

tions of troostite and ferrite, increasing ductility.

Although the obtained results do not take full advantage of control of processing conditions, indicate a kind of guidelines for processing steel 4130, which allow mechanical properties typical of Q&T treatment, such as UTS exceeding 1100 MPa and tensile yield stress over 850 MPa in combination with elongation-to-fracture near 9%. The results can be found encouraging in the light of moderate hardenability of analysed steel and utilization of mere air for cooling schedules. As such, the results show big potential of controlling mechanical properties and microstructure of low alloy steels by means of direct cooling in controlled-processing conditions of thermomechanical schedules.

#### Acknowledgements

Financial assistance of the European Union by means of the European Fund of Regional Development within the Project: „Development of new, advanced forging technologies of high-melting materials” No.WND-POIG.01.03.01-12-004/09 in the Operation Program of Innovatory Economy.

#### Literature

1. Liu H., Liu W., Bao J., Xing Z., Song B., Lei C. Journal of Materials Engineering and Performance Vol. 20 (1) February 2011, 1-10.
2. Zhong J., Sun M., Liu D., Li X., Liu T. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials Vol.17, No.3, Jun 2010, 282-289.
3. Jahazi M. (1998) Metals and Materials Vol. 4, No. 4 (1998) 818-822.
4. ASM Handbook vol. 4, Heat Treating. ASM International Handbook Committee, Ohio 1996.
5. Skubisz P., Sinczak J., Skowronek T., Ruminski M. Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 12, 2012, 418-426.
6. Skubisz P., Sinczak J., Adrian H. Archives of Metallurgy and Metals, Materials, Vol. 56, 1, 2011, 93-107.
7. Skubisz P., Micek P., Sinczak J., Tumidajewicz M. Solid State Phenomena, Vol. 177, 2011, 76-83.

### **Взаимосвязь упругих деформаций четырехвалковой системы при формировании профиля и плоскостности прокатываемых полос**

д.т.н. проф. Бельский С.М., д.т.н. проф. Мухин Ю.А.  
Липецкий государственный технический университет  
8 (4742)32-81-37, prokatka@stu.lipetsk.ru

*Аннотация.* В статье рассмотрена математическая модель формоизменения полосы при тонколистовой прокатке в четырехвалковой клетки. Представлена методика количественной оценки эффекта самовыравнивания вытяжек по ширине полосы.

*Ключевые слова:* тонколистовая прокатка, четырехвалковая система, самовыравнивание вытяжек по ширине полосы, упругие деформации.

Известно, что четырехвалковая система при прокатке полос испытывает упругие деформации – прогиб рабочих и опорных валков, упругое сближение их осей, сплющивание поверхности рабочих валков в контакте с полосой.

Упругий прогиб осей рабочих валков  $\delta S_{np}$  и их упругое сплющивание в контакте с полосой  $\delta S_R$  являются определяющими для формирования величины выпуклости профиля поперечного сечения прокатываемой полосы  $\delta h_1$ . Кроме того, на величину выпуклости профиля поперечного сечения влияют станочная профилировка рабочих валков  $\delta S_{nf}$ , а в случае наличия устройств осевого перемещения рабочих валков и величина сдвижки  $A$ :

$$\delta h_1 = \delta S_{nf} + \delta S_{np} + \delta S_R + \delta S_A. \quad (1)$$

Станочная профилировка опорных валков влияет на величину выпуклости профиля по-

перечного сечения прокатываемой полосы опосредованно через распределение межвалкового давления так же, как и усилия изгиба валков (дополнительный и противоизгиб).

Величина прогиба осей рабочих валков главным образом зависит от их геометрических и физических параметров, усилия прокатки, ширины полосы и распределения межвалкового давления. Величина упругого сплющивания рабочих валков в контакте с полосой зависит, кроме всего прочего, от распределения погонной нагрузки по ширине прокатываемой полосы.

На формирование профиля поперечного сечения и плоскостности прокатываемой полосы при тонколистовой прокатке оказывает существенное влияние механизм самовыравнивания вытяжек по ширине полосы. Суть его заключается в следующем: неравномерное распределение обжатий по ширине полосы приводит к появлению дополнительных продольных напряжений. Эти напряжения приводят к изменению формы эпюр переднего и заднего натяжения, что вызывает перераспределение погонной нагрузки по ширине полосы. При этом изменяется величина упругого сплющивания поверхности рабочих валков в контакте с полосой, что в свою очередь способствует выравниванию обжатий, вытяжек и скоростей течения полосы в очаге пластической деформации. Можно сказать, что этот механизм самовыравнивания играет роль отрицательной обратной связи по неравномерности обжатий по ширине полосы.

Для анализа влияния всех факторов на формирование профиля поперечного сечения и плоскостности прокатываемой полосы разработана комплексная математическая модель формоизменения полосы при тонколистовой прокатке, в которую входят модели упругого прогиба валков четырехвалковой клетки с осевой сдвижкой рабочих валков [1], распределения погонного давления прокатки по ширине полосы [2] и сплющивания рабочих валков в контакте с полосой [3].

Математическая модель упругого прогиба валков четырехвалковой клетки:

$$y''(x) = -\frac{M(x)}{EJ} - \frac{k_1}{GS} q_{\Sigma}(x), \quad (2)$$

где  $y(x)$  - упругий прогиб валка;  $M(x)$  - изгибающий момент;  $E, G$  - модули упругости первого и второго рода материала валка;  $J, S$  - осевой момент инерции и площадь поперечного сечения валка;  $k_1$  - коэффициент формы поперечного сечения, равный  $10/9$ ;  $q_{\Sigma}(x)$  - суммарная распределенная нагрузка, действующая на валок (для опорного валка это межвалковое давление, для рабочего - сумма межвалкового давления и давления со стороны прокатываемой полосы),  $x$  - координата вдоль оси валка.

Математическая модель распределения погонного давления прокатки по ширине полосы заключается в системе дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\varphi''}{K^2} + \varphi = f, \\ p'(y) = \frac{4\mu\bar{v}_1 h_1}{h_{cp} \Delta h} (\varphi - f) \ln \left| \frac{2\sqrt{(1-t_n^2)^2 + a^2(\varphi - f)^2} - 2t_n^2 + 2 + a^2(\varphi - f)^2}{a^2(\varphi - f)} \right| + \\ + f'' \ell \left( \frac{h_1}{\Delta h} + \frac{2}{3} \right) - \varphi'' \ell \left( \frac{h_0}{\Delta h} + \frac{2}{3} \right), \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $f'(y) \ll 1$ ,  $\varphi'(y) \ll 1$  - неравномерность скоростей течения металла по ширине полосы на входе и выходе очага деформации;  $K^2 = \frac{16\mu\tau_s h_1}{h_{cp} \Delta h \ell E}$ ;  $\mu$  - коэффициент трения;  $\tau_s$  - предел

текучести материала полосы на сдвиг;  $\ell$  - длина очага деформации;  $h_{cp} = \frac{h_1 + h_0}{2}$ ;  $\bar{v}_1$  - средняя по ширине величина выходной скорости полосы, отнесенная к окружной скорости ра-

бочего вала;  $t_n = \frac{x_n}{\ell}$ ;  $x_n$  – положение нейтрального сечения;  $a = \frac{2v_1 h_1}{\ell \Delta h}$ ;  $y$  – координата по ширине полосы.

Граничные условия системы (3) записываются следующим образом:

$$\varphi(0) = \varphi(B) = 0; \quad p(B) = \frac{\frac{P}{2} + \int_0^B y p'(y) dy}{B}, \quad (4)$$

где  $P$  – усилие прокатки;  $B$  – полуширина полосы.

Вычислив величины сокращения радиусов рабочего вала в середине площадки контакта с полосой и под её краем, В.И. Пыженков [3] получил выражение для упругого сплющивания рабочего вала на выходе очага деформации:

$$\Delta R = 2p \frac{1-\nu^2}{\pi E} \left( \ln \frac{2R}{b} + \frac{0.026 - 0.153\nu}{1-\nu} \right) - 1.208 \frac{2p}{\pi} \cdot \frac{1-\nu^2}{E_a}, \quad (5)$$

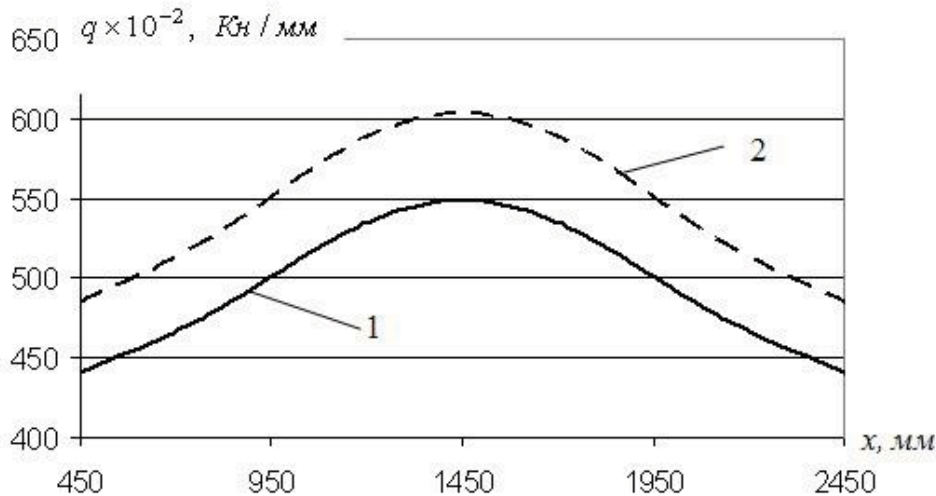
где  $\Delta R$  – величина упругого сплющивания рабочего вала;  $E_e$  – модуль упругости материала рабочего вала;  $p$  – погонное давление прокатки;  $R$  – радиус рабочего вала;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $b$  – полуширина площадки контакта вала с полосой.

Описанная модель (2)-(5) решается итерационно с привлечением численных методов Рунге-Кутты четвертого порядка и прогонки для решения дифференциальных уравнений. Усилие прокатки  $P$  можно вычислить любым известным методом.

Разработанную модель можно использовать для анализа различных аспектов формоизменения прокатываемых полос. Ниже приведен пример количественного анализа влияния упругого прогиба и сплющивания рабочих валков на профили поперечного сечения и плоскостность.

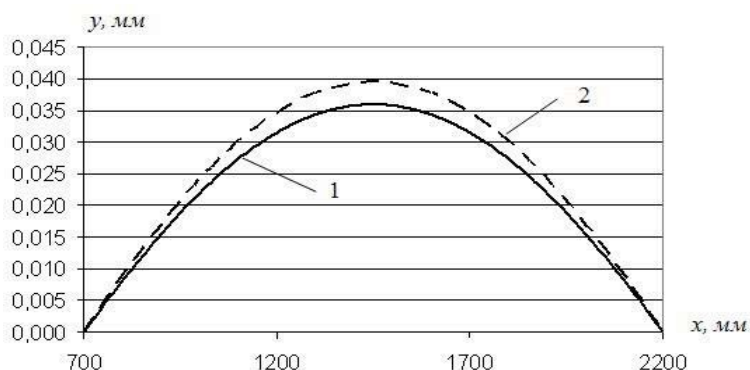
Допустим, в четырехвалковой клети стана горячей прокатки прокатывается полоса шириной 1500 мм с 6,0 мм на 4,0 мм с усилием прокатки 1000 тонн. Усилия изгиба и осевая сдвижка рабочих валков отсутствуют. В какой-то момент по разным причинам усилие прокатки возросло до 1100 тонн, что является обычным явлением в ходе прокатки. Диаметры и модули упругости материала опорных и рабочих валков равны соответственно:

$D_o = 1600$  мм;  $E_o = 2,2 \cdot 10^5$  МПа;  $D_p = 800$  мм;  $E_p = 1,8 \cdot 10^5$  МПа. Выпуклость опорных и рабочих валков нулевая, длина бочки валков равна 2000 мм. Диаграммы распределения межвалкового давления вдоль бочки валков и прогибов осей рабочих валков на ширине полосы представлены на рисунках 1-2.



**Рисунок 1. Распределение межвалкового давления**

- 1 – усилие прокатки  $P = 1000$  тонн;  
2 – усилие прокатки  $P = 1100$  тонн.**



**Рисунок 2. Прогиб рабочего вала на ширине полосы**  
**1 – усилие прокатки  $P = 1000$  тонн;**  
**2 – усилие прокатки  $P = 1100$  тонн.**

Условие отсутствия продольных напряжений, распределенных по ширине полосы на выходе очага деформации, записывается следующим образом:

$$\frac{\Delta\lambda(y)}{\lambda} = \frac{\delta h_0(y)}{h_0} - \frac{\delta h_1(y)}{h_1} = 0, \quad (6)$$

где  $\Delta\lambda(y)$  и  $\lambda$  – величина текущей неравномерности вытяжек, и величина средней вытяжки по ширине полосы,  $\delta h_0(y)$  и  $h_0$  – величина текущей поперечной разнотолщинности и величина средней толщины подката,  $\delta h_1(y)$  и  $h_1$  – величина текущей поперечной разнотолщинности и величина средней толщины полосы.

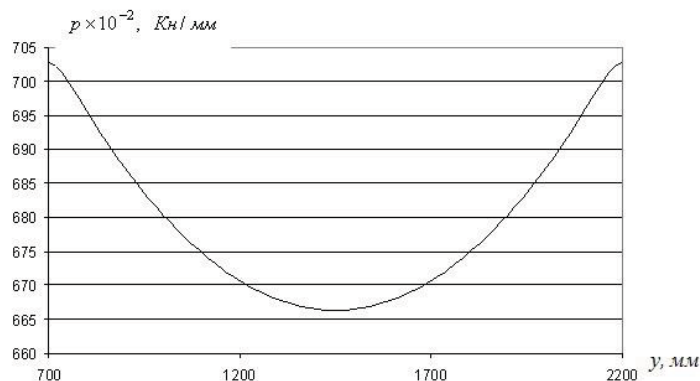
В нашем случае  $\delta h_1(y)$  определяется прогибом оси рабочего вала (т.к. его выпуклость нулевая), тогда для выполнения условия (6) необходимо, чтобы выполнялось равенство  $\delta h_0(y) = \frac{h_0}{h_1} \delta h_1(y)$ . Допустим, что выпуклость профиля поперечного сечения подката – величина постоянная.

После возрастания усилия прокатки до 1100 тонн прогиб рабочего вала увеличился и условие (6) перестало выполняться. В этом случае включается механизм самовыравнивания, и неравномерность вытяжек уменьшается из-за неравномерного распределения по ширине полосы упругого сплющивания рабочего вала в контакте с полосой.

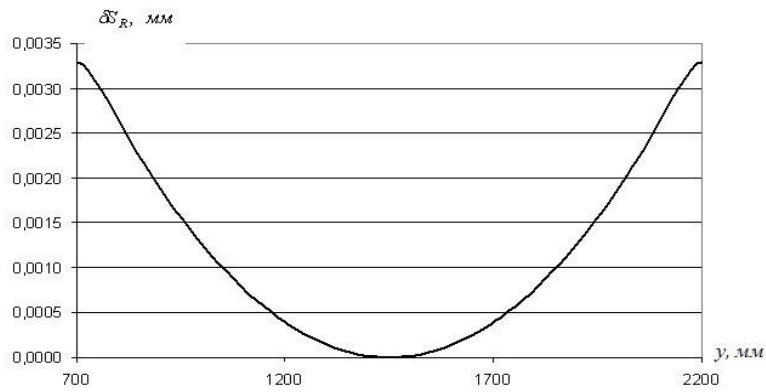
Оценим количественно, насколько упругое сплющивание рабочего вала компенсирует увеличение прогиба рабочего вала от возрастания усилия прокатки. Результаты расчета по описанной математической модели представлены на рисунке 4-10.

На рисунке 3 изображена эпюра погонного давления прокатки при  $P = 1100$  тонн, когда условие (6) не выполняется.

На рисунке 4 изображена диаграмма распределения неравномерности упругого сплющивания рабочего вала в контакте с полосой при  $P = 1100$  тонн.

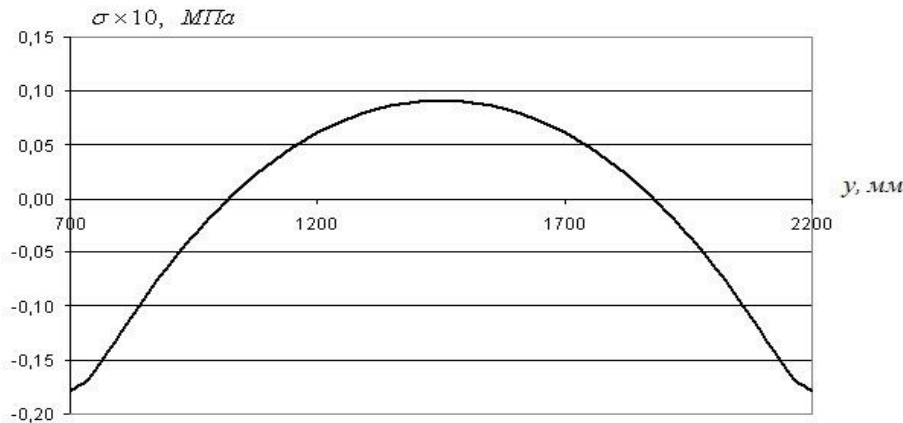


**Рисунок 3. Распределение погонного давления прокатки**  
**по ширине полосы при  $P = 1100$  тонн**



**Рисунок 4. Неравномерность упругого сплющивания рабочих валков по ширине полосы при  $P = 1100$  тонн**

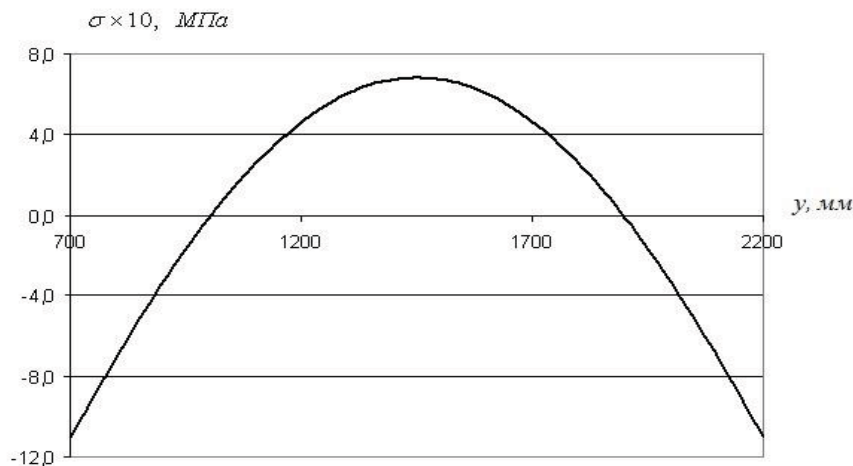
На рисунке 5 представлена эпюра распределения продольных напряжений по ширине полосы на выходе очага деформации с учетом упругого сплющивания рабочих валков, когда работает механизм самовыравнивания вытяжек по ширине прокатываемой полосы.



**Рисунок 5. Неравномерность продольных напряжений по ширине полосы с учетом упругого сплющивания рабочих валков**

На рисунке 6 изображена такая же эпюра без учета упругого сплющивания рабочих валков при выключенном механизме самовыравнивания.

Можно видеть, что соотношение упругих деформаций прогиба четырехвалковой системы и сплющивания рабочих валков в контакте с полосой таково, что неравномерность распределения продольных напряжений по ширине полосы на выходе очага деформации уменьшается почти на два порядка.



**Рисунок 6. Неравномерность продольных напряжений по ширине полосы без учета упругого сплющивания рабочих валков**



### **Выводы**

Разработана комплексная математическая модель формоизменения полосы в четырехвалковых системах, которая позволяет выполнять количественный анализ различных аспектов процесса тонколистовой прокатки, в том числе влияния соотношения упругих деформаций на профиль поперечного сечения и плоскостность прокатываемых полос, а также эффекта самовыравнивания вытяжек по ширине полосы.

### **Список литературы**

1. Бельский, С.М. Управление противоизгибом в клетях с осевой сдвижкой рабочих валков / С.М.Бельский, Б.А. Поляков, В.А. Третьяков // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1992. – № 6. – С.15-17.
2. Бельский, С.М. Расчёт распределения усилия прокатки по ширине полосы и остаточных напряжений в полосе вариационным методом / С.М.Бельский, С.Л. Коцарь, Б.А. Поляков // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1990. – № 10. – С.32-34.
3. Пыженков В.И. Развитие методов расчета упругих деформаций валков станов кварто. Диссертация ... канд. техн. наук. – Москва. МИСиС. – 1975. – 280 с.

### **Математическая модель расчета распределения толщины металла при штамповке в матрицах с многосекционными поворотными дисками**

к.т.н. доц. Коробко Т.Б., Козачишена Е.С.  
*Донбасский Государственный Технический Университет*  
+380-50-0269136  
*korobko.tamara@rambler.ru*

*Анотация.* В данной статье предложена математическая модель расчета распределения толщины изделия при вытяжке осесимметричных деталей в штампе с многосекционными поворотными дисками для коррекции технологических параметров процесса. Модель является ансамблем, включающим закономерности напряженно-деформируемого состояния, геометрические соотношения и алгоритм аппроксимации. Для решения сформулированной задачи был использован метод Эйлера, позволяющий определять параметры следующего шага интегрирования, основываясь на результатах предыдущего. Предложенный алгоритм позволяет оперативно вносить корректировки при появлении дополнительных условий и может быть рекомендован для расчета параметров технологического процесса.

*Ключевые слова:* математическая модель, штамп с поворотными дисками, вытяжка, параметры процесса, аппроксимация.

В настоящее время процессы глубокой вытяжки при получении осесимметричных изделий из листовых материалов осуществляются с применением цельнометаллических матриц. Формоизменение в них происходит путем превращения плоской заготовки в полое изделие, а допустимая степень деформации ограничивается коэффициентом вытяжки. Процесс сопровождается гофрообразованием фланца заготовки, но наличие в штампе прижима позволяет снизить его. Снижение коэффициента вытяжки ниже оптимальной величины приводит к тому, что процесс вытяжки не происходит, так как из-за большого трения между заготовкой и инструментом происходит разрыв.

Авторы работ [1, 2] рассматривали использование матриц с поворотными дисками (ПД), которые позволяют перераспределять деформации и повышают производительность процесса на 10 – 15 %. В предложенном нами штампе с поворотными дисками (рисунок 1) была произведена частичная замена трения скольжения заготовки о перетяжной радиус матрицы на трение качения. Конструкция штампа позволяет производить быструю замену средней части цельнометаллической матрицы на матрицу с ПД, а также производить замену поверхностей прижима и матрицы в зависимости от количества набираемого во фланец металла. Направление сил трения будет как и при обычной вытяжке, а на участках формируемых ПД