

разностной задачи. Время счета одного варианта на современном ПК при сетке 20x20 составляет доли секунды, что позволяет выполнять неограниченное число вычислительных экспериментов.

Список литературы: 1. Гридин А.Ю. Математическое моделирование температурного поля металла и валков в процессе валковой разливки-прокатки // Обработка материалов давлением. – 2009. – №1 (20). – С. 75-83. 2. Ноговицын А.В. Исследование вязкопластического течения металла при плоской прокатке // Известия АН СССР. Металлы. – 1986. – №3. – С.88-96. 3. Ноговицын А.В. Влияние кинематических граничных условий на напряженно-деформированное состояние при плоской прокатке // Известия вузов. Черная металлургия. – 1988. – №7. – С.50-55. 4. Ноговицын А.В. Исследование кинематических параметров контактного взаимодействия металла и валка при прокатке с помощью математической модели вязкопластического течения // Известия вузов. – Черная металлургия. – 1987. – №12. – С.63-68. 5. Ноговицын А.В. Прогнозирование напряженно-деформированного и структурного состояния стали при горячей прокатке. // Черные металлы. – Апрель 2000. С.16-20. 6. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с. 7. Годунов С.К., Рябенкий В.С. Разностные схемы.- М.: Наука, 1977. – 440 с. 8. Тепловые процессы при обработке металлов давлением//М.Л.Яловой, М.А.Тылкин, П.И.Полухин и др.- М.: Высшая школа,1973. – 632 с. 9. Гридин А.Ю. Влияние температурно-скоростных параметров процесса непрерывной валковой разливки на тепловое состояние металла // Теория и практика металлургии. – 2009. – №3. С. 71-75.

Надійшла до редколегії 15.10.2012

Математическое моделирование гидродинамики расплава металла при валковой разливке-прокатке. / Ноговицын А.В., Баранов И.Р. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – №47(953). – С. 144-153. – Бібліогр.: 9 назв.

Запропоновано математичну модель течії розплаву металу в міжвалковому зазорі при валковій розливці. Рідкий метал розглядали як лінійну в'язку середу. Методом скінченних різниць вирішували систему, що складається з рівняння Лапласа для функції струму та рівняння Пуассона для напруженості вихору, перетворену для біциліндричних координат. Наведено результати розрахунку швидкостей течії.

Ключові слова: валкова розливка металу, рівняння Лапласа і Пуассона, біциліндрична система координат, метод скінченних різниць.

A mathematical model of the flow of molten metal in the roll gap in the roll casting. The liquid metal is considered as a linear viscous medium. Finite difference method to solve the system consisting of the Laplace equation for the stream function and the Poisson equation for the strength of the vortex, converted to bicylindrical coordinates. The results of the calculation of the flow velocity.

Keywords: roller casting metal, Laplace and Poisson bicylindrical coordinate system, the method of finite differences.

УДК 621.771.073: 621.771.237

А. Г. ПРИСЯЖНЫЙ, ст. препод., ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖВАЛКОВОЙ ПОГОННОЙ НАГРУЗКИ В КЛЕТЯХ «КВАРТО» СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПРОФИЛИРОВКИ И ПРОТИВОИЗГИБА РАБОЧИХ ВАЛКОВ

В статье приведена математическая модель, предназначенная для расчета межвалковой погонной нагрузки в клетях «кварто» станов холодной прокатки тонких полос с учетом профилировки и противоизгиба рабочих валков. Полученные в результате численной реализации представленной математической модели расчетные распределения межвалковой погонной нагрузки по длине контакта опорных и рабочих валков соответствуют имеющимся в литературе экспериментальным данным.

Ключевые слова: валки, межвалковая погонная нагрузка, профилировка, противоизгиб, упругое сжатие.

© А. Г. Присяжный, 2012

Введение. Расширение сортамента холоднокатаных относительно тонких полос, ужесточение требований к показателям их качества и связанная с этим необходимость в дальнейшем совершенствовании конструкции клетей «кварто» непрерывных и реверсивных станов холодной тонколистовой прокатки обуславливают повышение требований к точности математических моделей, обеспечивающих работу систем автоматического регулирования толщины, а также профиля и формы прокатываемой тонколистовой стали [1-3]. В частности, достоверность методов расчетного определения межвалковой погонной нагрузки в 4^х-валковых клетях станов холодной прокатки в значительной степени определяет точность прогнозирования поперечной разнотолщинности проката и, следовательно, эффективность работы систем автоматического регулирования профиля и формы полос [4-6].

Анализ последних публикаций и постановка проблемы. Наиболее полное теоретическое и экспериментальное исследование межвалковой погонной нагрузки в клетях «кварто» станов холодной прокатки относительно тонких полос, основанное на использовании поляризационно-оптического метода, проведено В.П. Полухиным [5,6]. При этом предложенные в работах [5,6] расчетные формулы нельзя считать универсальными, т.к. они не позволяют учесть влияние на межвалковую погонную нагрузку профилировки рабочих валков. Вместе с тем, как показывают экспериментальные данные [4], учет влияния указанного фактора является необходимым, т.к. профилировка рабочих валков обуславливает перераспределение межвалковой погонной нагрузки по длине их контакта с опорными валками, в результате чего изменяется поперечная разнотолщинность холоднокатаных относительно тонких полос [5,6].

Формулировка цели статьи. Целью статьи является разработка и апробация математической модели для расчета межвалковой погонной нагрузки в клетях «кварто» станов холодной тонколистовой прокатки с учетом влияния профилировки и противоизгиба рабочих валков.

Изложение основного материала статьи. По данным авторов работ [4-6] распределение межвалковой погонной нагрузки по длине контакта рабочих и опорных валков клетей «кварто» станов холодной прокатки тонколистовой стали является нелинейным (рис.1) и поэтому для его аналитического описания может быть рекомендовано следующее выражение:

$$q_{mzцил} = q_k + (q_c - q_k) \left(\frac{z - c_{on}}{A_{on} / 2 - c_{on}} \right)^{a_q}, \quad (1)$$

где q_k и q_c – соответственно величина межвалковой погонной нагрузки на краю и посередине бочки опорного валка (рис. 1), определяемая на основе экспериментальных данных;

z – текущая вдоль оси опорного валка координата;

c_{on} – расстояние от точки приложения реакции опоры до края бочки опорного валка;

A_{on} – расстояние между осями нажимных устройств;

a_q – степенной показатель.

Уравнение (1) и все сделанные на его основе выводы вследствие симметричности валкового узла соответствуют половине длины контакта рабочих и опорных валков.

Степенной показатель a_q определяется из условия, согласно которому площадь эпюры межвалковой погонной нагрузки, соответствующая половине длины контакта рабочего и опорного валков, равна реакции опоры опорного валка. Допуская, что контакт рабочего и опорного валков происходит по всей длине L_c (рис.1), для определения степенного показателя a_q получили следующее уравнение:

$$\alpha_q = \frac{q_c - q_k}{\left[(P + 2Q_{np}) / L_6 \right] - q_k} - 1, \quad (2)$$

где P – сила прокатки;

Q_{np} – сила противоизгиба рабочих валков;

L_6 – длина бочки валков.

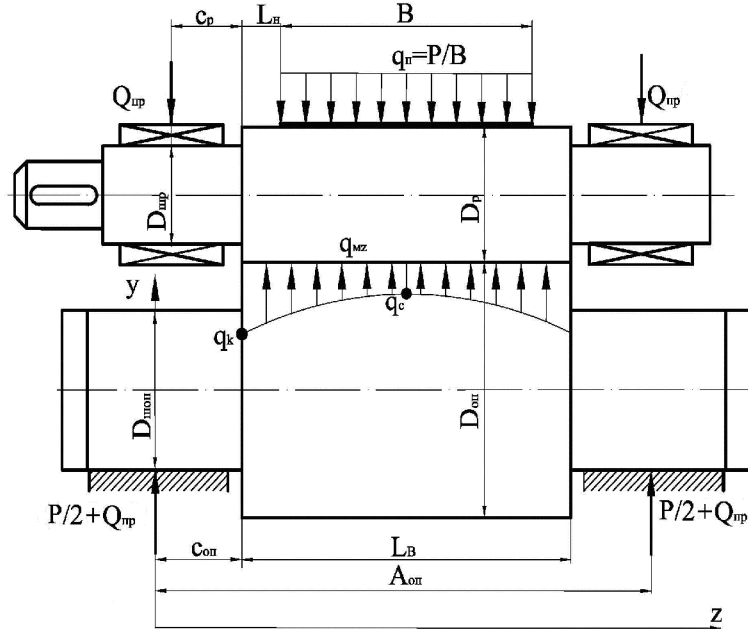


Рис. 1 – Расчетная схема валкового узла четырехвалковой клетки

Межвалковую погонную нагрузку на краю и посередине бочки опорных валков рекомендуется определять на основе многочисленных экспериментальных данных В.П. Полухина [5,6], полученных поляризационно-оптическим методом:

$$q_k = a_0 + a_2; \quad q_c = a_0; \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{(8252 - 34\alpha)q_{мсп} - 13440B_0\alpha}{13440 + 29\alpha}; \quad (4)$$

$$a_2 = 3(q_{мсп} - a_0); \quad (5)$$

$$q_{мсп} = P / L_6 + 2Q_{np} / L_6; \quad (6)$$

$$B_0 = \frac{P}{120L_6}(\beta_k^5 - \beta_n^5) - \frac{P}{96L_6}(\beta_k - \beta_n) - \frac{P}{24L_6}(0,5 - \beta_n)^4 + \frac{Q_{np}c_p}{48L_6^2}; \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1 - \omega_{г.п}^2}{1 - \omega_{г.он}^2} \frac{E_{г.он}}{E_{г.п}} \left[\left(878 \frac{A_{он}L_6}{D_{он}^2} + 1480 \right) \left(\frac{D_p}{D_{он}} \right)^2 - \left(1440 \frac{A_{он}L_6}{D_{он}^2} + 2350 \right) \frac{D_p}{D_{он}} + \left(618 \frac{A_{он}L_6}{D_{он}^2} + 885 \right) \right]; \quad (8)$$

где $q_{мсп}$ – усредненная межвалковая погонная нагрузка;

α – показатель гибкости, характеризующий геометрические размеры вала и его жесткость;

$\beta_n = L_n / L_6$ – приведенное расстояние от края бочки рабочего валка (рис.1) до начала распределенной нагрузки (L_n – абсолютное расстояние от края бочки рабочего валка до начала распределенной нагрузки);

$\beta_k = (L_n + B) / L_6$ – то же, до конца распределенной нагрузки (B – ширина прокатываемой полосы);

c_p – плечо приложения силы противоизгиба рабочих валков;
 $\omega_{e.p}, \omega_{e.on}$ – соответственно коэффициенты Пуассона материала рабочих и опорных валков;
 $E_{e.p}, E_{e.on}$ – соответственно модули упругости материала рабочих и опорных валков;
 D_p, D_{on} – соответственно диаметры рабочих и опорных валков.

Формулы (3)-(8) позволяют рассчитать межвалковую погонную нагрузку в случае применения цилиндрических рабочих валков, что не в полной мере соответствует реальным условиям холодной тонколистовой прокатки. Чтобы учесть влияние профилировки рабочего валка, необходимо, прежде всего, определить межвалковую погонную нагрузку, обеспечивающую контакт опорного и рабочего валков по всей длине L_e (рис.1), предварительно задав изменение выпуклости образующей бочки рабочего валка в зависимости от координаты z в виде следующего уравнения:

$$\Delta R_z = \Delta R \left(\frac{2z}{L_e} \right)^{0,5}, \quad (9)$$

где ΔR – величина выпуклости образующей бочки рабочего валка при $z=0,5L_e$.

С другой стороны уравнение (9) также позволяет определить в зависимости от координаты z величину упругого сжатия рабочего и опорного валков (или величину сближения осей рабочего и опорного валков, что то же самое), необходимую для достижения их контакта по всей длине L_e . При этом для расчета межвалковой погонной нагрузки, обеспечивающей заданную в соответствии с уравнением (9) величину упругого сжатия рабочего и опорного валков в определенной точке их контакта, используется решение Б.С. Ковальским [5,6] контактной задачи об упругом сжатии двух цилиндров:

$$\delta_z = \frac{2q_{MZ}^*}{\pi} \left[\frac{1-\omega_{e.p}^2}{E_{e.p}} \left(\ln \frac{D_p}{b_z} + 0,407 \right) + \frac{1-\omega_{e.on}^2}{E_{e.on}} \left(\ln \frac{D_{on}}{b_z} + 0,407 \right) \right]; \quad (10)$$

$$b_z = 1,128 \sqrt{q_{MZ}^* \frac{R_p R_{on}}{R_p + R_{on}} \left(\frac{1-\omega_{e.p}^2}{E_{e.p}} + \frac{1-\omega_{e.on}^2}{E_{e.on}} \right)}, \quad (11)$$

где q_{MZ}^* – межвалковая погонная нагрузка, обеспечивающая заданную уравнением (9) величину упругого сжатия в точке контакта рабочего и опорного валков, имеющей координату z ;

b_z – полуширина площадки контакта рабочего и опорного валков;

R_p, R_{on} – соответственно радиус рабочего и опорного валков.

Уравнение (10) решается любым из известных численных методов относительно величины q_{MZ}^* , например, методом половинного деления [7]. Найденная таким образом межвалковая погонная нагрузка должна обеспечить в данной точке контакта рабочего и опорного валков равенство величин δ_z и ΔR_z . Установив площадь полученной на основе решения уравнения (10) эпюры межвалковой погонной нагрузки, рассчитывается среднее интегральное значение межвалковой погонной нагрузки, при котором достигается контакт рабочего и опорного валков по всей длине L_e . После этого для заданных условий холодной тонколистовой прокатки в соответствии с рекомендациями авторов работы [8] определяется межвалковая погонная нагрузка с учетом профилировки и противоизгиба рабочего валка:

$$q_{Mznp} = q_{Mzцвл} + q_{Mz}^* - \frac{2 \int_0^{L_e/2} q_{Mz}^* dz}{L_e}. \quad (12)$$

В результате численной реализации разработанной математической модели получили расчетные распределения (рис. 2-4) межвалковой погонной нагрузки по длине контакта рабочего и опорного валков одной из рабочих клеток непрерывного 4^х-клетевого стана холодной тонколистовой прокатки ПАО «ММК им. Ильича», техническая характеристика которого приведена в работе [9]. Исходные для математического моделирования данные следующие: $L_e=1700$ мм; $D_p=500$ мм; $D_{on}=1300$ мм; $A_{on}=2720$ мм; $c_{on}=510$ мм; $c_p=280$ мм; $E_{e,p}=E_{e,on}=210000$ МПа; $\omega_{e,p}=\omega_{e,on}=0,3$; $P=15$ МН; $B=1250$ мм. В качестве варьируемых факторов использовали силу противоизгиба и величину выпуклости образующей бочки рабочих валков.

Анализ полученных в ходе математического моделирования результатов показывает, что выпуклость образующей бочки рабочего валка приводит к перераспределению межвалковой погонной нагрузки по длине контакта рабочего и опорного валков, которая при $z=0$ уменьшается, а при $z=0,5L_e$, наоборот, увеличивается (рис. 2 и 4). При этом, если максимум межвалковой погонной нагрузки наблюдается при $z=0$ (кривая 3 на рис. 3), то увеличение выпуклости образующей бочки рабочего валка приводит к уменьшению неравномерности распределения межвалковой погонной нагрузки по длине контакта рабочего и опорного валков, т.е. разность q_k-q_c снижается. В случае, когда максимум межвалковой погонной нагрузки наблюдается при $z=0,5L_e$ (рис. 2 и 4), увеличение выпуклости образующей бочки рабочего валка, наоборот, приводит к увеличению неравномерности распределения межвалковой погонной нагрузки по длине контакта рабочего и опорного валков, т.е. разность q_c-q_k возрастает. При увеличении силы противоизгиба рабочих валков вне зависимости от их профилировки межвалковая погонная нагрузка посередине контакта рабочих и опорных валков снижается (рис. 3), а при $z=0$, т.е. на краю бочки валков, наоборот, увеличивается. Таким образом, полученные в ходе математического моделирования результаты соответствуют экспериментальным данным авторов [4-6], что подтверждает возможность применения разработанной математической модели.

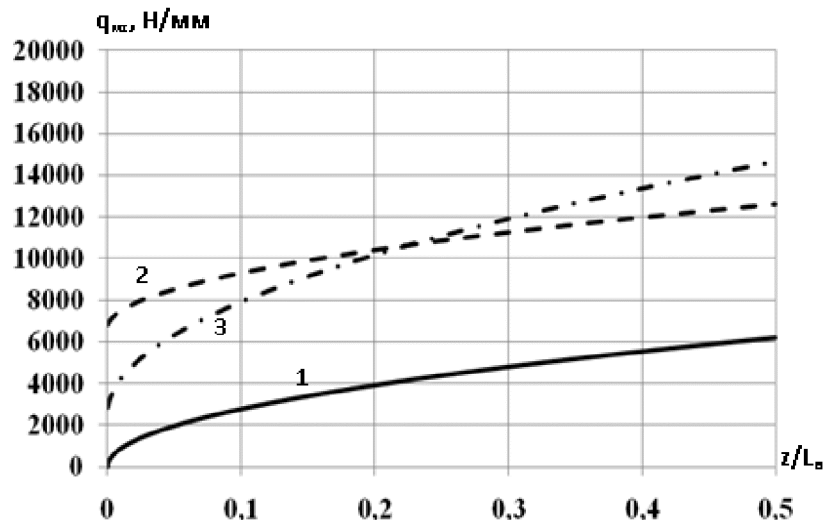


Рис. 2 – Расчетные распределения межвалковой погонной нагрузки по длине контакта рабочего и опорного валков при выпуклости рабочего валка $\Delta R=0,2$ мм:

1 – q_{Mz}^* ; 2 – $q_{Mzцвл}$; 3 – q_{Mznp}

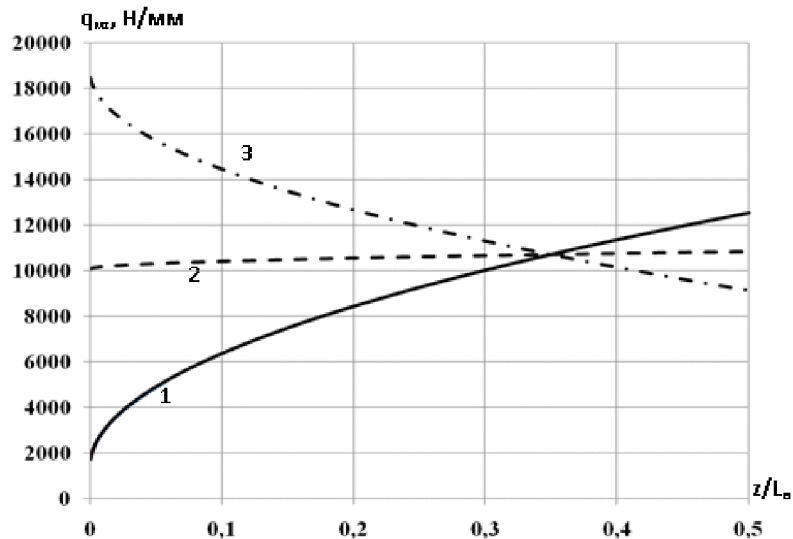


Рис. 3 – Расчетные распределения межвалковой погонной нагрузки по длине контакта рабочего и порного валков в зависимости от силы противоизгиба рабочих валков при $\Delta R=0,2$ мм: 1 – $Q_{np}=0$; 2 – $Q_{np}=0,1P$; 3 – $Q_{np}=0,2P$

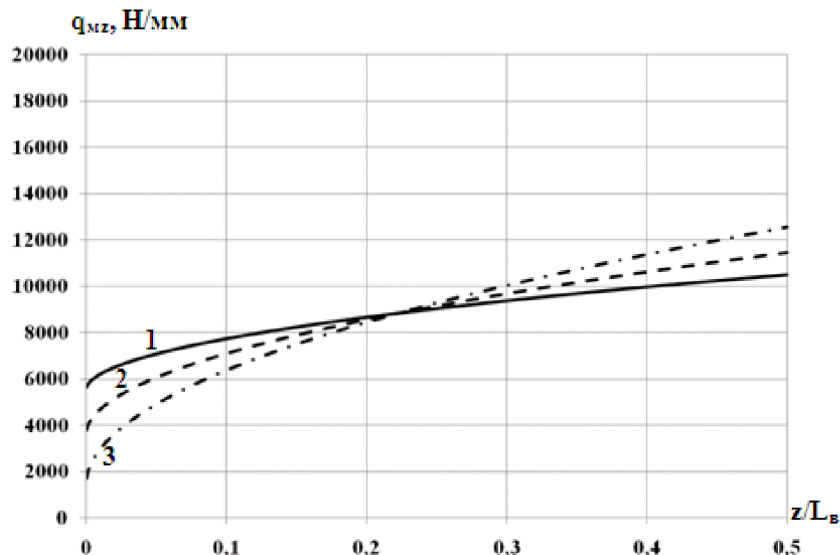


Рис. 4 – Расчетные распределения межвалковой погонной нагрузки по длине контакта рабочего и опорного валков в зависимости от профилировки рабочих валков при $Q_{np}=0$: 1 – $\Delta R=0$; 2 – $\Delta R=0,1$ мм; 3 – $\Delta R=0,2$ мм

Выводы: Разработана математическая модель для расчета межвалковой погонной нагрузки в клетях «кварто» станов холодной тонколистовой прокатки, учитывающая влияние профилировки и противоизгиба рабочих валков. Численная реализация указанной математической модели применительно к одной из рабочих клеток непрерывного 4^х-клетевого стана 1700 ПАО «ММК им. Ильча» подтвердила адекватность полученных результатов.

Список литературы: 1. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 669 с. 2. Управление качеством тонколистового проката / В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, И.Ю. Приходько, А.И. Яценко. – К. : Техника, 1997. – 384 с. 3. Гарбер Э.А. Производство проката : Справочное издание. Том I. Книга 1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование) / Э.А. Гарбер. – М. : Теплотехник, 2007. – 368 с. 4. Николаев В.А., Путнюки А.Ю. Прокатка широкополосной стали / В.А. Николаев, А.Ю. Путнюки. – К. : «Освіта України», 2009. – 268 с. 5. Ма-

шины и агрегаты металлургических заводов : Учебник для вузов. В 3-х томах. Том 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребенник [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1988. – 600 с. 6. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов / В.П. Полухин. – М. : Металлургия, 1972. – 512 с. 7. Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. Численные методы / В.Ф. Формалев, Д.Л. Ревизников. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 400 с. 8. Ашихмин Г.В. Расчет межвалковых давлений в валковых узлах 20-валковых станов с учетом профилировок валков / Г.В. Ашихмин, А.Д. Русаков, А.Н. Самарин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1993. – №9-10. – С. 24-27. 9. Прокатные станы. Справочник в 3-х томах. Т. 3. Листопрокатные станы и профилирующие агрегаты / В.Г. Антипин, Д.К. Нестеров, В.Г. Кизиев [и др.] – М. : Металлургия, 1992. – 428 с.

Надійшла до редколегії 25.10.2012

УДК 621.771.073 : 621.771.237

Расчетное определение межвалковой погонной загрузки в клетях «кварто» станов холодной прокатки с учетом влияния профилировки и противовигиба рабочих валков / Присяжный А. Г. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). – С. 153-159. – Бібліогр.: 9 назв.

У статті представлена математична модель, призначена для розрахунку міжвалкового погонного навантаження в клітках «кварто» станів холодної прокатки тонких штаб з урахуванням профілювання та противовигину робочих валків. Отримані в результаті числової реалізації представленої математичної моделі розрахункові розподіли міжвалкового погонного навантаження по довжині контакту опорних і робочих валків відповідають наявним в літературі експериментальним даним.

Ключові слова: валки, міжвалкове погонне навантаження, профілювання, противовигин, пружне стиснення.

A mathematical model, which is intended for the calculation of force between the supporting and working rollers of the cold rolling of thin bars, is presented in the article. A mathematical model takes into account influence of profiling and hydraulic bend of working roller. As a result of numeral realization of mathematical model were got distributing of force between the supporting and working rollers. Results, which are got, correspond results, which are present in literature.

Keywords: rollers, force between rollers, profiling, hydraulic bend, resilient compression.

УДК 669.1, 519.2

А. С. РУДЮК, канд. техн. наук, зам. ген. директора, ГП «УкрНТЦ «Енергосталь», Харків

Я. М. ПЫХТИН, зав. отд. стандартизации, ГП «УкрНТЦ «Енергосталь», Харків

В. Н. ЛЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., НТУ «ХПІ», ГП «УкрНТЦ «Енергосталь», Харків

Т. А. ЦАРЕВА, инженер, ГП «УкрНТЦ «Енергосталь», Харків

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОРТОВОГО И ФАСОННОГО ПРОКАТА

В статье рассмотрены вопросы создания программного продукта, позволяющего автоматизировать расчеты статистических показателей механических свойств сортового и фасонного проката. Разработанное программное обеспечение может использоваться металлургическими предприятиями стран СНГ для оценки соответствия выпускаемой продукции требованиям действующих стандартов.

Ключевые слова: прокат, стандарт, механические свойства, контроль качества, статистическая обработка, программное обеспечение.

Сортовой и фасонный прокат широко применяется в строительстве для изготовления строительных стальных конструкций со сварными и другими соединениями (уголки, двутавры, швеллеры) и армирования железобетонных конструкций (арматурная сталь).