

УДК 621.771.28

А.А. МИНАЕВ (д-р техн.наук, проф.), **Е.Н. СМИРНОВ** (д-р техн.наук, проф.), **В.М. КАШАЕВ** (канд.техн.наук, доц.), **В.В. КАШАЕВ** (канд.техн.наук)

Донецкий национальный технический университет, Донецк

АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОКАТКИ В ПРОСТЫХ КАЛИБРАХ

Представлены обобщения полученных результатов оценки эффективности формоизменения в системах вытяжных калибров проволочного стана с помощью разработанных критериев. Выполнена оценка КПД формоизменения для ряда вытяжных систем калибров, которая показала диапазон колебания их энергоэффективности от 55% до 80%.

Ключевые слова: энергоэффективность прокатки, формоизменение, вытяжные калибры.

Постановка задачи

Калибровка валков является сложной системой, к которой предъявляются разносторонние требования, определяющие её рациональность или оптимальность.

Экономические реалии сегодняшнего времени постоянно меняют приоритеты, а достижения науки расширяют и изменяют систему ограничений при расчётах калибровок.

Так в зарубежной практике для снижения удельных затрат энергии на деформацию уменьшают сечение заготовки, сохраняя массу за счёт роста её длины. Однако, для уже действующих агрегатов, такой путь требует огромных капитальных затрат на строительство нагревательных устройств с шириной в два раза больше существующих. Далее нами будет выполнен энерго-экономический анализ целесообразности такого пути энергосбережения для Украины и предложен альтернативный вариант.

В условиях неполной загрузки прокатных агрегатов на Украине требование максимальной производительности при расчёте калибровок должно уступить приоритет качеству.

Анализ публикаций по теме исследования

Как отмечают авторы учебного пособия [1], ряд критериев рациональности калибровок валков пока не поддаётся математическому описанию.

Аналитическим путём был получен один из критериев – коэффициент полезного действия (к.п.д.) работы деформации (формоизменения) [2] в виде:

$$\eta_{\phi} = \frac{\ln \lambda}{\ln 1/\eta}, \quad (1)$$

где $\ln \lambda$, $\ln 1/\eta$ – натуральные логарифмы коэффициентов удлинения и обжатия соответственно.

Этот критерий позволяет нанести на номограммы [1] два луча, соответствующих $\eta_{\phi} = 1$ и $\eta_{\phi} = 0,5$, и получить сектор эффективной деформации к.п.д. которой будет известен для любой точки координат.

Анализ, с помощью критерия, калибровок стана 150 ЗАО «ММЗ» впервые позволил установить распределение к.п.д. формоизменения по калибрам непрерывных групп клеток стана [3].

Формулировка целей статьи

Целью выполненных в настоящей работе, исследований является разработка и внедрение в расчёты калибровок ряда критериев. Они позволили повысить энергоэффективность и оптимальность деформационных и температурно-скоростных режимов прокатки катанки и мелкого сорта из высококачественных сталей.

Установлена высокая степень корреляции критерия эффективности формоизменения с вытяжкой, характерной для данного типа калибра.

Однако корреляция с вытяжкой в данном типе калибров вовсе не означает, как показали исследования, что, увеличив вытяжную способность данной системы калибров за счёт допустимого запаса, мы повысим и их эффективность. Анализ номограмм [1] и исследований других авторов свидетельствуют, что вытяжка не характеризует энергетическую эффективность деформации.

Основная часть

Определение критерия эффективности деформации в виде к.п.д. формоизменения (1) позволило преобразовать формулу С. Финка к тождественному виду, удобному для оперативного подсчёта и анализа затрат энергии на деформацию в калибрах простой формы:

$$A_{\text{дс}} = \sum_{i=1}^n \frac{p_{\text{ср}i} \cdot V \cdot \ln \lambda_i}{\eta_{\phi i}} = \frac{(p_{\text{ср}})_{\text{ср}} \cdot V \cdot \ln \lambda_{\text{сум}}}{(\eta_{\phi})_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где $p_{\text{ср}i}$ – контактное давление в i -ой клетки, V – объем металла, $\ln \lambda_i$ – натуральный логарифм коэффициента удлинения в i -ой клетки, $\eta_{\phi i}$ – к.п.д. формоизменения в i -ой клетки.

Величина расхода энергии на прокатку, приведённая к клеммам электродвигателя, запишется в виде:

$$A_{\Sigma} = \frac{(p_{cp})_{cp} \cdot V \cdot \ln \lambda_{\Sigma}}{(\eta_{\phi})_{cp} (\eta_{cm})_{cp} (\eta_{\delta\phi})_{cp}}, \quad (3)$$

где $(\eta_{cm})_{cp}$ – к.п.д. приводной линии стана, средний, $(\eta_{\delta\phi})_{cp}$ – к.п.д. электродвигателей стана, средний.

Для расчёта требуемого числа проходов в зависимости от к.п.д. можно преобразовать известную формулу к виду:

$$n = \frac{\ln \lambda_{cp}}{(\eta_{\phi} \cdot \ln 1 / \eta)_{cp}}. \quad (4)$$

Тогда, используя выражение (4), формулу (2) можно записать:

$$A_{\Sigma} = (p_{cp})_{cp} \cdot V \cdot n \cdot (\ln 1 / \eta)_{cp}. \quad (5)$$

Полученные формулы в представленном виде удобны для оперативного подсчёта затрат энергии как в каждом калибре, так и для подсчёта суммарных затрат энергии на прокатку.

К критериям рациональности калибровок валков можно отнести формализацию, полученную в виде:

$$P_{psc} = (\Pi_y + \Pi_k + f_{\lambda}) \Pi_n \cdot 0,1, \quad (6)$$

где Π_y – показатель универсальности схемы калибровки, Π_k – показатель качества, f_{λ} – коэффициент эффективности деформации, Π_n – коэффициент производительности.

В укрупнённые коэффициенты входят показатели марочного состава, рациональности схем прокатки, использование параметров исходной заготовки и др. Оптимальная величина P_{psc} должна стремиться к единице.

Для оценки эффективности температурного «коридора» при прокатке высококачественных сталей и сплавов, была выбрана целевая функция:

$$D(\vec{\lambda}) = \sum_{i=1}^n [T_i^* - T(\vec{\lambda})]^2, \quad (7)$$

где T_i^* и $T_i(\vec{\lambda})$ – соответственно заданная и фактическая температура раската за i -ой клетью, $\vec{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)^T$ – вектор управления, компонентой которого являются частные вытяжки.

Чем меньше значение этого критерия, тем уже температурный «коридор» и тем ближе фактический температурный профиль стана к желаемому.

Особенностью сортовой прокатки является использование одних и тех же калибров для получения определённого профилеразмера практически из всех марок сталей, входящих в марочный сортамент. Получены формулы для определения размеров калибров с учётом химического состава марок сталей. Разработана универсальная калибровка для 10-клетьевого блока стана 150 ЗАО «ММЗ» и рассчитаны энергосиловые параметры для трёх групп сталей с ограничениями по скорости прокатки.

Таким образом, введение дополнительно к традиционным критериям критерия энергоэффективности, ширины температурного «коридора» и регламентации температуры окончания деформации, позволило решать задачи выбора энергоэффективной последовательности калибров и температурно-скоростных режимов для широкого марочного сортамента.

Мощности, рассчитанные по предложенным формулам, были сопоставлены с расчётами мощности по моментам.

Целью сопоставления являлась оценка точности расчёта расхода энергии на процесс прокатки, как по пропускам, так и суммарного с помощью полученных выражений (2–5). Преимуществами этих выражений является то, что мы пользуемся удобным выражением формулы С. Финка, т.е. её частью, которая учитывает работу, затраченную на вытяжку, а работа на уширение учитывается с помощью к.п.д. формоизменения η_ϕ .

Особенно это удобно для оценки суммарного расхода энергии, т.е. определив среднюю величину коэффициента η_ϕ для систем калибров стана, а также среднее контактное давление, необходимо лишь задаться суммарной вытяжкой.

На основе исходных данных, средних для 10 калибров оценим суммарную работу деформации по формуле:

$$A_{д\Sigma} = \frac{(P_{cp})_{cp} \cdot V \cdot \ln \lambda_{сум}}{(\eta_\phi)_{cp}} = \frac{294 \cdot 0,256 \cdot 2,23}{0,46} = 364,9 \text{ МН}\cdot\text{м} = 99,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \quad (8)$$

Тогда мощность деформации будет равна:

$$N_{д\Sigma} = \frac{A_{д\Sigma}}{t} = \frac{99,4 \cdot 3600}{122,4} = 2924 \text{ кВт}. \quad (9)$$

С учётом к.п.д. стана $\eta_{cm} = 0,89$ и к.п.д. электродвигателя $\eta_{\dot{a}\dot{a}} = 0,95$ расход энергии на клеммах электродвигателя составит:

$$A_{эл\Sigma} = \frac{A_{д\Sigma}}{\eta_{cm} \cdot \eta_{\dot{a}\dot{a}}} = \frac{99,4}{0,89 \cdot 0,95} = 117 \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \quad (10)$$

По показаниям счётчика расход энергии составил $A_{эл\Sigma} = 124,6$ кВт·ч, а удельный $a_w = 63,25$ кВт·ч/т, что превышает расчётное значение на 7%.

Из сравнения табличных данных следует, что результаты расчёта мощности по моментам и рассчитанными по формуле (2), отличаются в среднем на 2-8%, суммарная мощность отличается на 5%.

Мощность на валу электродвигателей чистового блока составит:

$$N_{np\Sigma} = \frac{N_{д\Sigma}}{\eta_{cm}} = \frac{2924}{0,89} = 3285 \text{ кВт}. \quad (11)$$

Мощность на валу электродвигателей блока при прокатке катанки $\varnothing 6$ мм из стали 1X18H9T составит:

$$N_{np\Sigma} = \frac{3307}{0,89} = 3716 \text{ кВт.}$$

Точность предложенных в работе расчётных зависимостей достаточно высокая для оперативной оценки суммарных общих и удельных энергозатрат, как при проектировании новых систем калибров, так и совершенствовании существующих.

Представляет интерес проверить насколько подойдёт для Украины зарубежная практика увеличения массы бунта за счёт увеличения длины заготовки. Например, при реконструкции проволочного стана фирмы «Нейнкинхнер Айзенверк» (Германия) длина заготовки увеличена до 13 м, а стан фирмы АРБЕД (Люксембург) реконструирован под длину заготовки до 18 м. Фирма «Шлеман-Зимаг» разрабатывает стан под заготовку длиной 22 м. Известны случаи использования круглой заготовки диаметром 50 мм, свёрнутой в бунт, массой 5 т.

В настоящее время на стане 150 используются заготовки сечением 150x150 мм и 125x125 мм. Подсчитаем суммарный расход энергии на клеммах электродвигателей с учётом расходного коэффициента (выход годного), для прокатки катанки диаметром 5,5 мм из заготовки стали 45 сечением 150x150мм, длиной 10,5 м, массой 1,85 т.

$$A_{эл.\Sigma} = \frac{(p_{cp})_{cp} \cdot V \cdot \ln \lambda_{сум}}{(\eta_{\phi})_{cp} \cdot (\eta_{cm})_{cp} \cdot (\eta_{ов})_{cp} \cdot K_{в.з.}} = \frac{250 \cdot 0,256 \cdot 6,91}{0,52 \cdot 0,89 \cdot 0,95 \cdot 0,952} = 286 \text{ кВт-ч,} \quad (12)$$

$$a_w = \frac{A_{эл.\Sigma}}{m} = \frac{286}{2} = 143 \text{ кВт-ч/т.} \quad (13)$$

Следует отметить, что удельная величина работы прокатки a_w близка к цифре 141,8 кВт-ч/т, из калькуляции затрат на производство.

Рассчитаем работу прокатки заготовки сечением 125x125 мм, длиной 10,5 м, массой 1,28 т.

$$A'_{эл.\Sigma} = \frac{250 \cdot 0,164 \cdot 6,5}{0,52 \cdot 0,89 \cdot 0,95 \cdot 0,952} = 173 \text{ кВт-ч,}$$

$$a'_w = \frac{173}{1,28} = 135 \text{ кВт-ч/т.}$$

Экономический эффект от снижения затрат электроэнергии при тарифе на неё для потребителей первого класса напряжения $\Pi = 0,87$ грн/кВт-ч составит:

$$\mathcal{E}' = (a_w - a'_w) \cdot \Pi = (143 - 135) \cdot 0,87 = 6,96 \text{ грн/т.} \quad (17)$$

Однако масса бунта теперь сократилась с 1,85 т до 1,28 т, что понизит существенно конкурентоспособность продукции.

Предположим, что мы при сечении заготовки 125x125 мм хотели бы сохранить массу на прежнем уровне 1,85 т, тогда длина заготовки должна

быть равна 15 м и хотя удельные затраты энергии останутся близки к 135 кВт·ч/т, при этом потребуются большие капитальные затраты:

- на реконструкцию нагревательной печи с увеличением ширины (в просвете) до 16 м;
- расширение загрузочных решёток до соответствующего размера;
- модернизация толкателей.

Предложенные в данной работе энергоэффективные мероприятия не требуют существенных затрат для реализации, что более приемлемо, для сегодняшнего выхода из энергетического кризиса, предприятиям чёрной металлургии.

Так замена систем вытяжных калибров овал – ребровой овал на плоский овал - круг, позволит увеличить к.п.д. деформации до 0,65, а в среднем по стану 150 до 0,58, вместо 0,52.

Работа прокатки при этом составит на клеммах электродвигателя $A''_{эл} = 256$ кВт·ч, а удельная её величина $a''_w = 128$ кВт·ч/т, что позволит получить экономию в размере:

$$\mathcal{E}'' = (143 - 128) \cdot 0,87 = 13,05 \text{ грн/т.}$$

Известно, что снижение расхода электроэнергии на прокатку ведёт к снижению и расхода валков, что отражено в расчётах экономической эффективности.

Приведённые расчёты энергосиловых параметров выполнены для трёх прочностных групп сталей с ограничениями по силе прокатки, моменту и мощности. Представляет интерес проанализировать, как отразится снижение скоростей прокатки прочных марок сталей на энергопотреблении.

Для этой цели на рисунке 1 представлена диаграмма, которая отражает расход суммарной $A_{дс}$ и удельной a_w энергии на прокатку трёх марок сталей. Так для стали Р18 мы выполнили все ограничения по силовым параметрам, снизив скорость прокатки до 25 м/с, однако по расходу энергии мы превысили удельную величину a_w на 200% по отношению даже к стали 45. Это говорит о том, что расширение марочного сортамента должно проводиться в комплексе с повышением энергоэффективности процесса прокатки.

О том, что такие резервы имеются, проиллюстрировано на рисунке 2. Путём расчёта удельных затрат энергии по группам клетей проволочного стана 150 установлено, что до 50% энергии потребляют 1–я и 2–я промежуточные группы стана и до 30% проволочный блок. Проектная калибровка стана 150 имеет показатель $a_w = 143$ кВт·ч/т и известную систему калибров с низким к.п.д. формоизменения $\eta_\phi = 0,55$.

Если в промежуточных группах клетей и чистовых блоках применить более эффективные вытяжные системы калибров, с использованием плоских овалов, нетрудно подсчитать, что годовой эффект может составлять свыше десяти миллионов гривен.

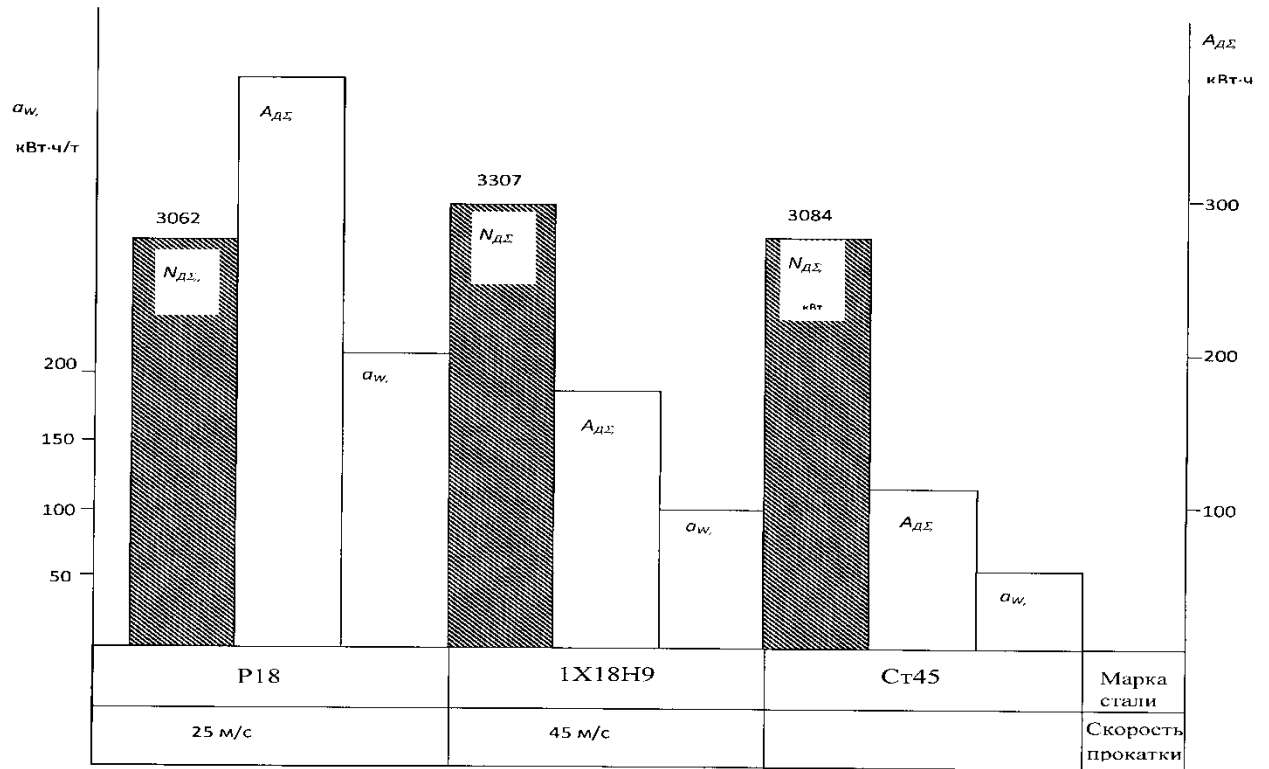


Рисунок 1 – Суммарная $A_{дΣ}$ и удельная a_w работы деформации при прокатке различных по прочности марок сталей в проволочном блоке, с соответствующей мощностью $N_{дΣ}$.

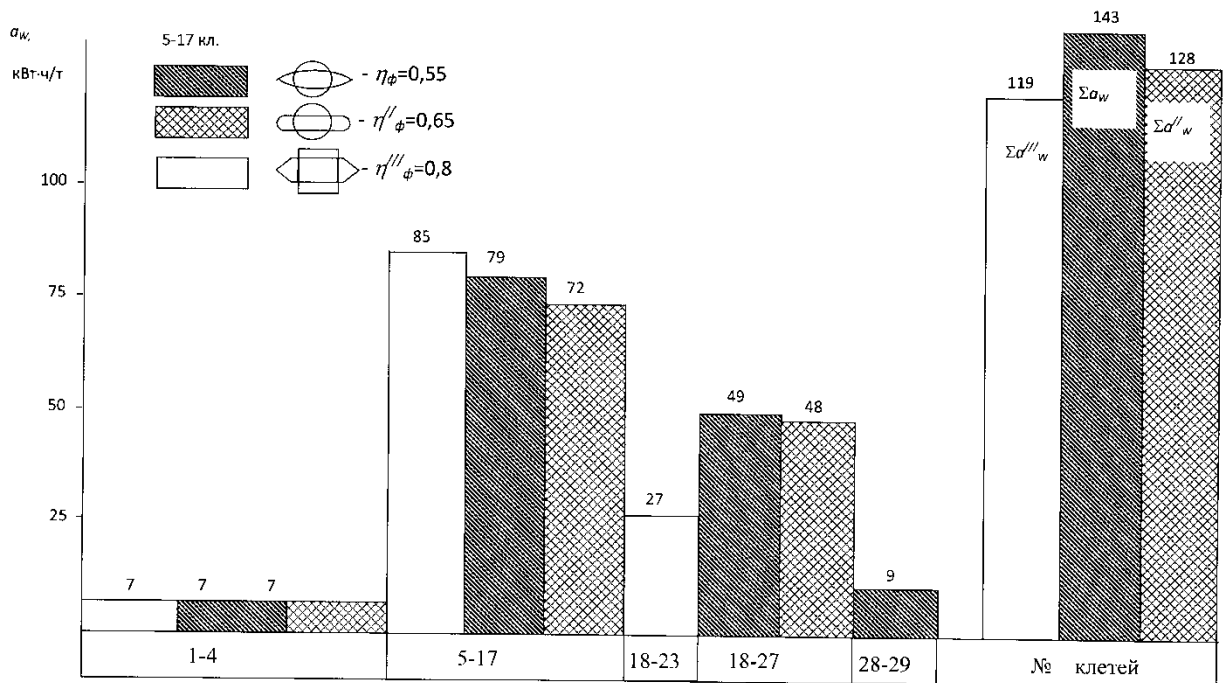


Рисунок 2 – Удельная работа деформации a_w в системах вытяжных калибров с различным к.п.д. формоизменения η_{ϕ} и расчётные результаты по трём вариантам калибров для стана 150 ОАО «ММЗ»

Причём с ростом тарифов на электроэнергию, ее удельный вес в себестоимости продукции будет также расти.

Так, применение системы калибров шестиугольник - квадрат с высоким к.п.д. формоизменения $\eta_{\phi} = 0,8$ на проволочном стане, при объёме производства $P = 600$ тыс. тонн, могло бы позволить получить годовой экономический эффект в размере:

$$\mathcal{E}_2 = (a_w - a_w''') C \cdot P = (143 - 119) 0,87 \cdot 600000 = 12'528'000 \text{ грн.}$$

Если использовать эту систему калибров, только в черновой группе клетей после ящичных калибров, как рекомендуют калибровщики [1], то и тогда эффект будет больше миллиона гривен.

При известных на сегодня тенденциях развития производства катанки на однониточных станах, нами предпринята попытка решения данной проблемы на двухниточном стане 150 ЗАО «ММЗ».

Выводы

1. Рекомендованная система плоских овалов, вместо однорадиусных, обеспечивает как выравнивание вытяжек, а, следовательно, и нагрузок между клетями, большую износостойкость калибров по сравнению с другими системами и большую энергоэффективность.

2. Показано, что повышение средней величины к.п.д. деформации по стану за счёт системы калибров с эффективностью $f_{\lambda} = 0,6 - 0,8$, позволяет понизить удельный расход энергии с 143 кВт·ч/т до 128 кВт·ч/т и получить экономию 13,05 грн/т.

3. Сравнительный анализ результатов расчёта расхода энергии на прокатку, по усовершенствованной формуле (1), показал, что она позволяет, с отклонением 5 – 7% от показаний счётчиков электроэнергии, определить суммарную работу прокатки, по суммарной вытяжке, средней величине к.п.д. формоизменения и контактных сил.

4. Расчётами подтверждено, что повышение эффективности формоизменения в вытяжных калибрах, путём целенаправленного изменения их параметров, экономически более эффективно, чем уменьшение сечения заготовки и увеличение её длины. Увеличение длины заготовки потребует значительных капитальных затрат на реконструкцию нагревательных печей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков: учеб. пособие для вузов / В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Игнатович. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
2. Кашаев В.В. Аналитическое определение коэффициента формоизменения для систем вытяжных калибров и исследование взаимосвязи с энергетическими затратами / В.В. Кашаев, О.Л. Дронов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2003. – С. 598-603.

3. Смирнов Е.Н. Аспекты совершенствования технологий производства мелкого сорта и катанки из непрерывнолитых заготовок высококачественной стали / Е.Н. Смирнов, В.В. Кашаев // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С. 526-528.

Надійшла до редакції 15.10.2012

Рецензент д-р техн. наук, проф. О.В. Яковченко

О.А. Мінаєв, Є.М. Смирнов, В.М. Кашаєв, В.В. Кашаєв
Донецький національний технічний університет, Донецьк

АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРОБОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОКАТКИ В ПРОСТИХ КАЛІБРАХ

Представлені узагальнення отриманих результатів оцінки ефективності формозміни в системах витяжних калібрів дротового стану, за допомогою розроблених критеріїв. Виконано оцінку ККД формозміни для ряду витяжних систем калібрів, яка показала діапазон коливання їх енергоефективності від 55% до 80%.

Ключові слова: енергоефективність прокатки, формозміна, витяжні калібри.

A.A. Minayev, Ye. N. Smirnov, V.M. Kashayev, V.V. Kashayev
Donetsk National Technical University, Donetsk

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL MODES WHICH PROVIDE ENERGY EFFICIENCY IN SIMPLE ROLLING CALIBERS

The paper summarizes the results of estimating the effectiveness of the form change in the systems of wire mill exhaust calibers. We estimated the form change efficiency coefficient for a number of calibers exhaust systems and found out that their energy efficiency varied from 55 to 80%.

Keywords: energy efficiency rolling, form change, exhaust gauges.

УДК 629.225.033

С.А. СНИТКО (канд.техн.наук, доц.), **А.В. ЯКОВЧЕНКО** (д-р техн.наук, проф.), **Н.И. ИВЛЕВА**

Донецкий национальный технический университет, Донецк

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЁС С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ ДИСКАМИ, ПОСТРОЕННЫМИ НА БАЗЕ ПРИНЦИПОВ «ЗОЛОТОГО СЕЧЕНИЯ» И «ЦЕПНОЙ ЛИНИИ»

Созданы теоретические основы, новый метод и компьютерная программа проектирования железнодорожных колёс с криволинейными дисками на базе принципов «золотого сечения» и «цепной линии», которые позволяют реализовать системный подход при проектировании новых конструкций колёс.