

УДК 621.771.06.005

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРОКАТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ВАЛКОВ ШАРОПРОКАТНОГО СТАНА

Рубцов В.Ю., аспирант кафедры металлургических технологий (Urylot@mail.ru)

*Шевченко О.И., д.т.н., заведующий кафедрой металлургических
технологий (Shevchenko.Oleg@mail.ru)*

*Миронова М.В., к.т.н., директор департамента Нижнетагильского технологического
института (филиал) (blastpurnace@mail.ru)*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Одной из существенных причин простоев шаропрокатных станов является замена валков в связи с их износом. В статье исследованы степень и зоны критического износа шаропрокатных валков, где наибольший износ наблюдается по ребордам в зоне захвата заготовки. Аналитически определены условия, необходимые для захвата заготовки и выполнения процесса прокатки. В качестве прогрессивной технологии предложен способ переменной частоты вращения валков при подаче заготовки, представлены результаты испытаний при ее изменении по линейному и квадратичному законам. Преобразованы известные формулы для определения средней скорости деформации при изменении частоты вращения валков при линейной и квадратичной зависимостям. Проведены экспериментальные исследования в условиях шаропрокатного стана АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» при прокатке шара диам. 60 мм из стали марки ШЗГ на стане прокатки мелющих шаров 40-80. Проведены опыты с изменением частоты вращения валков в ручном режиме по заданным параметрам при захвате заготовки валками, которые показали существенное влияние изменения частоты вращения на среднее удельное давление в момент захвата заготовки. Представлены моментно-временная характеристика и характеристика среднего контактного давления для расчетных и опытных данных, а также эмпирические характеристики при переменной частоте вращения валков по линейному и по квадратичному законам. Определена допустимая сходимости результатов расчетных и эмпирических характеристик. Предложено инженерное решение для поставленной задачи в качестве установки тиристорного преобразователя, которое позволит уменьшать частоту вращения валков перед захватом, а после захвата заготовки увеличивать ее до номинальной по заданному закону. Так можно получить равномерное распределение среднего контактного давления по всей длине валка при различных режимах работы стана в автоматическом режиме. Применение такой методики позволит уменьшить степень износа прокатного инструмента при той же производительности шаропрокатного стана, тем самым снизить расход валков и количество перевалок по их износу.

Ключевые слова: винтовой калибр, реборда, захват заготовки, условие вращения заготовки, усилие прокатки, среднее контактное давление, частота вращения, линейный закон, квадратичный закон.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-927-932

ВВЕДЕНИЕ

При производстве шаров на шаропрокатном стане деформация металла осуществляется в валках с винтовыми калибрами. Заготовка подается между валками, которые вращаются в одном направлении и расположены под определенными углами друг относительно друга. В это время происходит захват заготовки ребордами валка. После прохода через калибр заготовка постепенно обжимается и приобретает форму шаров, которые на последней реборде отделяются друг от друга путем удаления перемычки. Очаг деформации разделяют на формирующий участок, где происходит захват заготовки, ее обжатие и формирование шара, и отделочный участок, где происходит обкатка шара [1 – 6].

Наиболее изнашиваемыми элементами из всего оборудования стана являются прокатные валки, периодическая замена которых по сроку износа приводит к значительным простоям. Большое влияние на износо-

стойкость валков, помимо качества их изготовления, связанного с выбором материала и технологии производства, оказывают условия эксплуатации [7]. Анализ причин выхода из строя прокатного инструмента показал, что износ происходит за счет заката или разрушения реборда, что особенно наблюдается на первой реборде при заходе в клеть, т.е. на формирующем участке, в то время как отделочный участок еще сохраняет необходимую геометрию (рис. 1).

Для процесса прокатки необходимо выполнение условий осевого перемещения и вращения заготовки в момент ее захвата. При критическом износе реборды на заходной части валка появляются пробуксовка и отсутствие вращения заготовки, что приводит к образованию «реек» и в дальнейшем является сигналом для замены валков. Поэтому использовать валки в процессе прокатки можно до определенной степени их износа [8]. В настоящее время отсутствуют критерии определения критического износа валков шаропрокатных

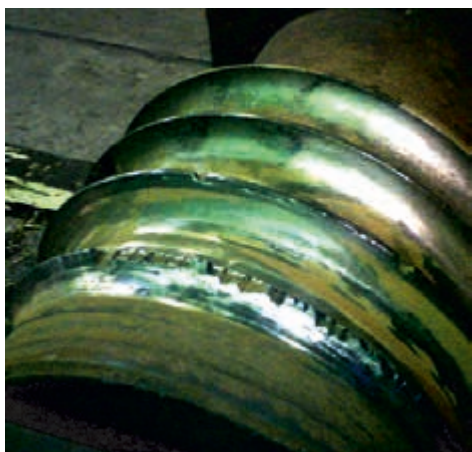


Рис. 1. Характер износа реборд валка

Fig. 1. Wear pattern of roll flanges

станов, и чаще всего ресурс валков ограничивается тоннами прокатанного металла. В связи с этим совершенствование режима прокатки в момент захвата заготовки является актуальной задачей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились на стане прокатки мелющих шаров 40-80 [9] АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» с подачей заготовки диам. 60 мм из стали марки ШЗГ при температуре нагрева под прокатку 930 °С. Бочки шаропрокатных валков изготовлены из горячекованной заготовки стали марки 5ХНМ, твердость рабочей поверхности валка 42 – 48 HRC. Диаметр шаропрокатного валка 460 мм, длина бочки валка 400 мм. Опытным режимам предшествовали аналитические расчеты энергосиловых параметров по известным методикам [4, 10 – 24].

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Усилие, необходимое для выполнения условия осевого перемещения заготовки, незначительно, поэтому

пренебрегая им, оценим усилие прокатки исходя из условия вращения заготовки в общем виде [4]:

$$M_T - M_N - M_p - M_I \geq 0, \tag{1}$$

где M_T – момент вращения заготовки или момент равнодействующей силы трения, Н·м; M_N – момент сопротивления вращению заготовки равнодействующей силы нормального давления, Н·м; M_p – момент сопротивления сил трения, возбуждаемый на заднем торце заготовки внешним осевым усилием и силами инерции движущихся частей задающего устройства, Н·м; M_I – момент сил инерции заготовки относительно ее оси, Н·м.

Подставляем все известные параметры для нахождения каждого из моментов и преобразуем уравнение (1) в следующий вид:

$$r\mu Nm_T - \frac{1}{2}(1+i)N \frac{\xi_c}{r} - \frac{2}{3}\pi p_{ш} f \rho_0^3 - \frac{r^2}{2} G \Omega \geq 0, \tag{2}$$

где r – радиус заготовки, м; μ – коэффициент трения при вращении заготовки; N – нормальное давление (усилие прокатки), Н; m_T – проекция единичного вектора для равнодействующей силы трения; i – отношение радиуса заготовки и рабочего радиуса валка; ξ_c – угол захвата заготовки; $p_{ш}$ – нормальное контактное напряжение на торце штанги с заготовкой, Па; f – коэффициент внешнего трения; ρ_0^3 – текущее значение радиуса задающей штанги, м; G – масса заготовки, кг; Ω – угловое ускорение заготовки, рад/с².

Исходя из выражения (2) нормальное давление N для условия вращения заготовки примет вид

$$N \geq \frac{\frac{2}{3}\pi p_{ш} f \rho_0^3 + \frac{r^2}{2} G \Omega}{r\mu m_T - \frac{1}{2}(1+i)\xi_c r}. \tag{3}$$

Наиболее существенное влияние на расчетное значение усилия прокатки N по формуле (3) оказывает угловое ускорение заготовки Ω ввиду того, что заготовка начинает вращение из состояния покоя с максимальной

Значения энергосиловых параметров

Values of power parameters

Расчетный параметр	Значение параметра при положении заготовки в калибре		
	момент захвата заготовки	после 1 оборота валка	полное заполнение калибра
Площадь контакта F , м ²	0,00008	0,001598	0,00601
Средняя скорость деформации $v_{ср}$, м/с	0,99	1,09	0,91
Степень деформации, %	28,4	25,11	26,55
Среднее контактное давление p , МПа	159,9	74,8	41,0
Полное усилие прокатки N , кН	12,8	119,5	246,0
Крутящий момент на валках M , Н·м	1181	11113	22878

ным ускорением при ее контакте с валками. Расчетное значение усилия прокатки, создаваемое в начальный период при заходе в клеть, определяется соотношением $N \geq 12\,793$ Н. Среднее контактное давление составляет 159,9 МПа с учетом площади соприкосновения металла с валком

$$F = \int_s^H b_x dx, \quad (4)$$

где F определяется на каждом витке как сумма F_{ab} и F_{bB_1} (рис. 2); b_x – условная ширина контакта металла с валком, м; S, H – параметры подачи заготовки, м.

Начало процесса прокатки характеризуется захватом заготовки. После одного оборота валка меняется характер обжатия. Участок ab , на котором из цилиндрической заготовки длиной S формируется сфера, и участок bB_1 , где из сферы большего диаметра формируется сфера меньшего диаметра, начинают перестраиваться, а после полного объединения в одну единую линию aB_2 начинается работа калибрующего участка валка, где калибр уже заполняется и имеет максимальное значение усилий. Поэтому в качестве основных трех положений заготовки в калибре для дальнейших расчетов выбира-

ем момент захвата заготовки, состояние после одного оборота валка и стадию полного заполнения калибра.

Проводим расчет нормального давления при захвате заготовки по формуле (3), остальные энергосиловые параметры определяем по методу А.И. Целикова [14, 15] для трех положений заготовки в калибре.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

По значениям энергосиловых параметров, а также по опытными данным, полученным в процессе экспериментальных прокаток, построили моментно-временные зависимости и зависимости среднего контактного давления (рис. 3). Анализ расчетных и экспериментальных значений характеристик показал их совпадение с высокой степенью подобия. Имеющиеся расхождения объясняются эксплуатационным падением мощности двигателя привода клетки, а также износом оборудования и валков, следовательно, низким КПД стана, что при устоявшемся процессе составляет не более 22 %, а в момент захвата достигает 38 %. Это возможно объяснить различием между теоретической и фактической площадью контакта в зоне захвата.

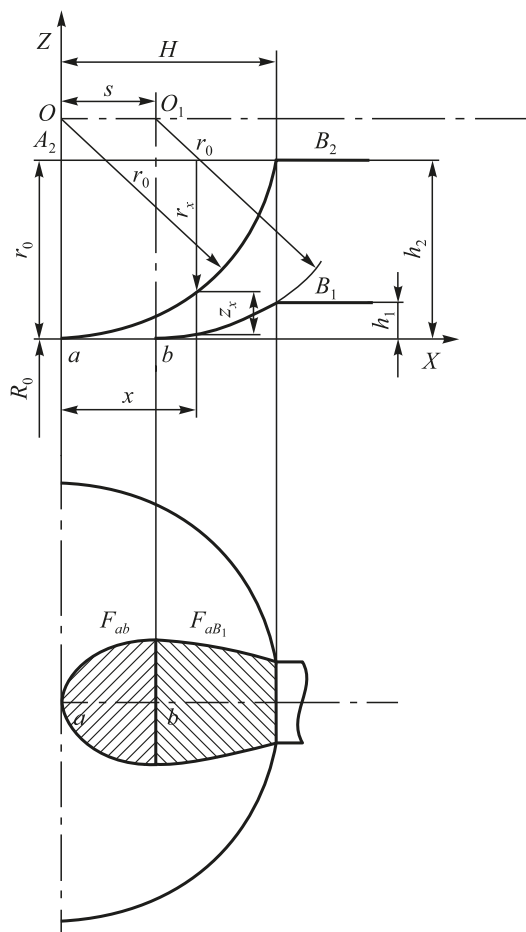


Рис. 2. Схема обжатия

Fig. 2. Compression scheme

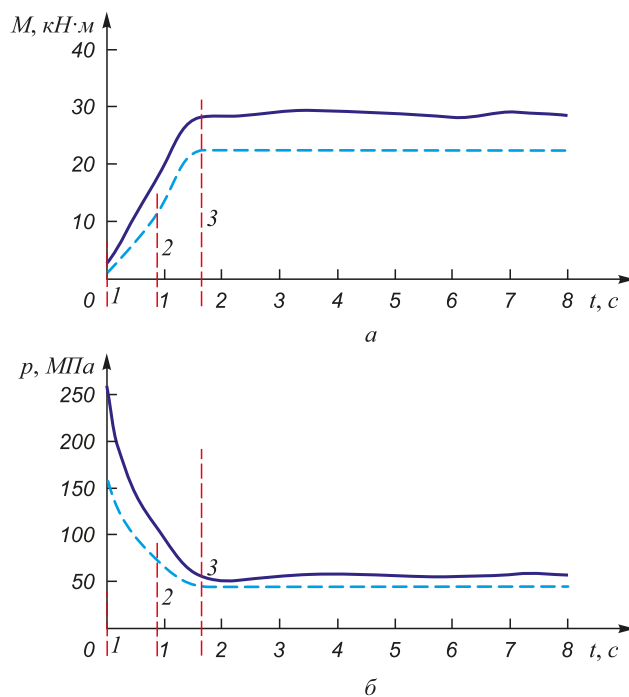


Рис. 3. Моментно-временная характеристика (а) и характеристика среднего контактного давления (б) для расчетных (---) и опытных (—) данных: 1 – момент захвата заготовки; 2 – после 1 оборота валка; 3 – полное заполнение калибра

Fig. 3. Torque-time characteristics (a) and characteristics of average contact pressure (b) for calculated (---) and experimental (—) data: 1 – the moment of blank capture; 2 – after 1 turn of the roll; 3 – full caliber

Из приведенных на рис. 3 характеристик видно, что максимальное давление создается в момент захвата, что, очевидно, приводит к значительному износу и быстрому разрушению реборды первого витка калибра на формирующем участке.

Для повышения ресурса работы прокатного инструмента предложены экспериментальные режимы прокатки, предусматривающие замедление вращения валков в два раза перед попаданием в них заготовки, а после получения вращения – повышение частоты вращения до номинальной. При этом давление во время захвата не превышает максимального. Расчеты показывают: нормальное давление для условия вращения заготовки составляет $N \geq 3529$ Н: это в 3,5 раза меньше, чем давление по базовым режимам.

Экспериментальные режимы деформации предусматривают линейное и квадратичное приращение угловой скорости. Результаты в виде графического изображения характеристик приведены на рис. 4: среднее давление при захвате заготовки не превышает максимального при полном заполнении калибра. Причем, при расчете энергосиловых параметров использовалась формула А.И. Целикова для определения средней скорости деформации, справедливая при постоянной частоте вращения валков:

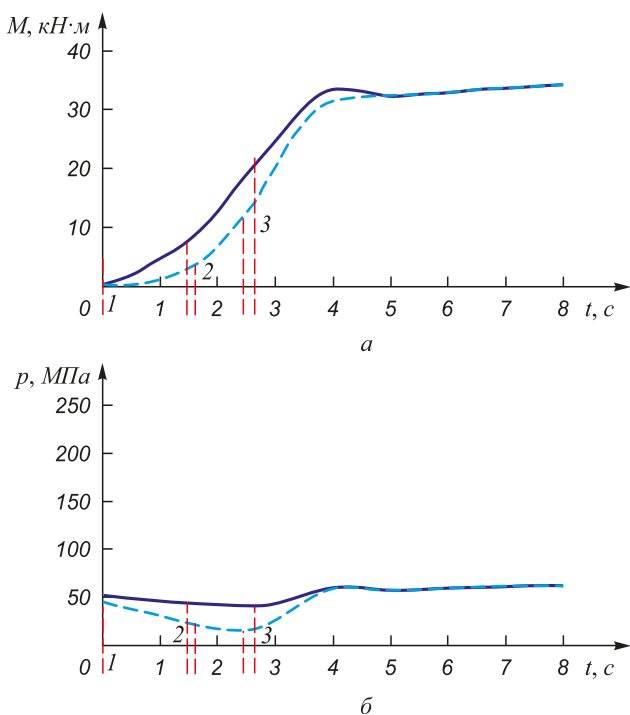


Рис. 4. Эмпирические характеристики при переменной частоте вращения валков по линейному (—) и по квадратичному (---) законам:

1 – момент захвата заготовки; 2 – после 1 оборота валка; 3 – полное заполнение калибра

Fig. 4. Empirical characteristics of variable roll speed for linear (—) and square (---) law:

1 – the moment of blank capture; 2 – after 1 turn of the roll; 3 – full caliber

$$v_{cp} = \frac{1}{b} \int_0^b v_x dx. \tag{5}$$

Для переменной частоты вращения по линейному закону формулу (5) преобразуем в следующий вид:

$$v_{cp} = \frac{1}{b} \int_0^b dx \int_{n_{в.захв}}^{n_{в.раб}} \frac{\pi y}{30} \frac{A_0 - \rho}{\rho} \frac{x}{\sqrt{r_1^2 + x^2}} dy. \tag{6}$$

Для переменной частоты вращения по квадратичному закону формула (5) приобретает вид

$$v_{cp} = \frac{1}{bn_{в}} \int_0^b dx \int_{n_{в.захв}}^{n_{в.раб}} \frac{\pi y^2}{30} \frac{A_0 - \rho}{\rho} \frac{x}{\sqrt{r_1^2 + x^2}} dy; \tag{7}$$

здесь $n_{в.захв}$ и $n_{в.раб}$ – частота вращения валков в момент захвата и частота вращения валков рабочая; $n_{в}$ – номинальная частота вращения валков (при данном условии равна рабочей); b – приведенная ширина реборды в зоне захвата; A_0 – межосевое расстояние валка и заготовки.

Квадратичный закон изменения частоты вращения можно применять для условий, когда время пауз между заготовками ограничено, что позволяет сократить время достижения номинальной частоты вращения до 2 с при том же эффекте.

Как было исследовано, для шаропркатных станов скорость деформации может достигать 2 м/с, в настоящее время лимитирующим фактором для станов является лишь условие захвата, поэтому скорость деформации составляет в среднем 1 м/с. Решив задачу по условию захвата, возможно будет увеличить рабочую частоту вращения валков, при этом, соблюдая условие захвата, описанное в настоящей работе, возможно будет достигнуть равномерного износа валков по всей длине. При этом незначительное уменьшение частоты вращения на захвате (в течение 4 – 6 с) и увеличение частоты вращения валков после захвата в процессе прокатки (прокатка одной заготовки составляет 40 – 80 с в зависимости от ее длины) дадут возможность значительно увеличить производительность шаропркатного стана, одновременно с этим увеличить ресурс валков и, как следствие, уменьшить количество перевалок по износу. В настоящее время стойкость валков для шаров диам. 60 мм составляет 800 – 900 т прокатанного металла, что при часовой производительности 7 т/ч требует перевалок по износу каждые 5 суток.

Техническое решение данной задачи возможно реализовать установкой тиристорного преобразователя с автоматической регулировкой частоты вращения валков.

Выводы

Результаты расчетного метода и его экспериментальная проверка в производственных условиях позволили

установить причины износа и разрушения реборд прокатных валков на формирующем участке в момент захвата заготовки. Уменьшение частоты вращения валков перед подачей заготовки в клеть, а после захвата ее увеличение до номинальных значений приводят к снижению усилия прокатки и равномерному распределению среднего контактного давления по всей длине валка. Результаты расчетного метода имеют удовлетворительную сходимость с данными апробации в промышленных условиях и могут быть использованы на практике. Управление частотой вращения при подаче заготовки в клеть увеличивает срок службы прокатного инструмента и в целом приводит к значительному сокращению времени простоев стана, а также дает возможность увеличения производительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котенок В.И. Развитие теории формообразования профилей в винтовых калибрах и создание высокоэффективных процессов и оборудования для прокатки деталей машин: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – М., 2005. – 37 с.
2. Артес А.Э., Третьохин В.В. Проблема совершенствования производства мельющих шаров. Качество и инновации // Компетентность. 2014. № 3 (114). С. 50 – 53.
3. Скобло Т.С., Автухов А.К., Климанчук В.В. Причины и характеристика отказов прокатных валков станов горячей прокатки // Металлургия машиностроения. 2014. Т. 3. С. 14 – 17.
4. Тетерин П.К. Теория поперечной и винтовой прокатки. – М: Металлургия, 1983. – 270 с.
5. Быстров В.А., Дьяков П.К., Уманец А.Г. Условия эксплуатации и износ валков прокатного стана горячего металла // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 5. С. 24 – 29.
6. Синнаве М. Новые марки прокатных валков и тенденции их производства // Сталь. 2003. № 7. С. 48 – 52.
7. Романцев Б.А., Алешенко А.С., Цюцюра В.Ю., Лубе И.И. Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426 при прокатке непрерывнолитых заготовок большого диаметра // Производство проката. 2016. № 6. С. 20 – 27.
8. Романцев Б.А., Алешенко А.С., Цюцюра В.Ю., Тыщук И.Н., Лубе И.И. Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 50-200 при прокатке непрерывнолитых и горячекатаных заготовок // Металлург. 2016. № 10. С. 57 – 61.
9. Стан ЦКБММ 44 для прокатки шаров 40-80. Технический проект. – М.: ЦНИИТМАШ, 1955.
10. Перетятко В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В. Калибровка валков шаропркатного стана. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 27 – 30.
11. Филиппова М.В., Сметанин С.В., Перетятко В.Н. Компьютерное моделирование прокатки шаров в винтовых калибрах. – В кн.: Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах. Труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016. С. 290 – 294.
12. Филиппова М.В., Перетятко В.Н., Сметанин С.В. Усилия и напряжения при прокатке шара. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 8. С. 587, 588.
13. Целиков А.И., Барбарич М.В. Специальные прокатные станы. – М: Металлургия, 1971. – 336 с.
14. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. – М: Металлургия, 1962. – 496 с.
15. Грудеев А.П. Внешнее трение при прокатке. – М: Металлургия, 1973. – 228 с.
16. Гуляев Ю.Г., Шифрин Е.И., Лубе И.И., Гармашев Д.Ю., Николаенко Ю.Н. Определение геометрических параметров очага деформации в станах поперечно-винтовой прокатки // Сталь. 2013. № 11. С. 53 – 55.
17. Красневский С.М., Макушок Е.М., Щукин В.Я. Разрушение металлов при пластической деформации. – Минск: Наука и техника, 1983. – 173 с.
18. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.
19. Белов В.И., Разгулин И.А. Оценка средних значений степени и скорости деформации с применением программного комплекса Deform 3D при горячей прокатке // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2014. № 20. С. 153 – 157.
20. Перетятко В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В., Федоров А.А. Калибровка валков шаропркатного стана. – В кн.: Металлургия, технология, управление, инновации, качество. Сб. науч. тр. СибГИУ. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2010. С. 258 – 265.
21. Pater Zbigniew. Analysis of helical rolling process of balls formed from a head of a scrapper rail // Advances in Science and Technology Research Journal. 2016. Vol. 10. No. 30. P. 110 – 114.
22. Pater Z., Tomczak J., Bartnicki J., Lovell M.R., Menezes P.L. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2013. Vol. 67. P.1 – 7.
23. Chila P., Pater Z., Tomczak J., Chila P. Numerical analysis of rolling process for producing steel balls using helical rolls. Archives of Metallurgy and Materials. 2016. Vol. 61. No. 2. P. 485 – 492.
24. Pater Z. FEM analysis of the multi-wedge helical rolling process for a workholding bolt. MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 80. P. 130, 131.

Поступила 22 мая 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 12, pp. 927-932.

IMPROVING DYNAMIC REGIME OF ROLLING FOR INCREASING DURABILITY OF BALL-ROLLING MILL ROLLS

V.Yu. Rubtsov, O.I. Shevchenko, M.V. Mironova

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. One of the important reasons for the downtime of ball rolling mills is replacement of rolls due to their wear and tear. The degree and zones of critical wear of ball rolling rolls are investigated in the article, where the greatest wear is observed over the flanges in zone of

billet capture. Conditions necessary to capture the blank and to perform rolling process are analytically determined. Variable frequency method of roll rotations is proposed as a progressive technology for blank supply. The results of tests for its variations in accordance with linear and quadratic law are presented. Known formulas determining average strain rate at rolls rotational speed change are converted for linear and quadratic dependences. Experimental studies have been carried out in conditions of EVRAZ Nizhnetagilsky Metallurgical Plant ball rolling mills during rolling of 60mm ball made of Sh-3G steel. Ex-

periments were performed for given parameters of manual change in rolls rotation speed at blank capture by rollers. The results have shown a significant effect of change in rotational speed on average specific pressure during blank capture. Evaluation of torque-time and average contact pressure for calculated and experimental data are presented. Empirical characteristics are also described at variable rotational speed of rolls according to linear and quadratic law. Acceptable convergence of results of calculated and empirical characteristics is determined. Engineering solution has been proposed for that task. It consists in installation of a thyristor converter. This solution allows reduction of rolls speed before blank capture. Also, this solution will increase frequency to the nominal value according to the given law after blank capture. As an obtained result, there is uniform distribution of average contact pressure over the entire length of the roll under different operating conditions of mill in automatic mode. Application of this technique will reduce wear degree of the rolling tool. At the same time, productivity of ball rolling mill will be maintained. Rolls consumption and number of rolls change will decrease due to rolls wear.

Keywords: screw gauge, flange, blank capture, blank rotation condition, rolling force, mean contact pressure, speed, linear law, square law.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-927-932

REFERENCES

1. Kotenok V.I. *Razvitie teorii formoobrazovaniya profilei v vintovykh kalibrakh i sozдание vysokoeffektivnykh protsessov i oborudovaniya dlya prokatki detalei mashin: Avtoref. dis... doktora tekhn. nauk* [Development of theory of profiles forming in helical roll passes and creation of high effective processes and equipment for rolling of machines parts: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Moscow, 2005, 37 p. (In Russ.).
2. Artes A.E., Tret'yukhin V.V. Enhancement of grinding balls production. Quality and innovations. *Kompetentnost'*. 2014, no. 3 (114), pp. 50–53. (In Russ.).
3. Skoblo T.S., Avtukhov A.K., Klimanchuk V.V. Causes and characteristics of break-down of hot rolling mills rolls. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2014, no. 3, pp. 14–17.
4. Teterin P.K. *Teoriya poperechnoi i vintovoi prokatki* [Theory of cross and screw rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 270 p. (In Russ.).
5. Bystrov V.A., D'yakov P.K., Umanets A.G. Operating conditions and wear of hot metal mill rolls. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 5, pp. 24–29. (In Russ.).
6. Sinnave M. New grades of mill rollers and development of their production. *Stal'*. 2003, no. 7, pp. 48–52. (In Russ.).
7. Romantsev B.A., Aleshchenko A.S., Tsyutsyura V.Yu., Lube I.I. Features of wear of working rolls of TPA 159-426 piercing mill at rolling continuous cast billets of large diameter. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no 6, pp. 20–27. (In Russ.).
8. Romantsev B.A., Aleshchenko A.S., Tsyutsyura V.Yu., Tyshchuk I.N., Lube I.I. Features of piercing mill TPA 50-200 working roll wear during rolling continuously-cast and hot-rolled billets. *Metallurgist*. 2017, no. 9-10, pp. 1062–1069.
9. *Stan CKBMM 44 dlya prokatki sharov 40-80. Tekhnicheskii proekt* [TSKBMM 44 mill for rolling the balls 40-80. Technical project] Moscow: TsNIITMASH, 1955. (In Russ.).
10. Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Calibration of rolls of a ball-rolling mill. Part 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 4, pp. 27–30. (In Russ.).
11. Filippova M.V., Smetanin S.V., Peretyat'ko V.N. Computer modeling of rolling balls in screw gage. In: *Modelirovanie i naukoemkie informatsionnye tekhnologii v tekhnicheskikh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh. Trudy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Modeling and high-tech information technologies in technical and socio-economic systems. Proceedings of the 4th All-Russian Sci. and Pract. Conf. with Int. Participation]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2016, pp. 290–294. (In Russ.).
12. Filippova M.V., Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V. Stresses and strains during rolling of the ball. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 8, pp. 587–588. (In Russ.).
13. Tselikov A.I., Barbarich M.V. *Spetsial'nye prokatnye stany* [Special rolling mills] Moscow: Metallurgiya, 1971, 336 p. (In Russ.).
14. Tselikov A.I. *Teoriya rascheta usilii v prokatnykh stanakh* [Theory of efforts calculation for rolling mills] Moscow: Metallurgiya, 1962, 496 p. (In Russ.).
15. Grudeev A.P. *Vneshnee trenie pri prokatke* [External friction during rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 228 p. (In Russ.).
16. Gulyaev Yu.G., Shifrin E.I., Lube I.I., Garmashev D.Yu., Nikolaenko Yu.N. Geometry of the deforming region in rotary-rolling mills. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 11, pp. 758–761.
17. Krasnevskii S.M., Makushok E.M., Shchukin V.Ya. *Razrushenie metallov pri plasticheskoi deformatsii* [Metals fracture by plastic deformation] Minsk: Nauka i tekhnika, 1983, 173 p. (In Russ.).
18. Novik F.S., Arsov Ya.B. *Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov* [Optimization of metals processing technology by methods of experiments design] Moscow: Mashinostroenie; Sofiya: Tekhnika, 1980, 304 p. (In Russ.).
19. Belov V.I., Razgulin I.A. Estimation of average values of degree and rate of deformation using Deform 3D software at hot rolling. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD*. 2014, no. 20, pp. 153–157. (In Russ.).
20. Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V., Fedorov A.A. Calibration of rolls of a ball-rolling mill. In: *Metallurgiya, tekhnologiya, upravlenie, innovatsii, kachestvo* [Metallurgy, technology, management, innovations, quality]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2010, pp. 258–265. (In Russ.).
21. Pater Zbigniew. Analysis of helical rolling process of balls formed from a head of a scrapper rail. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2016, vol. 10, no. 30, pp. 110–114.
22. Pater Z., Tomczak J., Bartnicki J., Lovell M.R., Menezes P.L. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013, vol. 67, pp. 1–7.
23. Chila P., Pater Z., Tomczak J., Chila P. Numerical analysis of rolling process for producing steel balls using helical rolls. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016, vol. 61, no. 2, pp. 485–492.
24. Pater Z. FEM analysis of the multi-wedge helical rolling process for a workholding bolt. *MATEC Web of Conferences*. 2016, vol. 80, pp. 130, 131.

Information about the authors:

V.Yu. Rubtsov, Postgraduate of the Chair of Metallurgical Technology (Uriylo@mail.ru)

O.I. Shevchenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Metallurgical Technology (Shevchenko.0leg@mail.ru)

M.V. Mironova, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Department of Nizhny Tagil Technological Institute (branch) (blastpurnace@mail.ru)

Received May 22, 2018