

УДК 621.771.014

Штода М. Н.
Самохвал В. М.
Максименко О. П.
Марченко К. К.
Басак И. И.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК В ЧИСТОВОМ ПРОВОЛОЧНОМ БЛОКЕ ПО ПРОХОДАМ ПРИ ПРОКАТКЕ СТАЛЬНОЙ КАТАНКИ Ø 5,5 ММ

Современные прокатные станы для производства катанки характеризуются, прежде всего, высокими скоростями конца прокатки. Сегодня современный проволочный стан, оснащенный проволочным блоком с двухвалковыми клетями, имеет максимальную линейную скорость выхода катанки из валков чистой клетки 110 м/с. Практика высокоскоростной прокатки показывает, что с увеличением скорости прокатки возрастает давление металла на валки, увеличивается износ прокатных валков и привалковой арматуры, уменьшается уширение. Из опыта эксплуатации двухвалковых чистовых проволочных блоков видно, что износ калибров различается и распределяется неравномерно по номерам проходов. В результате – натяжение между клетями по мере работы стана изменяется.

На многие вопросы практики теория процесса высокоскоростной непрерывной прокатки не успевает отвечать. К тому же, исследования условий прокатки по проходам усложняются групповым приводом блока, что исключает возможность опытным путем определить условия эксплуатации каждого калибра. Поэтому большинство исследователей-прокатчиков разрабатывают свои варианты метода расчета технологических параметров процесса прокатки в условиях проволочного блока. Существующие теоретические решения являются сложными и громоздкими. При их выводе использованы параметры, привязанные к особенностям конструкции исследуемого оборудования стана.

Теория непрерывной продольной прокатки начала развиваться в середине XX в. Один из ее основоположников В. Н. Выдрин в работе [1, с. 164] пишет: «Теоретическая разработка вопросов непрерывной прокатки и экспериментальные исследования в этой области начали развиваться лишь в течение последних 8–10 лет ...».

Первое фундаментальное теоретико-экспериментальное исследование процесса непрерывной прокатки описано в работе [2]. Описанные в ней теоретические разработки легли в основу подходов целого ряда ученых, исследовавших процесс высокоскоростной прокатки катанки: Иводитов А. Н. [3], Горбанев А. А. [4], Тимошпольский В. И. [5], Моторыгин [6].

Исследования [2–6] позволили ответить на ряд ключевых вопросов, связанных с проектированием технологии высокоскоростной прокатки катанки. Прежде всего – это зависимость напряжения сопротивления деформации от скорости деформации при значениях более 300 с^{-1} , анализ влияния массовых сил на условия высокоскоростной сортовой прокатки, характер влияния технологических параметров на режим натяжений и размеры катанки, характер износа круглых и овальных калибров в условиях высокоскоростного проволочного блока.

Тем не менее, ряд задач до сих пор остаются нерешенными, что в некоторых случаях приводит исследователей к созданию ошибочных (неточных) теорий. Например, в работе [2, с. 138] при рассмотрении взаимодействия двух клетей непрерывной группы сказано: «Скорость и толщина полосы на выходе из клетки 1 при прочих равных условиях зависят только от натяжения между клетями. Поэтому секундный объем металла, проходящий через эту клетку, есть однозначная функция натяжения». Если посмотреть, какие взаимосвязи прячутся за этим утверждением, становится понятной несостоятельность попыток нахождения указанной функции при использовании современной теории прокатки. Ведь, в зависимости от изменения T_1 (силы натяжения) изменится $F_1 v_1$ (секундный объем). За счет каких изменений? Очевидно, что при увеличении T_1 уменьшится площадь выходного сечения F_1 и увеличится

скорость выхода полосы из первого калибра v_1 . Но при этом степень влияния натяжения на утяжку профиля до сих пор вызывает споры среди исследователей, а влияние натяжения на скорость полосы пока малоизучено. То есть, достоверных данных как влияет натяжение на секундный объем пока нет. В результате имеем неизвестную функцию секундного объема от силы натяжения. Поэтому в математических моделях работ [2–6] использовали обратную зависимость: принимали известным значение секундного объема и исходя из этого определяли величину силы натяжения. Что привело к неточностям в результатах расчетов. Например, в работе [4, с. 98–100] показано наличие подпора в промежутках между 6–7 и 8–9 клетями, при этом из-за малости размеров сечения на практике это вызовет неизбежную аварию.

Среди нераскрытых вопросов остается и распределение нагрузок по модулям высокоскоростного проволочного блока во взаимосвязи их с износом калибров. В тоже время эти знания открывают ряд новых практических возможностей:

1. Выравнивание распределения ключевого (с точки зрения износа калибра) параметра по проходам в чистовом блоке.

2. Разработка режима настройки (калибровки валков), предусматривающего равномерный износ по калибрам чистового блока в течение кампании прокатки.

3. Получение без дополнительного вмешательства в настройку блока высококачественной катанки в любой момент кампании прокатки.

В работе разработан методика расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной прокатки в системе калибров «овал-круг», которая позволяет определить величину нагрузки для каждого прохода проволочного блока. Методика позволяет учитывать особенности конструкции прокатного оборудования.

Целью работы является анализ взаимосвязи между условиями работы каждого модуля чистового блока и износом калибров по проходам блока.

В работе была усовершенствована методика расчета энергосиловых параметров прокатки горячей полосы в проволочном блоке в калибрах системы «овал-круг». Исходными данными для расчета являются: характеристики блока (диаметры валков, передаточные числа и др.); размеры калибров по модулям; марка стали, прокатываемой полосы; исходная температура раската на входе в блок; частота вращения двигателей привода блока; размеры подката, поступающего в блок; размеры раскатов по модулям блока.

Последовательность расчета включает определение геометрических параметров для калибров каждого модуля (обжатия, уширение, коэффициент вытяжки, длина очага и др.) и определение скоростного режима прокатки. Далее расчет осуществляется последовательно, то есть определение параметров прокатки для последующего модуля выполняется только после завершения расчета параметров для предыдущего. Каждый цикл такого расчета включает: определение снижения температуры за время транспортировки к калибру и температуры раската на входе в калибр; расчет скорости деформации, степени деформации для данного прохода; расчет сопротивления металла деформации; расчет коэффициента трения и коэффициента напряженного состояния; расчет среднего давления и площади контакта металла с валками; расчет силы и момента прокатки и затраченной мощности; определение повышения температуры раската за счет работы пластической деформации и температуры раската на выходе из очага деформации.

Катающий радиус валков, в зависимости от формы калибра, рассчитывали по формулам [9]:

$$\text{– для овальных калибров: } R_k = \frac{1}{2} \left[D_0 - \frac{2 \cdot h_i - g}{3} \right];$$

$$\text{– для круглых калибров: } R_k = \frac{1}{2} [D_0 - 0,785 \cdot h_i],$$

где D_0 – диаметр валков по буртам;

h_i – высота калибра (обжимаемый размер);

g – зазор в калибре.

Скоростной режим степень деформации и скорость деформации, определяем по общеизвестным формулам.

Определение температуры раската выполняли с использованием методики А. И. Целикова [7], которая учитывает снижение температуры за счет лучеиспускания в промежутке времени перемещения раската к калибру и прокатки в калибре, а также повышение температуры за счет работы пластической деформации.

Для определения сопротивления деформации предлагается использовать методику Зюзина [8], которая основывается на определении базового сопротивления деформирования металла определенного химического состава при «нормированных» условиях, и учете влияния отклонений от этих условий фактических значений температуры, степени и скорости деформации через термомеханические коэффициенты. В работе [8] модель представлена в виде:

$$\sigma_s = \sigma_o \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u,$$

где σ_o – базовое сопротивление деформации, Н/мм²;

k_t, k_ε, k_u – термомеханические коэффициенты, учитывающие влияние температуры, степени деформации и скорости деформации, соответственно.

Базовое сопротивление деформации получено для нормированных условий: температура 1000 °С; степень деформации 10 %; скорость деформации 10 с⁻¹. Для упрощения расчетов используют аппроксимацию графических зависимостей для определения термомеханических коэффициентов. Например, в справочнике [9] предложены зависимости:

$$k_t = 0,57 + 0,0045(1200 - t) \sqrt{\frac{1200 - t}{t}};$$

$$k_\varepsilon = 0,47\sqrt{\varepsilon} - 0,045\varepsilon, \text{ для } \varepsilon \leq 15\%;$$

$$k_\varepsilon = 0,82 + 0,082\sqrt{\varepsilon}, \text{ для } \varepsilon > 15\%,$$

где t – температура прокатываемого металла, °С;

ε – степень деформации, как отношение абсолютного обжатия к начальной толщине раската, в %;

Анализ технической литературы показывает сравнительно незначительное влияние на сопротивление деформации средней скорости деформации в диапазоне высоких значений этого параметра. Такой вывод подтверждается экспериментальными данными [5, рис. 5.1, с. 134], согласно которым «сопротивление деформации возрастает до значений скорости деформации около 300 с⁻¹», а при дальнейшем увеличении скорости деформации сохраняется постоянным. С учетом выявленной особенности влияния скорости деформации в диапазоне больших значений предлагается для модели Зюзина для всего исследуемого диапазона значений скорости деформации (от 0,005 до 300 с⁻¹) использовать аппроксимацию экспериментальных данных для стали марки 08кп [10]:

$$k_u = 1,009 \cdot U^{0,1455},$$

где U – скорость деформации, с⁻¹;

для значений $U > 300$ с⁻¹ значение, полученное при скорости 300 с⁻¹.

При анализе модели сопротивления деформации Шиды-Ли (Shida S., Lee Y.) [11, 12] было замечено, что для условий сортовой прокатки использование показателя истинной деформации вместо степени деформации обеспечивает более высокую точность расчета сопротивления деформации, чем при использовании метода приведенной (соответственной) полосы. В условиях блоков проволочных станов, где используется система калибров «овал-круг», предложено вместо среднего значения степени деформации использовать относительное обжатие, определяемое через площади профиля на входе и выходе очага деформации:

$$\varepsilon_A = \frac{A_{in} - A_{ex}}{A_{in}},$$

где A_{in} , A_{ex} – соответственно, площадь профиля на входе в очаг деформации и на выходе из него.

Использование относительного обжатия, определяемого через площади профиля на входе и выходе очага деформации, взамен степени деформации позволяет отказаться от упрощенно-усредненного значения приведенной степени деформации. Для первого прохода в проволочном блоке стана 400/200 ПАО «ДМК» при прокатке катанки $\varnothing 5,5$ мм из стали 08кп по методике Зюзина с учетом предложенных изменений получим:

$$\varepsilon_A = \frac{224,3 - 185,5}{224,3} = 0,173 \quad \text{или} \quad 17,3 \%,$$

тогда

$$k_\varepsilon = 0,82 + 0,082\sqrt{17,3} = 1,161.$$

$$\text{Скорость деформации: } U = \frac{V_i \cdot \varepsilon_A}{l_d} \quad U = \frac{(1000 \cdot 13,04) \cdot 0,173}{20,98} = 107,5 \text{ с}^{-1}.$$

$$k_u = 1,009 \cdot 107,5^{0,1455} = 1,99.$$

Подставляя значения коэффициентов в основное выражение методики Зюзина, получим:

$$\sigma_s = 84,1 \cdot 0,95 \cdot 1,161 \cdot 1,99 = 212,5 \text{ Н / мм}^2.$$

Рассчитанное значение сопротивления деформации превышает значение, определенное из графиков (200 Н/мм^2), но это превышение составляет 6,25 %. Такое отклонение для значений, определяемых по графикам, считается допустимым. Поэтому, описанные изменения методики Зюзина для расчета сопротивления деформации можно использовать для дальнейших расчетов энергосиловых параметров.

После расчета сопротивления деформации в соответствии с методикой В. К. Смирнова [13] при использовании формул для определения площади контакта раската с валками [9] и коэффициента плеча момента прокатки [9] определяют силу, момент и мощность прокатки.

Для оценки точности предлагаемого алгоритма выполнили расчеты для условий прокатки в блоке 200 катанки диаметром 5,5 мм из низкоуглеродистой стали (SAE 1006, 08кп). Температура, измеренная перед блоком, была равной 936 °С (в расчете принято 950 °С). Частота вращения двигателей 1368 об/мин., линейная скорость на выходе из блока 96 м/с.

Фактические токовые нагрузки и моменты на двигателях блока на примере одного раската (прокатка 2015-10-09 в 7-00) показаны на рис. 1. Согласно результатам статистической обработки данных приведенных осциллограмм, средняя токовая нагрузка двигателей № 1 и № 2 получена 32,73 % и 32,71 % от номинальной. Нагрузка по моментам, соответственно, составила 46,58 % и 46,64 % от номинального момента.

Исходные параметры и результаты расчета показаны на рис. 2. Анализ расчетных данных сводился к определению нагрузок на двигатели и сравнению их с экспериментальными данными. Так сумма моментов, приведенных к трансмиссионным валам № 1 (сторона овалов) и № 2 (сторона круглых калибров), соответственно составила 6,758 и 4,237 кН·м. С учетом передаточных отношений делителя мощности, моменты, приведенные к валам соответствующих двигателей, получили равными 12,24 и 9,77 кН·м, а общий момент 22,01 кН·м. Учитывая кинематическую связь двигателей через делитель мощности, принимаем одинаковую нагрузку на каждый из двигателей, т. е. моменты на каждом из двигателей равны 11 кН·м. При номинальном крутящем моменте каждого из двигателей 23,8 кН·м, их загруженность составит $11/23,8 = 0,4622$ или 46,22 %. Полученные значения с достаточной точностью соответствуют фактическим нагрузкам, зафиксированным на осциллограммах (46,58 % и 46,64 %).

Таким образом, методика и разработанный алгоритм расчета энергосиловых параметров, обеспечивают инженерную точность определения силы прокатки, момента прокатки и момента на валу двигателя. Предлагаемый алгоритм может быть использован для анализа условий работы чистового проволочного блока.



Рис. 1. Скриншот токовых нагрузок и моментов на двигателях блока

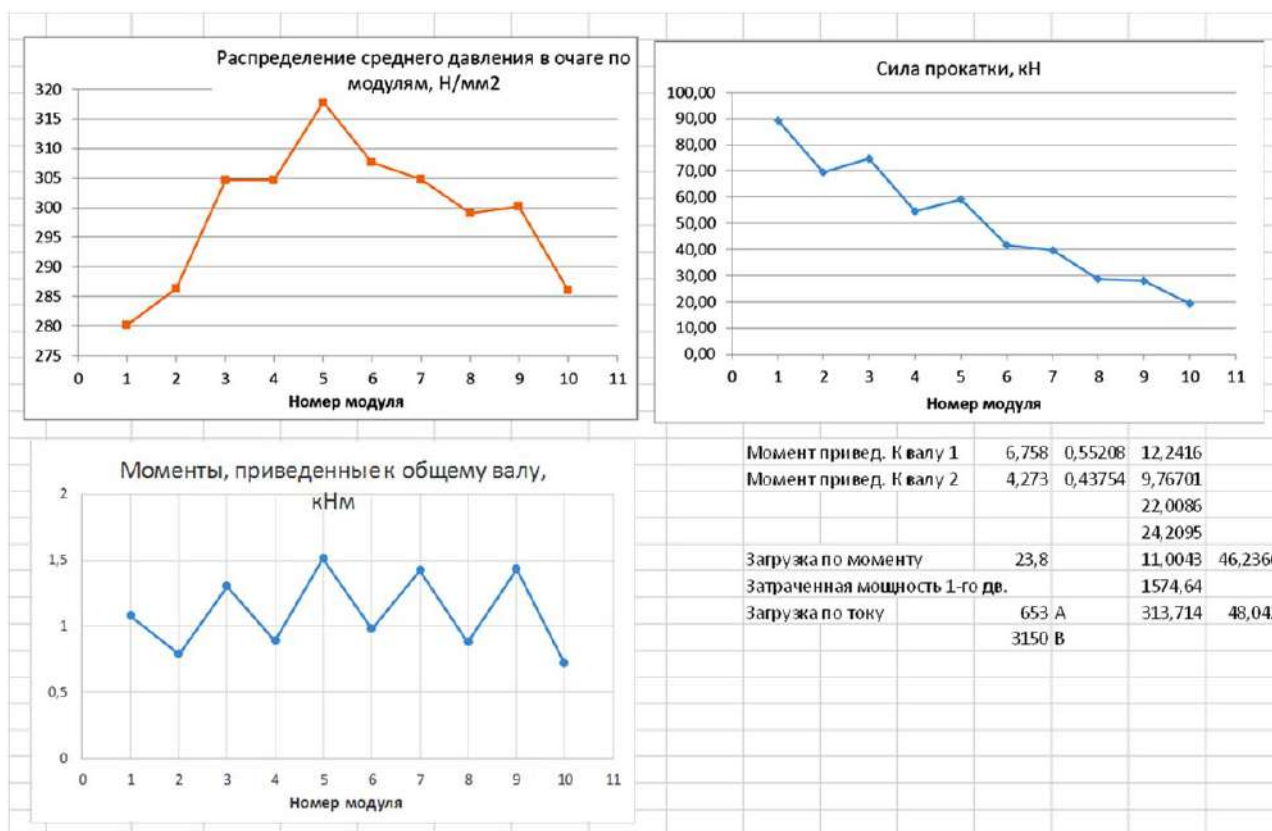


Рис. 2. Анализ расчетных данных

Для выявления взаимосвязи силовых параметров прокатки в калибрах с их износом сопоставили распределение нагрузок по проходам проволочного блока 200 ПАО «ДМК» и экспериментальными исследованиями износа калибров при прокатке катанки диаметром 5,5 мм.

Износ калибров определяли фотографическим методом при шестикратном увеличении. На рис. 3 приведены фотографии зазоров между выработанным калибром валков и шаблоном для десяти модулей проволочного блока. Цифры на фотографии указывают максимальную глубину износа калибров. В первых семи калибрах за кампанию работы валков было прокатано 2756 т металла. В 8–10 модулях количество прокатанного металла составило: в первых номерах калибров этих модулей по 1350 т, во вторых – по 1406 т. Значения глубины износа ручьев калибров верхнего и нижнего валков приведены в табл. 1.

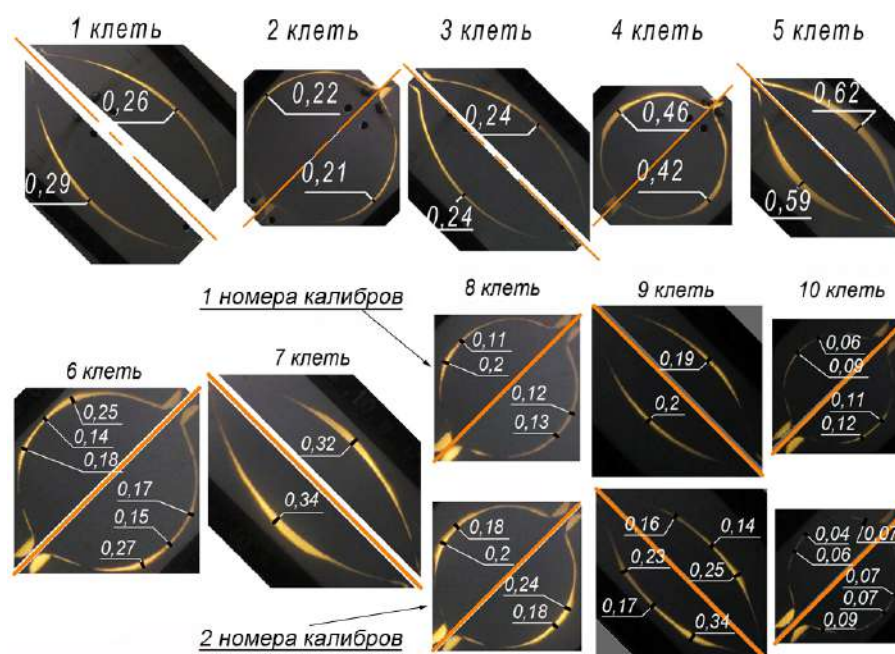


Рис. 3. Зазоры между ручьями калибров и шаблоном для всех модулей проволочного блока после кампании работы

Таблица 1

Результаты исследования износа ручьев калибров верхнего и нижнего валков проволочного блока стана 400/200 ПАО «ДМК»

Черновые калибры								
	валок	Номер модуля						
		1	2	3	4	5	6	7
Износ, мм	верхний	0,26	0,24	0,24	0,46	0,62	0,14(0,25)	0,32
	нижний	0,29	0,21	0,24	0,53	0,59	0,15(0,27)	0,34
Чистовые калибры								
	№ калибра	Валок	Номер модуля					
			8	9	10			
Износ, мм	1	верхний	0,11(0,2)	0,19	0,09(0,06)			
		нижний	0,13(0,12)	0,2	0,11(0,12)			
	2	верхний	0,18(0,2)	0,14 (0,25)	0,04(0,07)			
		нижний	0,18(0,24)	0,17 (0,34)	0,07(0,09)			

Примечание: в скобках указан износ по диагонали калибра

Как видно из табл. 1 и рис. 3, наибольший износ поверхности ручьев калибра наблюдается в пятом модуле, он составляет 0,5–0,6 мм. Сравнение экспериментальных данных по износу калибров с результатами расчета нагрузок показывает, что при прокатке катанки диаметром 5,5 мм в пятом калибре возникает максимальный износ и максимальное среднее давление металла на валки $317,8 \text{ Н/мм}^2$. Сила прокатки снижается от 1 прохода к последнему, а момент прокатки для овальных калибров № 5, 7 и 9 остается практически на одном уровне (см. рис. 2). Поэтому очевидно, что на величину износа ручьев овальных и круглых калибров наибольшее влияние оказывает среднее давление металла в очаге деформации.

ВЫВОДЫ

Разработана методика расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной прокатки в системе калибров «овал-круг», который позволяет определить величину нагрузки для каждого прохода проволочного блока. Методика позволяет учитывать особенности конструкции прокатного оборудования. Анализ расчетных данных распределения нагрузок по модулям чистового проволочного блока при прокатке катанки диаметром 5,5 мм (рис. 2) показывает, что максимальное значение среднего давления наблюдается в 5 модуле, что приводит к повышенному износу валков в этом модуле (рис. 3). Рекомендуется при разработке нового режима настройки блока (разработке новой калибровки валков) учесть этот факт и перераспределить обжатия так, чтобы выровнять распределение средних давлений по модулям.

Для определения напряжения сопротивления деформации предложено использовать модифицированную методику Зюзина. Сравнение рассчитанного значения сопротивления деформации по предлагаемой методике с опытным значением, показывает превышение расчетного значения на 6,25 %. Такое отклонение для значений, определяемых по графикам, считается допустимым.

Методика и разработанный алгоритм расчета энергосиловых параметров обеспечивают инженерную точность определения силы прокатки, момента прокатки и момента на валу двигателя. Так как расчетные значения моментов на каждом двигателе чистового проволочного блока равны 11 кН·м или 46,22 % от номинального момента, а фактические моменты 46,58 % и 46,64 % от номинального момента. Предлагаемый алгоритм может быть использован для анализа условий работы чистового проволочного блока.

Методика расчета энергосиловых параметров адекватно описывает характер распределения нагрузок по клетям проволочного блока; на величину износа калибров максимальное влияние оказывает среднее давление в очаге деформации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов / В. Н. Выдрин. – Свердловск : Металлургиздат, 1960. – 256 с.
2. Выдрин В. Н. Процесс непрерывной прокатки / В. Н. Выдрин, А. С. Федосиенко, В. И. Крайнов. – М. : Металлургия, 1970. – 456 с.
3. Иводитов А. Н. Разработка и освоение производства высококачественной катанки / А. Н. Иводитов, А. А. Горбанев. – М. : Металлургия, 1989. – 256 с.
4. Горбанев А. А. Теоретические и технологические основы высокоскоростной прокатки катанки / А. А. Горбанев, С. М. Жучков, В. В. Филипов [и др.]. – Мн. : Выш. шк., 2003. – 287 с. – ISBN 985-06-0793-9
5. Тимошпольский В. И. Производство высокоуглеродистой катанки на металлургических агрегатах высшего технического уровня / В. И. Тимошпольский, Н. В. Андрианов, С. М. Жучков [и др.]. – Мн. : Бел. наука, 2004. – 237 с. – ISBN 985-08-0617-6.
6. Моторыгин М. Е. Совершенствование технологии непрерывной прокатки круглой стали в блоках с групповым приводом на основе результатов моделирования межклетевых натяжений : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.09 / Матвей Евгеньевич Моторыгин. – Магнитогорск, 2010. – 18 с.
7. Целиков А. И. Теория прокатки : справочник / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин [и др.]. – М. : Металлургия, 1982. – 335 с.
8. Зюзин В. И. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке / В. И. Зюзин, М. Я. Бровман, А. Ф. Мельников. – М. : Металлургия, 1964. – 270 с.
9. Гетманец В. В. Справочник калибровщика / В. В. Гетманец, С. С. Тильга, А. Г. Кузьменко, В. Л. Романенко. – Кривой Рог : Минерал, 1995. – 345 с.
10. Третьяков А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением. Справочник [Изд. второе, перераб. и дополн.] / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.

11. Shida S. *Effect of Carbon Content, Temperature and Strain Rate on Compressive Flow Stress of Carbon Steels* / Hitachi Research Laboratory Report. – 1974. – P. 1–9.
12. *Study for the Constitutive Equation of Carbon Steel subjected to Large Strains, High Temperatures and High Strain Rates* / Lee Y., Kim B.M., Park K.J., Seo S.W. and Min O. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – Volume 130–131. – Pp. 181–188.
13. Смирнов В. К. *Калибровка прокатных валков : учеб. пособ. для вузов* / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инатович. – М. : *Металлургия*, 1987. – 368 с.

REFERENCES

1. Vydrin V. N. *Dinamika prokatnyh stanov* / V. N. Vydrin. – Sverdlovsk : *Metallurgizdat*, 1960. – 256 s.
2. Vydrin V. N. *Process nepreryvnoj prokatki* / V. N. Vydrin, A. S. Fedosienko, V. I. Krajnov. – М. : *Metallurgija*, 1970. – 456 s.
3. Ivoditov A. N. *Razrabotka i osvoenie proizvodstva vysokokachestvennoj katanki* / A. N. Ivoditov, A. A. Gorbanev. – М. : *Metallurgija*. 1989. – 256 s.
4. Gorbanev A. A. *Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy vysokoskorostnoj prokatki katanki* / A. A. Gorbanev, S. M. Zhuchkov, V. V. Filipov [i dr.]. – Мн. : *Vysh. shk.*, 2003. – 287 s. – ISBN 985-06-0793-9
5. Timoshpol'skij V. I. *Proizvodstvo vysokouglerodistoj katanki na metallurgicheskikh agregatah vysshego tehnicheskogo urovnja* / V. I. Timoshpol'skij, N. V. Andrianov, S. M. Zhuchkov [i dr.]. – Мн. : *Bel. nauka*, 2004. – 237 s. – ISBN 985-08-0617-6.
6. Motorygin M. E. *Sovershenstvovanie tehnologii nepreryvnoj prokatki krugloj stali v blokah s gruppovym privodom na osnove rezul'tatov modelirovaniya mezhklet'evyh natjazhenij* : avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk : 05.02.09 / Matvej Evgen'evich Motorygin. – Magnitogorsk, 2010. – 18 s.
7. Celikov A. I. *Teorija prokatki : spravochnik* / A. I. Celikov, A. D. Tomlenov, V. I. Zjuzin [i dr.]. – М. : *Metallurgija*, 1982. – 335 s.
8. Zjuzin V. I. *Soprotivlenie deformacii stalej pri gorjachej prokatke* / V. I. Zjuzin, M. Ja. Brovman, A. F. Mel'nikov. – М. : *Metallurgija*, 1964. – 270 s.
9. Getmanec V. V. *Spravochnik kalibrovshhika* / V. V. Getmanec, S. S. Til'ga, A. G. Kuz'menko, V. L. Romanenko. – Krivoj Rog : *Mineral*, 1995. – 345 s.
10. Tret'jakov A. V. *Mehanicheskie svojstva metallov i splavov pri obrabotke metallov davleniem: Spravochnik [Izd. vtoroe, pererab. i dopoln.]* / A. V. Tret'jakov, V. I. Zjuzin. – М. : *Metallurgija*, 1973. – 224 s.
11. Shida S. *Effect of Carbon Content, Temperature and Strain Rate on Compressive Flow Stress of Carbon Steels* / Hitachi Research Laboratory Report. – 1974. – P. 1–9.
12. *Study for the Constitutive Equation of Carbon Steel subjected to Large Strains, High Temperatures and High Strain Rates* / Lee Y., Kim B.M., Park K.J., Seo S.W. and Min O. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – Volume 130–131. – Pp. 181–188.
13. Smirnov V. K. *Kalibrovka prokatnyh valkov : ucheb. posob. dlja vuzov* / V. K. Smirnov, V. A. Shilov, Ju. V. Inatovich. – М. : *Metallurgija*, 1987. – 368 s.

- Штода М. Н. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД ДГТУ;
Самохвал В. М. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД ДГТУ;
Максименко О. П. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД ДГТУ;
Марченко К. К. – инженер ПАО «ДМК»;
Басак И. И. – студент ДГТУ.

ДГТУ – Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское.

ПАО «ДМК» – Публичное акционерное общество «Днепропетровский металлургический комбинат», г. Каменское.

E-mail: maksshtoda@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14.03.2018 г.