ratio $\alpha/\mu_3 = 1$ it is possible to supply 1.7 – 2 times greater energy due to existing reserve of friction force than at the stage of capture at a lower ratio α/μ_3 ; these numbers are even higher for rolling on grooved rolls. Dependence which determines amount of additional power provided by friction forces reserve is given. Promising directions of using friction forces reserve at the steady-state stage of rolling are provided to improve its efficiency. On the example of rolling in drive – non-drive stand, an increase in efficiency (Efficiency Ratio) of the main line of rolling mill is established with more efficient use of friction forces at the steady-state stage of rolling process. Theoretical dependences

are given to determine Efficiency Ratio at usual rolling process and at more full use of friction forces reserve.

Keywords: rolling, reserve of contact friction forces, zones of adhesion, efficiency improvement, efficiency.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-810-815

REFERENCES

1. Berezhnoi V.L. Friction – assisted extrusion as an alternative to the indirect and direct extrusion of hard aluminium alloys. *Light Metal Age*. 1997, vol. 55, no. 3, 4, pp. 8–13.
2. Fastyskovskii A.R., Peretyat'ko V.N. Effect of frontal support on the extent of slip and nonslip areas in deformation zone at rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002, no. 2, pp. 15–17. (In Russ.).
3. Berezhnoi V.L. Multipurpose friction – assisted indirect extrusion (FAIE) Technology. *The Proceed. Techn. Seminar. Chicago*. 2000, vol. 1, pp. 177–196.
4. Nikitin G.S. *Teoriya nepreryvnoi prodol'noi prokatki* [Theory of continuous longitudinal rolling]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2009, 399 p. (In Russ.).
5. Grudev A.P. *Teoriya prokatki* [Theory of rolling]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2001, 280 p. (In Russ.).
6. Grudev A.P. *Zakhvatyvayushchaya sposobnost' prokatnykh valkov* [Capturing ability of the rolls]. Moscow: Internet Inzhiniring, 1998, 283 p. (In Russ.).
7. Zhuchkov S.M., Kulakov L.V., Lohmatov A.P. etc. Energy saving at continuous rolling with non-driven working stands. Factors of influence. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2001, no. 9, pp. 26–28. (In Russ.).
8. Palmer L.W. Slit rolling technology. *World Steel & Metalworking*. 1984, 1985, vol. 6, pp. 147–149.

9. Fastykovskii A.R. Longitudinal separation of the strip by non-drive devices in rolling mill stream. *Proizvodstvo prokata*. 2009, no. 3, pp. 4–8. (In Russ.).
10. Matsuo G., Suzuki M. The latest technology of multi – slit rolling. *SEA. ISI Quaterly*. 1995, no. 3, pp. 49–58.
11. Avitzur B. Extrolling: Combine extrusion and rolling. *Wire Technology*. 1974, vol. 3, no. 2, pp. 55–58.
12. Avitzur B. *Handbook of Metal Forming Processes*. New York: John Wiley and Sons, 1981, 280 p.
13. Fastykovskii A.R. Region for extrolling and effective deformation modes. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2011, vol. 52, no. 3, pp. 230–233.
14. Sidelnikov S., Galiev R., Lopatina E., Samchuk A. Analysis of energy-force parameters of combined processing for receiving modifying bars from Al – 5Ti – 1B alloy. *Non-ferrous Metals*. 2017, vol. 42, no. 1, pp. 30–35.
15. Tuschy E. Strangpressen – Neue Verfahren. *Metall*. 1992, vol. 36, no. 3, pp. 269–279. (In Germ.).
16. Sidelnikov S.B., Galiev R.I., Bepalov V.M., Samchuk A.P. Determining power-energy parameters of combined rolling-extrusion process for low-plastic aluminium alloys. *Metal Processing. Non-Ferrous Metals*. 2018, no. 1, pp. 30–36.
17. Fastykovskii A.R., Savel'ev A.N. *Konstruktsii i raschety oborudovaniya prokatnykh kletei sortovykh i listovykh stanov* [Designs and calculations of equipment for rolling stands of roll and sheet mills]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2008, 316 p. (In Russ.).
18. Levanov A.N. State and prospects of research of contact friction in metal forming processes. *Stal'*. 2000, no. 9, pp. 31–35. (In Russ.).
19. Vydrin V.N., Fedosienko A.S., Krainov V.I. *Protsess nepreryvnoi prokatki* [Continuous rolling process]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 456 p. (In Russ.).
20. Vydrin V.N. *Dinamika prokatnykh stanov* [Dynamics of rolling mills]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1960, 255 p. (In Russ.).

Information about the authors:

A.R. Fastykovskii, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Metal Forming and Metal Science”. OJSC “EVRAZ ZSMK” (omd@sibsiu.ru)

V.I. Bazaikin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Applied Mathematics and Informatics (bazaykin@yandex.ru)

V.V. Evstifeev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Motor Vehicles, Construction Materials and Technologies” (VladEvst@mail.ru)

Received February 26, 2019
 Revised April 11, 2019
 Accepted July 8, 2019