

1 – L6=3100 B=1500 P=4000; 2 – L6=3100 B=2900 P=5000, 3 – L6=3400 B=1500 P=4000, 4 – L6=3400 B=2900 P=5000, 5 – L6=3400 B=3200 P=5000.

**Выводы.** Методом математического моделирования определена возможность применения рабочих валков на стане 3000 с увеличенной длиной бочки при сохранении существующей длины бочки опорных валков.

Установлена оценка межконтактных условий работы прокатных валков системы кварто с учетом изменяемых размеров валков.

**Список литературы:** 1. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. М.: Metallurgizdat, 1958. – 432 с. 2. Грудев П.И. Обработка металлов давлением. М.: Metallurgizdat, 1953, вып. 2. с. 200-223. 3. Полухин П.И., Железнов Ю.Д., Полухин В.П. Тонколистовая прокатка и служба валков. М.: Metallurgiya, 1967. – 388 с. 4. Будаева А.А., Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н. и др. Профилирование валков листовых станов. – Киев: Техніка, 1986. – 190 с. 5. Полецков П.П. Повышение эффективности формоизменения при холодной листовой прокатке с применением валковой системы переменной по длине бочки жесткости. Автореф. диссерт. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук, Магнитогорск, 2001. – 23 с.

Надійшла до редколегії 25.10.2012

УДК 621.771.07

**Межконтактные условия работы опорных и рабочих валков с различной длиной бочки на толстолистовом реверсивном стане / Коновалов Ю. В., Петренко А. С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). – С. 133-138. – Бібліогр.: 5 назв.**

Виконано оцінку можливості збільшення довжини бочки робочих валків діючих реверсивних товстолистових станів без зміни довжини бочки опорних валків і конструкції кліті. Здійснено математичне моделювання деформації валкового вузла системи робочий-опорний валок чотиривалкової кліті. Встановлено, що для умов стану 3000 ПАТ «ММК ім. Ілліча» установка робочих валків збільшеної довжини можлива, що дозволяє розширити сортамент стану.

**Ключові слова:** валок, межконтактні умови, довжина бочки валка, прогин, профілювання.

The evaluation of the possibility of increasing the length of the barrel of the work rolls acting reversible plate mills without changing the length of the barrel rolls and design stand. Performed mathematical modeling of deformation of roller assembly worker support four-high roll stand. Found that the conditions for the mill 3000 «Ilyich Iron and Steel» installation work rolls increased length possible, thus expanding the range of products of the mill.

**Keywords:** roll, intercontact terms, length of barrel of roller, bending, profiling.

УДК 621.771.01

**О. П. МАКСИМЕНКО**, докт. техн. наук, проф., ДГТУ, Днепродзержинск  
**Р. Я. РОМАНЮК**, ст. преподаватель, ДГТУ, Днепродзержинск

### **АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЗАХВАТА В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ С УЧЁТОМ ВНУТРЕННЕГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОСЫ**

В статье, на основе новой методики оценки устойчивости процесса деформации, теоретически проанализированы предельные условия в установившемся режиме при простом процессе прокатки и разных режимах трения. Теоретически исследовано влияние натяжения на устойчивость процесса и суммарный момент деформации. Предложены оптимальные величины натяжений при прокатке жести №20 на стане №1 комбината «Запорожсталь».

**Ключевые слова:** Контактные напряжения, сила, равновесие, устойчивый процесс, модель трения.

**Введение.** В статьях [1-3] разработана новая методика оценки продольной устойчивости процесса прокатки, которая заключается в определении безразмерного значения силы  $Q_{cp}^*$  или коэффициента устойчивости процесса деформации  $K_{уст}$ .

© О. П. Максименко, Р. Я. Романюк, 2012

Отличием данной методики от известного в теории прокатки условия захвата полосы валками в установившемся режиме [1-3] является учет не только контактных сил от напряжений  $p_x$  и  $t_x$ , но и сил, возникающих от пластической деформации металла под действием внутренних напряжений  $\sigma_x$ .

**Цель исследования.** Целью данной работы является теоретическое исследование условий захвата металла валками в установившемся режиме деформации при простом процессе прокатки и с учетом натяжения.

**Материалы исследования.** Теоретический анализ захватывающей способности валков проведен для условий тонколистовой прокатки, при параметрах формы полосы  $\frac{l_d}{h_{cp}} > 3$ , с использованием дифференциального уравнения Т. Кармана и допущений, которые приняты при его выводе [4].

Для проведения исследований по определению максимального угла захвата в установившемся режиме разработан алгоритм, блок-схема которого приведена на рисунке 1.

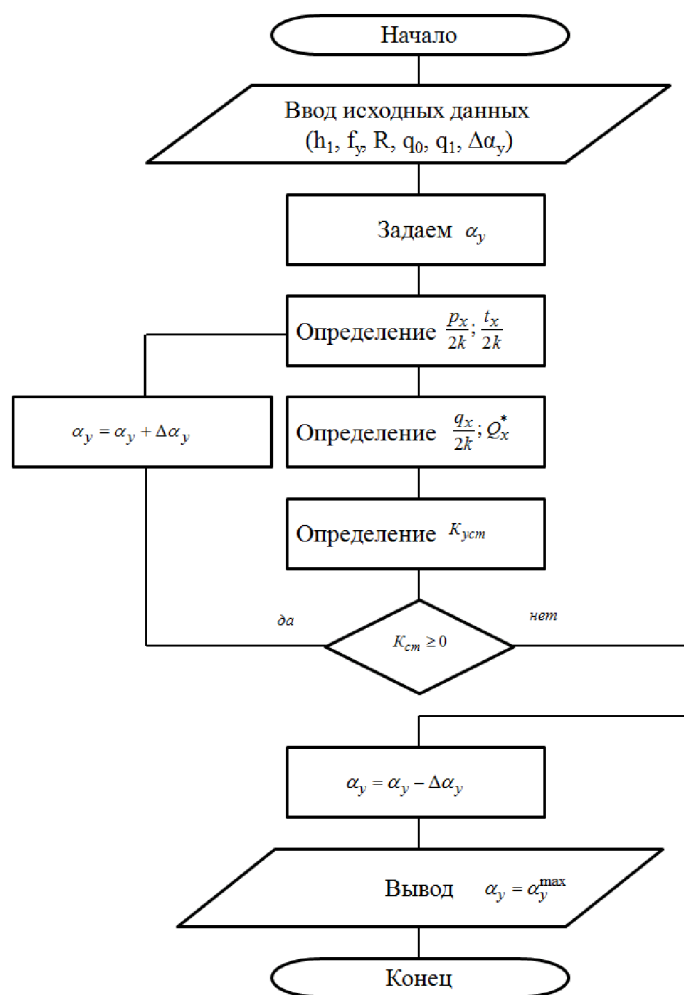


Рис. 1 – Блок-схема алгоритма определения максимального угла захвата в установившемся режиме

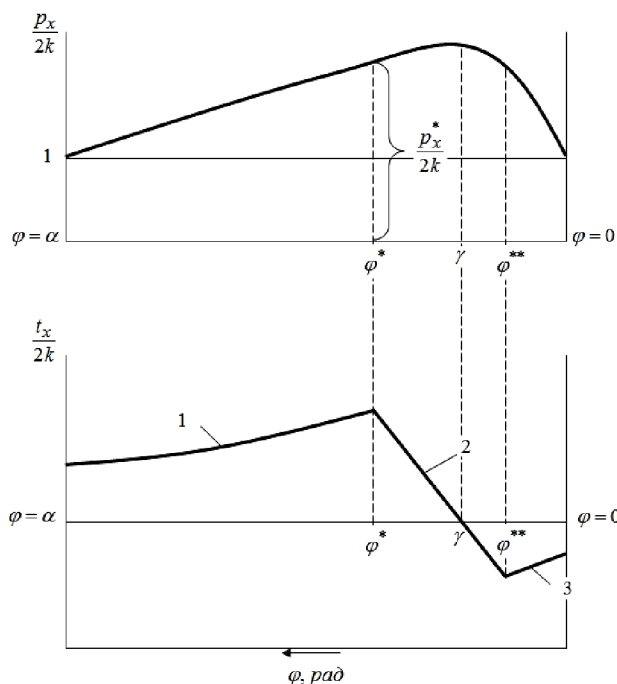


Рис. 2 – Модель трения с учетом зоны прилипания

Задавая исходные данные: конечную толщину полосы, коэффициент трения, радиус валков, переднее и заднее натяжения, а также начальный (для итерации) угол захвата и величину его изменения, строим теоретические эпюры распределения контактных напряжений. Решение уравнения Кармана с моделью трения, представленной на рисунке 2, осуществляли методом приближенного вычисления Рунге-Кутта с применением ЭВМ.

Как видно, данная модель состоит из трех участков, в начале очага деформации и его конце принимаем модель в виде  $\frac{t_x}{2k} = f_y \frac{P_x}{2k}$  (кривые 1 и 3), на другой части области контакта полосы с валками, ближе к нейтральному сечению, изменение напряжений трения описывается следующей подходящей функцией (кривая 2):

$$\frac{t_x}{2k} = f_y \frac{P_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}, \quad (1)$$

где  $\varphi^*$  – угол, который отвечает сечению перехода от модели  $\frac{t_x}{2k} = f_y \frac{P_x}{2k}$ , которая действует в зоне отставания, к кривой, описывающей зону прилипания (1);

$\frac{P_x^*}{2k}$  – безразмерное давление в сечении  $\varphi^*$ ;

$\gamma$  – угол нейтрального сечения;

$f_y$  – коэффициент трения в зонах скольжения.

В общем случае модель, которая учитывает прямопропорциональную связь между контактными напряжениями и зону прилипания, имеет следующий вид:

$$\frac{t_x}{2k} = \begin{cases} f_y \frac{P_x}{2k}, & \text{при } \alpha > \varphi > \varphi^*; \\ f_y \frac{P_x}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}, & \text{при } \varphi^* > \varphi > \varphi^{**}; \\ -f_y \frac{P_x}{2k}, & \text{при } \varphi^{**} > \varphi > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varphi^{**}$  – угол, который отвечает сечению перехода от модели  $\frac{t_x}{2k} = f_y \frac{P_x}{2k}$ , которая действует в зоне опережения, к кривой, описывающей зону прилипания (1).

Выражение (2) позволяет обеспечить плавный переход от положительных значений сил трения к отрицательным.

Сечения  $\varphi^*$  и  $\varphi^{**}$  выбираются итерационным путем с помощью ЭВМ при выполнении следующих условий:

- величина напряжений трения в безразмерной форме не должна превышать 0,5, т.е.:

$$-0,5 \leq \frac{t_x}{2k} \leq 0,5.$$

- средний коэффициент трения, определяемый по эпюрам контактных напряжений по формуле:

$$f_{cp} = \frac{\int_0^\alpha \frac{t_x}{2k} d\varphi}{\int_0^\alpha \frac{P_x}{2k} d\varphi} \quad (3)$$

должен быть равен расчетному коэффициенту трения  $f_y$  [4,5].

Используя полученные эпюры контактных напряжений  $\frac{P_x}{2k}$  и  $\frac{t_x}{2k}$ , рассчитываем текущие горизонтальные напряжение  $\frac{q_x}{2k}$  и силы  $Q_x^*$  [1-3] в каждом сечении очага деформации. Затем определяем безразмерный коэффициент устойчивости по формуле:

$$K_{уст} = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_x^* d\varphi. \quad (4)$$

Если этот коэффициент больше либо равен нулю, то увеличиваем принятый вначале угол захвата на  $\Delta\alpha_y$ , как только  $K_{уст}$  становится отрицательно величиной, то это означает, что процесс прокатки уже не устойчивый и предыдущее значение угла захвата является максимальным, его и выводим как результат расчета.

**Результаты исследования.** Сначала проанализируем граничные условия простого процесса прокатки (без натяжения).

На рисунке 3 приведены теоретические зависимости отношения максимального угла захвата в установившемся режиме к среднему коэффициенту трения по очагу деформации в зависимости от толщины полосы для диаметра валков 200 мм при сухом трении.

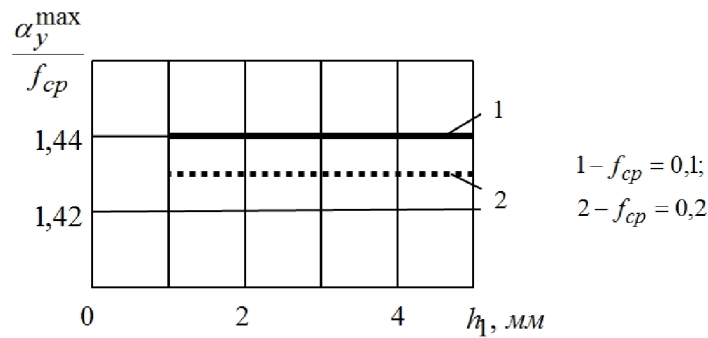


Рис. 3 – Теоретические зависимости отношения  $\frac{\alpha_y^{\max}}{f_{cp}}$  от толщины полосы при различных коэффициентах трения для диаметра валков 200 мм

Как видно из рисунка, отношение  $\frac{\alpha_y^{\max}}{f_{cp}}$  равно 1,43-1,44 и не зависит от толщины полосы и среднего коэффициента трения в очаге деформации. Кроме того, как показали дальнейшие исследования, это отношение не зависит и от диаметра валков. Подобные величины максимального угла захвата  $\alpha_y^{\max} = (1,43 - 1,44)f_{cp}$  объясняются тем, что в вышеприведенных исследованиях учитываются не только контактные силы, как это принято в теории прокатки, а и силы пластической деформации металла. Отметим, что подобные данные соответствуют экспериментальным данным А. П. Грудева, С. В. Макаева, В. И. Прокофьева [6] и др.

В режиме гидродинамического трения  $\alpha_y^{\max} = 2f_{cp}$ , что соответствует теории.

Следующая часть исследований посвящена прокатке с натяжениями.

Анализ проведем для непрерывного жестикатального стана №1 комбината “Запорожсталь” при производстве жести №20 из стали 08кп. Режим обжатий и кинематические параметры прокатки взяты из технологической инструкции.

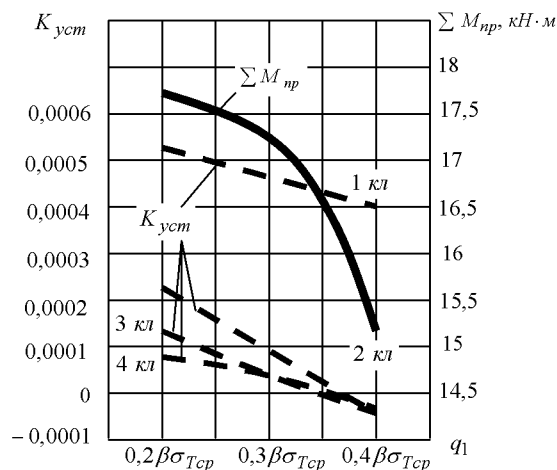


Рис. 4 – Графики изменения суммарного момента прокатки и коэффициента устойчивости в зависимости от удельного переднего натяжения полосы (удельного заднего натяжения последующей клетки)

Для теоретического расчета энергосиловых параметров используем методику, приведенную в работах [5]. При совместном решении уравнения Т. Кармана с моделью трения

(2), получаем эпюры распределения контактных напряжений при заданных параметрах прокатки, по которым оцениваем устойчивость процесса деформации.

Результаты расчетов приведены на рисунке 4 графиками изменения суммарного момента прокатки и коэффициента устойчивости в зависимости от удельного переднего натяжения полосы (удельного заднего натяжения последующей клетки).

Удельные натяжения на моталке и размотывателе остаются неизменными, соответственно 15 и 10 МПа. Начальный предел текучести (после отжига) раската принимаем  $\sigma_{T0} = 260$  МПа.

Как следует из данного рисунка, с увеличением натяжения полосы снижается суммарный момент прокатки, а, следовательно, и суммарная мощность прокатки. Однако, при этом, ухудшается устойчивость процесса деформации. При  $q_1 = 0,3\beta\sigma_{T_{cp}}$  ( $\beta$  – коэффициент Лоде,  $\sigma_{T_{cp}}$  – среднее напряжение текучести в очаге деформации) во всех клетях еще сохраняется устойчивый процесс прокатки ( $K_{уст} > 0$ ), а при  $q_1 = 0,4\beta\sigma_{T_{cp}}$  – во 2-4 клетях  $K_{уст} < 0$ , т.е., как показывают исследования, приведенные в работах [1-3], устойчивый процесс невозможен.

**Вывод.** Таким образом, теоретически анализируя устойчивость процесса прокатки на непрерывном стане №1 комбината “Запорожсталь”, отметим, что наиболее выгодными с точки зрения снижения энергозатрат являются режимы деформации при переднем натяжении, равном  $q_1 = 0,3\beta\sigma_{T_{cp}}$ , а в случае  $q_1 = 0,4\beta\sigma_{T_{cp}}$  ведение устойчивого процесса по всем клетям невозможно.

Как показывают практические данные работы прокатных станов, подобную величину натяжения ( $q_1 = 0,3\beta\sigma_{T_{cp}}$ ) можно применять при прокатке тонких и особо тонких листов лишь при условии высокой культуры производства [7,8].

**Список литературы:** 1. Максименко О. П. Исследование средней результирующей горизонтальных сил в очаге деформации / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2009. – №10. – С.22-24. 2. Максименко О. П. Уточнение условий продольной устойчивости процесса прокатки / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – №1. – С.41-43. 3. Максименко О. П. Методика оценки продольной устойчивости процесса прокатки / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. – Харьков: НТУ “ХПИ” – 2009. – №33. – С.84-90. 4. Грудев А. П. Теория прокатки: [учебник для вузов] / А. П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с. 5. Василев Я. Д. Теория поздновжньої прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с. 6. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков / А. П. Грудев. – М.: “СП Интернет Инжиниринг”, 1998. – 283 с. 7. Мазур В. Л. Управление качеством тонколистового проката / [В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько и др.]. – К.: Техника, 1997. – 384 с. 8. Приходько И. Ю. Система автоматического регулирования плоскостности полос с использованием бесконтактных методов измерения плоскостности и температуры / И. Ю. Приходько, С. А. Воробей, В. В. Разносиллин [и др.] // Сталь. – 2009. – №3. – С.41-45.

Поступила до редколегії 24.10.2012.

УДК 621.771.01

**Анализ предельных условий захвата в установившемся режиме с учетом внутреннего напряженного состояния полосы/ Максименко О. П., Романюк Р. Я. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). – С.138-144. – Бібліогр.: 7 назв.**

В статті, на основі нової методики оцінки сталості процесу деформації, теоретично проаналізовані граничні умови в сталому режимі при простому процесі прокатки та різних режимах тертя. Теоретично досліджено вплив натягу на сталість процесу і сумарний момент деформації.

Запропоновано оптимальні величини натягів при прокатці жерсті №20 на стані №1 комбінату "Запоріжсталь".

**Ключові слова:** контактні напруження, сила, рівновага, сталій процес, модель тертя.

In paper, on the basis of a new technique of an estimation of stability of process of a strain, boundary conditions in the established regime are theoretically analysed at simple process of rolling and different regimes of a friction. It is theoretically investigated agencies of a tension on stability of process and the total moment of a strain. Optimum magnitudes of tension are offered at rolling of a tin №20 on a mill №1 integrated works "Zaporozhstal".

**Keywords:** Contact voltages, force, equilibrium, resistant to process, a friction sample piece.

УДК 621.771

**А. В. НОГОВИЦЫН**, докт. техн. наук, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

**И. Р. БАРАНОВ**, ведущий инженер, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ РАСПЛАВА МЕТАЛЛА ПРИ ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКЕ-ПРОКАТКЕ

Предложена математическая модель течения расплава металла в межвалковом зазоре при валковой разливке. Жидкий металл рассматривали как линейную вязкую среду. Методом конечных разностей решали систему, состоящую из уравнения Лапласа для функции тока и уравнения Пуассона для напряженности вихря, преобразованную для бицилиндрических координат. Приведены результаты расчета скоростей течения.

**Ключевые слова:** валковая разливка металла, уравнения Лапласа и Пуассона, бицилиндрическая система координат, метод конечных разностей.

**Введение.** При валковой разливке жидкий металл увлекается в сильно сужающийся межвалковый зазор ("комиль-зону") вращающимися валками, что дает основание предполагать о наличии в нем достаточно сложного по характеру течения. В работе [1] дан критический анализ работ, посвященных теоретическому описанию параметров тепломассопереноса в расплаве между вращающимися валками-кристаллизаторами, и отмечена актуальность дальнейшего развития теоретических основ процесса валковой разливки.

**Применение бицилиндрической системе координат.** Для случая валковой разливки наиболее подходящей криволинейной системой координат является бицилиндрическая. Окружности валков-кристаллизаторов могут являться координатными линиями этой системы. Бицилиндрическая система координат применялась в работах [2-5] для исследования параметров вязкопластического течения в очаге деформации при плоской прокатке и показала ряд преимуществ перед декартовой системой координат.

Представим "комиль-зону" в бицилиндрических координатах  $\xi$  и  $\eta$  (рис. 1).

Связь декартовых координат  $X$  и  $Y$  с бицилиндрическими  $\xi$  и  $\eta$  выражается соотношениями:

$$X = \frac{a \cdot \sin \xi}{ch\eta - \cos \xi}, \quad Y = \frac{a \cdot sh\eta}{ch\eta - \cos \xi}, \quad (1)$$

где  $a$  – расстояние от начала декартовых координат по оси  $OX$  до полюса  $F$ .

Линии  $\xi = \text{const}$  являются окружностями, включающими хорду  $FF_1$ , а линии  $\eta = \text{const}$  – ортогональными окружностями, уравнения которых имеют вид:

$$(X - a \cdot cth\eta)^2 + Y^2 = \frac{a^2}{sh^2\eta}, \quad (2)$$