

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
«Металлургия – 2022»**

Труды

XXIII Международной научно-практической конференции

23– 25 ноября 2022 г.

Часть 1

**Новокузнецк
2022**

УДК 669(06)+658.012.056(06)
М 540

Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540 **Металлургия : технологии, инновации, качество : труды XXIII Международной научно-практической конференции. В 2 частях. Часть 1 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 390 с. : ил.**

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

АДМИНИСТРАЦИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА КУЗБАССА
ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

АО «РУСАЛ-НОВОКУЗНЕЦК»

АО «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ»

АО «НЗРМК им. Н.Е. КРЮКОВА»

ЛЯОНИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, Г. АНЬШАНЬ, КНР

ОАО «ЧЕРМЕТИНФОРМАЦИЯ»

ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»

ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК СИБГИУ»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»

АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕПЦИИ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ НА НАСЛЕДСТВЕННУЮ СТРУКТУРУ В СТАЛИ 09Г2С <i>Солоницын А.Р.</i>	211
ПЕРЕРАБОТКА БЕМИТ-КАОЛИНИТОВЫХ БОКСИТОВ БИСУЛЬФАТОМ АММОНИЯ: ОСАЖДЕНИЕ ГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ ИЗ РАСТВОРА АЛЮМОАММОНИЙНЫХ КВАСЦОВ <i>Валеев Д.В.</i>	215
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ CoCrFeMnNi ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ Fe И Mn <i>Панченко И.А., Гостевская А.Н., Коновалов С.В., Безродная Е.А., Бессонов Д.А.</i>	220
МЕТОДИКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ <i>Рыбенко И.А., Конголи Ф.</i>	225
СЕКЦИЯ 2: ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА	231
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА ПОЛОСЫ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ <i>Кожеевников А.В., Смирнов А.С., Платонов Ю.В., Кожеевникова И.А.</i>	231
ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК10КС ПОСЛЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ <i>Осколкова Т.Н., Фастыковский А.Р.</i>	236
ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СЖАТИЕМ <i>Аксёнова К.В., Громов В.Е., Кибко Н.В., Вацук Е.С.</i>	242
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, СТРУКТУРУ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ В СРЕДЕ СЕРОВОДОРОДА ПРОКАТА ИЗ СТАЛИ 20 <i>Валюгин М.А., Мурсенков Е.С.</i>	248
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ <i>Платонов Ю.В.</i>	255
СПОСОБ РАСЧЕТА СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ «МЯГКОГО» ОБЖАТИЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ УСАДКИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ОСЕВОЙ РЫХЛОСТИ <i>Кабачков З.К., Габеля Д.И., Чуев А.А.</i>	261
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДРЕССИРОВКИ ШИРОКИХ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ТРАВЛЕННЫХ ПОЛОС <i>Антонов П.В., Парфенов Н.С., Болобанова Н.Л., Тимофеева М.А.</i>	267
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ТАКТОВОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕЛЬСОБАЛОЧНОГО СТАНА <i>Головатенко А.В., Фастыковский А.Р., Мусатова А.И.</i>	272
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРОКАТКОЙ <i>Фастыковский А.Р., Осколкова Т.Н., Вахроломеев В.А., Глухов М.И., Прудников А.Н.</i>	278
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ДЛИННОМЕРНЫХ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСОВ ПОСЛЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ <i>Кузнецов Р.В., Юрьев А.А., Шлярова Ю.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф.</i>	284
СИНТЕЗ КОМПЛЕКСНОЙ НОРМАТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАРТИИ ПРОКАТНОЙ ПРОДУКЦИИ <i>Мусатова А.И., Кулаков С.М., Фастыковский А.Р.</i>	289

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРОКАТКОЙ

Фастыковский А.Р., Осколкова Т.Н., Вахромеев В.А.,
Глухов М.И., Прудников А.Н.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, omd@sibsiu.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы снижения энергозатра при производстве сортового проката за счет повышения коэффициента полезного действия основного оборудования. Для этой цели предложено использовать резерв сил трения в очаге деформации при прокатке. Получены зависимости, позволяющие оценить перспективность более полного использования резерва сил трения для формоизменения. Показана энергоэффективность таких решений в условиях действующего производства.

Ключевые слова: сортовой прокат, снижение энергозатрат, резерв сил трения.

ENERGY SAVING IN THE PRODUCTION OF BAR PROFILES ROLLING

Fastykovskii A.R., Oskolkova T.N., Vakhrolomeev V.A.,
Glukhov M.I., Prudnikov A.N.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, omd@sibsiu.ru*

Abstract. The article discusses the issues of reducing energy consumption in the production of long products by increasing the efficiency of the main equipment. For this purpose, it is proposed to use a reserve of friction forces in the deformation center during rolling. Dependences are obtained that allow us to assess the prospects for a more complete use of the reserve of friction forces for shaping. The energy efficiency of such solutions in the conditions of existing production is shown.

Keywords: section steel, reduction of energy consumption, reserve of friction forces.

Россия располагает большим потенциалом энергосбережения. Как показано в Энергетической стратегии России, реализация освоенных на практике организационных и технических мер экономии энергоресурсов, способна уменьшить их современный расход в стране на 40 – 80 %, или на 360 – 430 млн. т. условного топлива в год. Потенциал экономии электроэнергии составляет 220 – 260 млрд. кВт·ч, или 25 – 30 % от современного потребления электроэнергии [1].

Металлургия – одна из наиболее энергоемких отраслей экономики, так как потребляет 90 % добываемого коксующегося угля, 50 % производимой электроэнергии, 25 % добываемого природного газа, что является причиной высокой доли энергетических затрат в себестоимости продукции [2].

В условиях возрастающей конкуренции в отрасли снижение цен на энергоемкую металлопродукцию за счет оптимизации потребления энергетических ресурсов и уменьшения энергетической составляющей издержек себестоимости производства является одним из важнейших факторов, определяющих финансово – экономическое состояние металлургических предприятий и их рыночную позицию.

Особенность процесса прокатки заключается в том, что мощность, необходимая для деформирования, подводится от валков к заготовке посредством сил трения на контакте. Чем полнее используются возможности сил трения для передачи мощности, тем эффективность используемого оборудования (главной линии прокатного стана) выше, а энергозатраты меньше. Однако разные силовые условия в момент захвата металла валками и на установившейся стадии процесса не позволяют в полной мере использовать потенциал сил трения на контактной поверхности для передачи полезной мощности, что снижает коэффициент полезного действия (К.П.Д.) процесса [3]. Имеющийся не используемый резерв сил трения на установившейся стадии процесса прокатки – это тот потенциал, который не востребован при обычном ведении процесса, и его реализация позволит снизить затраты энергии. Как показали проведенные исследования, возможности сил трения при прокатке в гладких валках используются только на 45...55 %, при прокатке в калиброванных – на 35...43 % [4]. Таким образом, используя резерв сил трения для передачи полезной мощности можно практически на треть сократить количество прокатных клетей и тем самым существенно снизить энергозатраты, связанные с эксплуатацией оборудования. Решить данный вопрос можно за счет реализации совмещенных процессов, таких как деформирование в системе приводная – не приводная клеть [5-6], прокатка – разделение с использованием не приводного делительного инструмента [7-9]. Перечисленные процессы основаны на использовании резерва сил трения на установившейся стадии процесса для совершения дополнительной операции обработки не приводными инструментами.

Более полно использовать резерв сил трения можно, установив за прокатной клетью в непосредственной близости не приводные валки, в которых будет деформироваться металл за счет резерва сил трения очага деформации приводной прокатной клетки. Успешное использование предлагаемого подхода возможно при разработке методики количественной оценки повышения эффективности оборудования при использовании резерва сил трения, а также при определении перспективных режимов деформации. Эффективность работы машин и механизмов общепринято оценивать через коэффициент полезного действия (К.П.Д.). Увеличение К.П.Д. снижает непроизводительные затраты энергии, тем самым обеспечивая энергосбережение при произ-

водстве сортовых профилей прокаткой. Для обычного случая прокатки К.П.Д. прокатного оборудования можно найти как отношение мощности, затрачиваемой на формоизменение N_ϕ , к мощности, подводимой валками в очаг деформации N_B .

$$\eta = \frac{N_\phi}{N_B}. \quad (1)$$

Мощность, затрачиваемую на формоизменение, можно определить [10]

$$N_\phi = \sigma_\phi V_{\text{сек}} \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (2)$$

где σ_ϕ - фактическое сопротивление деформации;

$V_{\text{сек}}$ - секундный смещенный объем;

h_0, h_1 - соответственно высота полосы до деформации и после.

Мощность, подводимую валками в очаг деформации, определим, воспользовавшись уравнением работ, совершаемых в каждой зоне очага деформации [10].

$$dA_B = R^2 d\psi \left(\int_{\gamma_1}^{\alpha} \tau_1 B_1 d\theta - \int_0^{\gamma} \tau_2 B_2 d\theta \right), \quad (3)$$

где dA_B - совершаемая валками работа при повороте на бесконечно малый угол $d\psi$;

R - радиус валков;

B_1, B_2 - ширина прокатываемой полосы в зонах отставания и опережения;

τ_1, τ_2 - касательные напряжения, действующие соответственно в зонах отставания и опережения;

γ_1, γ - углы, характеризующие протяженность зон отставания и опережения при трехзонном очаге деформации;

α - угол захвата.

После соответствующих подстановок, интегрирования, преобразований, допущений что $\tau_1 \approx \tau_2 \approx \mu \sigma_\phi$, $B_1 \approx B_2 \approx B_\phi$, переходя от работы к мощности, получим:

$$N_B = \frac{nR\mu\sigma_\phi V_{\text{сек}} (\alpha - \gamma_1 - \gamma)}{h_1 + R\gamma^2}, \quad (4)$$

где n - число приводных валков;

μ - коэффициент трения на установившейся стадии процесса прокатки.

Подставляя в (1) зависимости (2), (4) после преобразований получим уравнение для определения К.П.Д. оборудования при обычном процессе прокатки:

$$\eta = \frac{(h_1 + R\gamma^2) \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}}{nR\mu(\alpha - \gamma_1 - \gamma)} \quad (5)$$

К.П.Д. оборудования при использовании предлагаемой технологической схемы с дополнительной деформацией в неприводных валках за счет наличия резерва сил трения можно найти по формуле:

$$\eta_{\text{III}} = \frac{N_{\phi} + N_{\pi}}{N_B}, \quad (6)$$

где N_{π} – мощность, затраченная на дополнительную деформацию в неприводных валках (продольное разделение неприводным инструментом).

Рассмотрим процесс прокатки использующий резерва силы трения для дополнительного формоизменения, как прокатку с передним подпором, величина которого зависит от величины резерва сил трения и условий деформации в неприводных валках (продольного разделения неприводным инструментом). Уравнение баланса мощностей для прокатки с передним подпором имеет вид:

$$N_B - N_{\phi} - N_{\text{тр}} - N_{\pi} = 0, \quad (7)$$

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

Используя исходные уравнения работы [10] после соответствующего решения получим зависимость для определения мощности, затраченной на преодоление сил трения в трех зонном очаге деформации:

$$N_{\text{тр}} = \frac{nV_{\text{ср}}\mu\sigma_{\phi}R}{(h_1 + R\gamma^2)} \left[(\alpha - \gamma_1 - \gamma) - (h_1 + R\gamma_1^2) \sqrt{\frac{1}{Rh_1}} \left(\text{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} - \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma_1 \right) \right) + (h_1 + R\gamma^2) \sqrt{\frac{1}{Rh_1}} \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma \right) \right] \quad (8)$$

Подставив в (7) зависимости (2), (4), (8), после преобразований получим:

$$N_{\pi} = \frac{n\mu\sigma_{\phi}V_{\text{ср}}R}{(h_1 + R\gamma^2)} \left[(h_1 + R\gamma_1^2) \sqrt{\frac{1}{Rh_1}} \left(\text{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} - \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma_1 \right) \right) + (h_1 + R\gamma^2) \sqrt{\frac{1}{Rh_1}} \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma \right) \right] - \sigma_{\phi}V_{\text{ср}} \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (9)$$

Подставив (2), (4), (9) в (6) получим:

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{Rh_1}} \left[(h_1 + R\gamma_1^2) \left(\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} - \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma_1 \right) \right) - (h_1 + R\gamma^2) \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma \right) \right]}{\alpha - \gamma_1 - \gamma}. \quad (10)$$

Максимального значение К.П.Д. прокатного оборудования возможно добиться при полном использовании резерва сил трения на дополнительное формоизменение, при таких условиях $\gamma_1 = \gamma = 0$. С учетом вышесказанного зависимость (10) примет вид:

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{\frac{h_1}{R}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}}}{\alpha}. \quad (11)$$

Определим энерго эффективность прокатного оборудования при использовании резерва сил трения на дополнительное формоизменение, сравнив К.П.Д. оборудования при обычном процессе прокатки (5) и для рассматриваемого случая (11) с учетом изменения угла захвата и параметра h_0/D . График, полученный в результате расчетов при коэффициенте трения на установившейся стадии процесса прокатки равном 0,3, приведен на рисунке 1: сплошная линия - $h_0/D=0,067$, пунктирная - $h_0/D=0,1$, пунктир с точками - $h_0/D=0,133$. Из рисунка 1 видно, что использование резерва сил трения на дополнительное формоизменение в неприводных валках или при продольном разделении неприводным инструментом увеличивает энергоэффективность прокатного оборудования, оцененного через К.П.Д., причем с увеличением угла захвата и уменьшением параметра h_0/D эффект становится более выраженным. Выбранные пределы параметра h_0/D характерны для прокатки в черновых и промежуточных клетях сортовых станов [11], где наиболее целесообразно использовать формоизменение в системе приводные-неприводные валки. Продольное разделение неприводным инструментом обычно осуществляется в чистовых группах клетей, где отношение h_0/D меньше, следовательно, эффект энергосбережения выше.

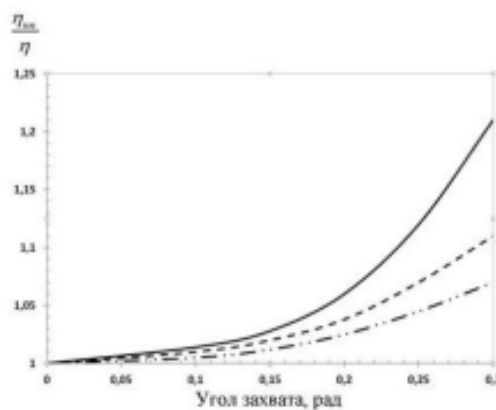


Рисунок 1 - Сравнительный график К.П.Д. прокатного оборудования при использовании резервных сил трения и при работе в обычном режиме в зависимости от угла захвата и параметра h_0/D

Приведенный в работе аналитический материал убедительно доказывает возможность увеличения энергоэффективности прокатного оборудования за счет использования резерва сил трения на дополнительное формоизменение. Предложенная методика оценки К.П.Д. прокатного оборудования позволяет анализировать режимы деформации с точки зрения рациональной загрузки оборудования.

Библиографический список

1. Волкова И.О. Новые направления энергосбережения в металлургии / И.О. Волкова // Металлург. – 2005. – №8. – С. 32 – 36.
2. Дубина О.В. Динамика потребления энергоресурсов в прокатных цехах / О.В. Дубина // Производство проката. – 2003. – №1. – С. 29 – 32.
3. Фастыковский А.Р. Увеличение эффективности прокатного оборудования за счет использования резервных сил трения очага деформации / А.Р. Фастыковский// Известия вузов. Машиностроение. – 2003. - № 6. – С. 59 – 63.
4. Фастыковский А.Р. Оценка возможностей контактных сил трения с целью интенсификации процесса прокатки на установившейся стадии / А.Р. Фастыковский, Д.А. Фастыковский// Производство проката. – 2013. - №7. – С. 9-12.
5. Фастыковский А.Р. Продольная устойчивость полосы при работе системы прокатная клеть – неприводной инструмент / А.Р. Фастыковский// Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. - №4 – С. 21 - 24.
6. Фастыковский А.Р. Новые перспективы бескалибровой прокатки / А.Р. Фастыковский, В.Н. Перетяtko// Производство проката. – 2003. - № 6. – С. 18 – 20.
7. Ефимов О.Ю. Освоение технологии прокатки – разделения на непрерывном мелкосортном стане / О.Ю. Ефимов, А.Р. Фастыковский, В.Я. Чинокалов, И.В. Копылов// Сталь. - 2008. - № 4. – С. 50 – 52.
8. Фастыковский А.Р. Опыт применения технологии прокатки-разделения в условиях действующего производства / А.Р. Фастыковский, А.А. Федоров// Производство проката. – 2016. - №12. – С. 3 – 8.
9. Фастыковский А.Р., Теория и практика ресурсосберегающих технологий производства сортового проката на действующих непрерывных станах / А.Р. Фастыковский, А.А. Уманский// Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. - №5. – с. 322 – 327.
10. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станов. Свердловск. Металлургиздат, 1960.-255 с. с ил.
11. Фастыковский А.Р. Конструкции и расчеты оборудования прокатных клеток сортовых и листовых станов : учебное пособие / А.Р. Фастыковский, А.Н. Савельев; Сиб. гос. индустр н-т. – Новокузнецк, 2008. – 316 с.