



**Сборник докладов
Международной научно-технической конференции
«Инновационные технологии обработки
металлов давлением»**

Москва
18-20 октября 2011

Сборник докладов международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением», посвященной 100-летию со дня рождения проф. д.т.н., академика АН КазССР, Героя Социалистического Труда П.И. Полухина. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 586 с. ISBN 978-5-87623-555-8

Представлены доклады преподавателей, научных сотрудников и аспирантов НИТУ «МИСиС», а также представителей научных школ по обработке металлов давлением России, Украины, Казахстана, Австрии, Германии, Польши, Италии, Канады и Израиля. Изложены материалы, характеризующие современное состояние техники и технологии обработки металлов давлением в России и за рубежом. Доклады публикуются в авторской редакции.

Сборник может быть рекомендован студентам и аспирантам вузов, специализирующихся по обработке металлов давлением, специалистам металлургических и машиностроительных предприятий.

УДК 621.771.23

Организационный комитет конференции:

председатель: президент НИТУ «МИСиС», проф. Карабасов Ю.С.

сопредседатели: проф. Зиновьев А.В., проф. Романцев Б.А.

члены: Ашихмин Г.В., Бринза В.В., Галкин А.М., Галкин С.П.,

Голубчик Р.М., Горбатюк С.М., Ионов С.М., Капуткина Л.М.,

Коликов А.П., Коротченко Н.А., Косырев К.Л., Прокошкин С.Д.,

Прудковский Б.А., Салихов С.В., Сигалов Ю.М., Смирнов О.М.,

Соколов П.Ю., Трусов В.А., Тюрин В.А., Харитонов Е.А., Шелест А.Е.

ISBN 978-5-87623-555-8

● НИТУ «МИСиС», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Приветственное слово ректора НИТУ «МИСиС» участникам международной научно-технической конференции «Инновационные Технологии Обработки Металлов Давлением»	7
Петр Иванович Полухин – выдающийся ученый и организатор отечественной высшей школы	7
Достижения научной школы П.И. Полухина	11
Future Development of the Department for Plastic Deformation of Special Alloys as the result of cooperation between NITU «MISIS» and TU Bergakademi Freiberg – Continuing Poluhin's Ideas	14
Технология горячей прокатки труб на мини ТПА	25
CSP® Concepts for Future Market Demands from CSP® to CSP® flex	34
Arvedi ESP® - Experience with Endless Rolling for thin Strip Production	42
Siemens VAI advanced cooling and lubrication systems – Latest developments	52
Современное состояние производства проката из цветных металлов	62
Modern lightweight construction with magnesium flat products	66
Conti M® – a pioneering technology for the manufacture of copper strip products	78
Экспериментальные исследования и численное моделирование процесса прокатки ребристых биметаллических прутков сталь – коррозионноустойчивая сталь	82
High-speed delivery system for cooling beds	89
Innovations in simulation of microstructure developments	95
Development of New Hot Rolled Materials and Technologies by means of Numerical Simulation Systems	100
Simulation of Sheet Forming for Automotive	104
The press shop operation with modern high-strength steels	115
Ускоренное охлаждение металла на отводящем рольганге широкополосного стана горячей прокатки	124
Структурно-фазовые превращения низколегированной трубной стали в процессе толстолистовой контролируемой прокатки	129
Химический состав прокатных валков и его влияние на их стойкость	134
Секция «Прокатное производство»	139
Hardening curves of micro-alloy steel for production of strength grade X80 plate	139
The effect of the speed asymmetry factor a_v on strip curvature during rolling of plates	149
Виды моделирования технологических процессов ОМД	156
Влияние различных температурно-деформационных режимов предварительной стадии контролируемой прокатки на аустенитную структуру микрелегированной трубной стали	164
Инновационные технологии производства тонких широких полос, разработанные на основе новых решений в теории прокатки	166
Использование ускоренного охлаждения при контролируемой прокатке стали 10Г2ФБЮ на толстолистовом стане 5000 с целью повышению механических и технологических свойств	170
Исследование влияния структуры металла на механические свойства и силу адгезии лакокрасочных покрытий горячекатаных и холоднокатаных полос	178
Исследование напряжений в условиях плоскодеформированного состояния с использованием вложенных гармонических функций	187
Исследование напряженно-деформированного состояния валков непрерывного стана с применением MSC.VISUALNASTRAN 4D	194
Исследование особенностей формирования структуры и свойств стали класса прочности X80 в чистовой стадии контролируемой прокатки	203

Таблица 4 – Результаты испытаний холоднокатаных полос

Показатели	Скорость подачи груза					
	1 гр./с	2 гр./с	3 гр./с	4 гр./с	5 гр./с	6 гр./с
Растяжение металлического диска до отрыва от покрытия по направлению перпендикулярной к плоскости покрытия						
Время испытания	572	292	188	101	62	38
R, Н/мм ²	225,6	242,92	263,72	281,80	303,29	361,72
Растяжение металлического диска до отрыва от покрытия по направлению наклонной 15 град к плоскости покрытия						
Время испытания	566	293	168	90	56	42
R, Н/мм ²	213,1	222,81	226,96	250,83	273,37	351,68

Проанализировав результаты исследования, сделали следующие выводы,
 - уменьшение скорости подачи до 1 грамм/с приводит к увеличению времени испытания (см. таблицу 3 и 4), при этом вибрационная нагрузка не создается;
 - увеличение скорости подачи груза до 6 грамм/с приводит к завышению средней величины силы адгезии, приводящей к отрыву лакокрасочной покрытий (см. таблицу 3 и 4);
 - наиболее одинаковые и достоверные данные по силе адгезии получаются при испытании со скоростью подачи груза равной 2 – 5 грамм/с (см. таблицу 3 и 4). При этом образец с покрытием испытывает вибрационную нагрузку, соответствующую периоду эксплуатации изделия;
 - средняя величина силы адгезии у холоднокатаной полосы немного больше чем у горячекатаной полосы;
 - проведенное исследование подтверждает возможность получения горячекатаных тонких полос по качеству не уступающим холоднокатаным тонким полосам.

Библиографический список

1. Bartet R. Тонкий горячекатаный полосовой прокат на рынке холоднокатаной стали // Metal Bulletin Monthly. 1999. V:4. P. 25-29.
2. Заключение о выдаче инновационного патента по заявке №2010/1046.1 от 17.01.2011 г / Непрерывный стан для прокатки тонких полос из стали и сплавов // С.А. Машеков, Ш.А. Бекмуханбетова, А.Е. Нуртазев и др.
3. Лактин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. Учебник для вузов. 3-е изд. – М.: Металлургия, 1983. 360 с.
4. Заключение о выдаче инновационного патента по заявке №2010/1082.1 от 30.12.2010 г / Способ определение силы адгезии лакокрасочных покрытий // С.А. Машеков, Ш.А. Бекмуханбетова, Е.В. Чумаков и др.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЛОЖЕННЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

В.В. Чигиринский, А.Н. Бень

Введение. Основное количество известных решений в механике деформированного тела не позволяют рассматривать комплексное решение, связанного с определением одновременно как напряженного, так и деформированного состояния металла. Рассматриваются решения только для определения напряженного или деформированного состояния и при этом поля напряжений и деформаций чаще всего не связаны друг с другом. Это не по-

зволяет получать аналитическим путем математическую модель пластической среды. Возникают проблемы, которые не позволяют получить однозначную связь полей напряжений и деформаций.

В этом плане ценным является то, что предложенные решения расширяют возможность удовлетворения граничных и очевидных условий, как по напряжениям, так и по деформациям в очаге деформации.

Постановка задачи. В систему (1) включены уравнения теории течения: уравнения равновесия, условия пластичности, уравнения связи скоростей деформаций и напряжений, уравнения несжимаемости для скоростей деформаций, уравнения неразрывности скоростей деформаций:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0; \\ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2 = 4 \cdot k^2; \\ \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2 \cdot \tau_{xy}} = \frac{\xi_x - \xi_y}{\gamma_{xy}} = F_1; \\ \xi_x + \xi_y = 0; \\ \frac{\partial^2 \xi_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_x, σ_y - нормальные напряжения; τ_{xy} - касательное напряжение; k - сопротивление пластической деформации на сдвиг (переменная величина); $\xi_x, \xi_y, \gamma_{xy}$ - скорости деформаций.

Граничные условия заданы в напряжениях [1]

$$\begin{aligned} \tau_n = -k \cdot \sin(A\Phi - 2\alpha) \\ \text{или } \tau_n = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sin 2 \cdot \alpha - \tau_{xy} \cdot \cos 2 \cdot \alpha \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Дополнительные условия заданы контактными удельными силами трения (2), изменяющимися по синусоидальному закону.

Решение задачи. Граничное условие (2) будет тождественно удовлетворено, если принять

$$\tau_{xy} = k \cdot \sin A\Phi \quad (3)$$

Рассматривается сложная зависимость от координат, при этом $k = H_\sigma \cdot \exp \theta$, где H_σ - переменный коэффициент, принимаемый в дальнейшем равным постоянной величине C_σ . Выражение (3) задает граничные условия (2), которые замыкают систему уравнений (1).

Ранее в работах [2...4] были предложены решения с использованием метода гармонических функций для определения поля напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_x = C_\sigma \cdot \exp \theta \cdot \cos A\Phi + \sigma_0 + f(y) + C; \\ \sigma_y = -C_\sigma \cdot \exp \theta \cdot \cos A\Phi + \sigma_0 + f(x) + C \\ \tau_{xy} = C_\sigma \cdot \exp \theta \cdot \sin A\Phi \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{при условии } \theta_x = -A\Phi_y, \theta_y = A\Phi_x \quad (5)$$

Из последних соотношений Коши-Римана (5) следует, что вводимые в рассмотрение координатные функции $A\Phi$ и θ являются гармоническими, т.е. удовлетворяют уравнениям Лапласа.

$$\begin{aligned} \theta_{xx} + \theta_{yy} &= 0 \\ A\Phi_{xx} + A\Phi_{yy} &= 0 \end{aligned}$$

Представляет интерес использование гармонических функций в решении. В работах [2...4] использовались следующие координатные гармонические функции:

$$\begin{aligned} A\Phi &= AA_6 \cdot x \cdot y \\ \theta &= -0,5 \cdot AA_6 \cdot (x^2 - y^2) \\ A\Phi &= AA_6 \cdot x \cdot y - AA_{13} \cdot x \cdot y \cdot (x^2 - y^2) \\ \theta &= -0,5 \cdot AA_6 \cdot (x^2 - y^2) + AA_{13} \cdot [0,25 \cdot (x^4 + y^4) - 1,5 \cdot x^2 \cdot y^2] \\ A\Phi &= AA_6 \cdot x \cdot y + AA_{13} \cdot x \cdot y \cdot (x^2 - y^2) \\ \theta &= -0,5 \cdot AA_6 \cdot (x^2 - y^2) - AA_{13} \cdot [0,25 \cdot (x^4 + y^4) - 1,5 \cdot x^2 \cdot y^2] \end{aligned} \quad (6)$$

Представленные функции (6) являются гармоническими, удовлетворяющие уравнению Лапласа и соотношениям Коши-Римана. Вторая и третья группа функций представляют собой сумму гармонических координатных функций разного порядка.

Следует отметить, что произведения

$$\begin{aligned} \exp\theta \cdot \cos A\Phi \\ \exp\theta \cdot \sin A\Phi \end{aligned} \quad (7)$$

также являются гармоническими функциями. Следовательно, в конструкцию функций $A\Phi$ и θ можно вложить новые построения типа (7) при условии, что аргументы функций будут гармоническими.

Рассмотрим аргумент тригонометрической функции в виде вложенной функции:

$$A\Phi = [C_1 \cdot \exp\theta' + C_2 \cdot \exp(-\theta')] \cdot \sin A\Phi' \quad (8)$$

где $A\Phi'$ и θ' - вложенные координатные гармонические функции вида (6).

В случае (8) расширяется диапазон применения аналитических решений при удовлетворении граничных и очевидных условий в очаге деформации. Подставляя (8) в уравнение Лапласа получаем тождество:

$$\begin{aligned} A\Phi_{xx} + A\Phi_{yy} = \sin A\Phi' \cdot \left\{ C_1 \cdot \exp\theta' \cdot \left[(\theta')_{xx}^2 + (\theta')_{yy}^2 - (A\Phi')_{xx}^2 + (\theta')_{yy}^2 + (\theta')_{yy}^2 - (A\Phi')_{yy}^2 \right] - \right. \\ \left. - C_2 \cdot \exp(-\theta') \cdot \left[(\theta')_{xx}^2 - (\theta')_{xx}^2 + (A\Phi')_{xx}^2 + (\theta')_{yy}^2 - (\theta')_{yy}^2 + (A\Phi')_{yy}^2 \right] \right\} + \\ + \cos A\Phi' \cdot \left\{ C_1 \cdot \exp\theta' \cdot \left[2 \cdot (\theta')_x \cdot (A\Phi')_x + (A\Phi')_{xx} + 2 \cdot (\theta')_y \cdot (A\Phi')_y + (A\Phi')_{yy} \right] - \right. \\ \left. - C_2 \cdot \exp(-\theta') \cdot \left[2 \cdot (\theta')_x \cdot (A\Phi')_x - (A\Phi')_{xx} + 2 \cdot (\theta')_y \cdot (A\Phi')_y - (A\Phi')_{yy} \right] \right\} = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

Уравнение (9) тождественно равно нулю, если выражения, стоящие в квадратных скобках равны нулю и если вложенные гармонические функции соответствуют условию Коши-Римана:

$$\begin{aligned} \theta'_x &= -A\Phi'_y \\ \theta'_y &= A\Phi'_x \end{aligned}$$

Через соотношения Коши-Римана определяем значение функции θ' :

$$\theta' = [C_1 \cdot \exp\theta' - C_2 \cdot \exp(-\theta')] \cdot \cos A\Phi' \quad (10)$$

Анализ полученных результатов. С использованием вложенных гармонических функций на примере осадки покажем, что существует область устойчивых решений для компонентов тензора напряжений как на контактной поверхности, так и во всем объеме.

Интегрируя уравнения равновесия (1) с учетом гармонических функций (8), (10), получим выражения для определения компонентов напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= C_\sigma \cdot \exp\left\{ [C_1 \cdot \exp\theta' - C_2 \cdot \exp(-\theta')] \cdot \cos A\Phi' \right\} \cdot \cos\left\{ [C_1 \cdot \exp\theta' + C_2 \cdot \exp(-\theta')] \cdot \sin A\Phi' \right\} + \sigma_0 + C; \\ \sigma_y &= -C_\sigma \cdot \exp\left\{ [C_1 \cdot \exp\theta' - C_2 \cdot \exp(-\theta')] \cdot \cos A\Phi' \right\} \cdot \cos\left\{ [C_1 \cdot \exp\theta' + C_2 \cdot \exp(-\theta')] \cdot \sin A\Phi' \right\} + \sigma_0 + C; \\ \tau_{xy} &= C_\sigma \cdot \exp\left\{ [C_1 \cdot \exp\theta' - C_2 \cdot \exp(-\theta')] \cdot \cos A\Phi' \right\} \cdot \sin\left\{ [C_1 \cdot \exp\theta' + C_2 \cdot \exp(-\theta')] \cdot \sin A\Phi' \right\} \end{aligned}$$

Последние выражения могут быть упрощены, приняв $C_2 = 0$:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= C_\sigma \cdot \exp(C \cdot \exp\theta' \cdot \cos A\Phi') \cdot \cos(C_1 \cdot \exp\theta' \cdot \sin A\Phi') + \sigma_0 + C; \\ \sigma_y &= -C_\sigma \cdot \exp(C \cdot \exp\theta' \cdot \cos A\Phi') \cdot \cos(C_1 \cdot \exp\theta' \cdot \sin A\Phi') + \sigma_0 + C; \\ \tau_{xy} &= C_\sigma \cdot \exp(C \cdot \exp\theta' \cdot \cos A\Phi') \cdot \sin(C_1 \cdot \exp\theta' \cdot \sin A\Phi') \end{aligned} \quad (11)$$

При этом вложенные гармонические функции $A\Phi'$ и θ' имеют вид:

$$\begin{aligned} A\Phi' &= AA_6 \cdot x \cdot y \\ \theta' &= -0,5 \cdot AA_6 \cdot (x^2 - y^2) \end{aligned}$$

где AA_6 - постоянная величина.

Постоянные интегрирования и функции определились из граничных очевидных условий:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{A\Phi_0}{\exp\theta_0 \cdot \cos A\Phi_0} \\ A\Phi_0 &= AA_6 \cdot \frac{L \cdot H}{4} \\ \theta_0 &= -0,5 \cdot AA_6 \cdot \left(\frac{L^2}{4} - \frac{H^2}{4} \right) \end{aligned}$$

Подставляя граничные условия для осадки, выраженные через напряжения, получим:

$$AA_6 = \frac{4}{L \cdot H} \cdot \arctg(A\Phi_0)$$

где L, H - длина и высота очага деформации; f - коэффициент трения.

Из условия пластичности $\sigma_0 = -2 \cdot k \cdot \cos A\Phi$, $C = k_0$. Подставляя в (11) компоненты тензора напряжений, имеем

$$\sigma_x = -C_a \cdot \exp(C \cdot \exp \theta'_0 \cdot \cos A \Phi'_0) \cdot \frac{\exp[C \cdot (\exp \theta' \cdot \cos A \Phi' - \exp \theta'_0 \cdot \cos A \Phi'_0)]}{\cos(C \cdot \exp \theta'_0 \cdot \sin A \Phi'_0)} \cdot \cos(C \cdot \exp \theta' \cdot \sin A \Phi') + C_a \cdot \exp(C \cdot \exp \theta'_0 \cdot \cos A \Phi'_0)$$

$$\sigma_y = -3 \cdot C_a \cdot \exp(C \cdot \exp \theta'_0 \cdot \cos A \Phi'_0) \cdot \frac{\exp[C \cdot (\exp \theta' \cdot \cos A \Phi' - \exp \theta'_0 \cdot \cos A \Phi'_0)]}{\cos(C \cdot \exp \theta'_0 \cdot \sin A \Phi'_0)} \cdot \cos(C \cdot \exp \theta' \cdot \sin A \Phi') + C_a \cdot \exp(C \cdot \exp \theta'_0 \cdot \cos A \Phi'_0)$$

$$\tau_{xy} = C_a \cdot \exp(C \cdot \exp \theta'_0 \cdot \cos A \Phi'_0) \cdot \frac{\exp[C \cdot (\exp \theta' \cdot \cos A \Phi' - \exp \theta'_0 \cdot \cos A \Phi'_0)]}{\cos(C \cdot \exp \theta'_0 \cdot \sin A \Phi'_0)} \cdot \sin(C \cdot \exp \theta' \cdot \sin A \Phi')$$

(12)

Для определения значения $A \Phi'_0$ проведем сопоставление с решениями, представленными в работе [5]. В нашем случае имеем:

$$A \Phi'_0 = \arctg \psi$$

Анализ показывает, что ψ является параметром, который учитывает влияние контактного трения и в некоторой степени фактора формы. Определим значение ψ с учетом данных, представленных на графике в работе [5], рис. 1.

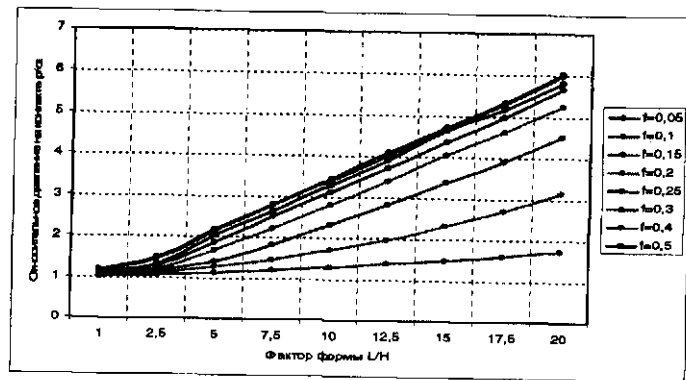


Рис. 1 – Относительное давление на контакте в зависимости от коэффициента трения и фактора формы по Сторожеву [5]

Имея математическую модель (12), в которую входит постоянная $A A_0$ в зависимости от $A \Phi'_0$, можно получить обратным пересчетом те значения ψ , которые соответствуют коэффициентам подпора, представленных на рис. 1.

В табл.1 представлены значения ψ решения (12) в соответствии с рис. 1.

Таблица 1 - Значения коэффициента ψ в зависимости от коэффициента трения и фактора формы

Фактор формы L/H	Коэффициент трения f							
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
1	0,1	0,167	0,227	0,259	0,285	0,298	0,331	0,37
2,5	0,14	0,194	0,24	0,284	0,312	0,343	0,374	0,39
5	0,147	0,209	0,25	0,307	0,339	0,363	0,377	0,383
7,5	0,15	0,212	0,261	0,301	0,323	0,332	0,341	0,343
10	0,147	0,21	0,258	0,283	0,296	0,302	0,307	0,31
12,5	0,148	0,203	0,245	0,264	0,274	0,277	0,278	0,28
15	0,142	0,198	0,232	0,246	0,253	0,254	0,257	0,258
17,5	0,141	0,193	0,219	0,229	0,234	0,235	0,238	0,238
20	0,137	0,186	0,208	0,216	0,219	0,22	0,221	0,223

По результатам пересчета были построены графики зависимости коэффициента ψ от коэффициента трения и фактора формы (рис. 2).

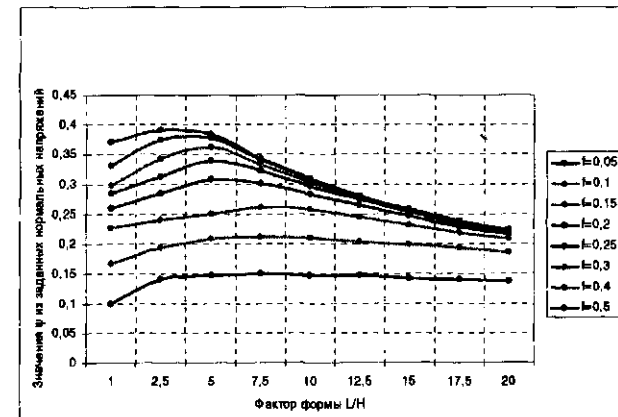
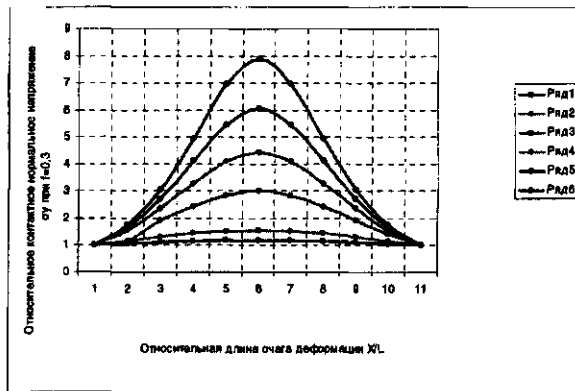
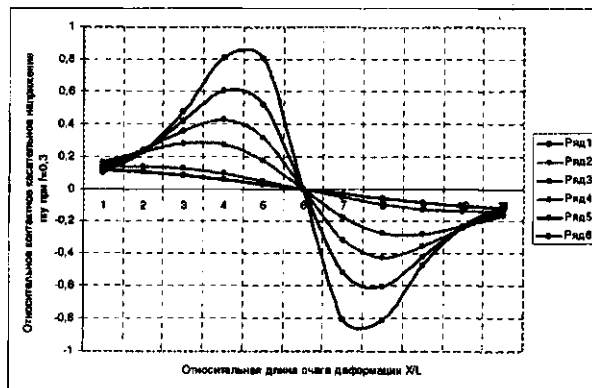


Рис. 2 – Зависимость коэффициента ψ от коэффициента трения и фактора формы

Данными расчетами фактически были определены граничные условия для определения постоянных величин, присутствующих в решении (12). Этим самым определена область допустимых значений, позволяющая рассчитать реальные значения коэффициентов подпора на контакте в условиях плоскодеформированного состояния. Результаты расчета по формулам (12) с учетом определенного коэффициента подпора ψ приведены на рис. 3. Анализ графических зависимостей показывает, что распределение контактных напряжений реагирует на фактор формы очага деформации и коэффициент трения. Полученные результаты качественно и количественно отражают общие закономерности распределения полей тензора напряжений по всему очагу деформации и в полной мере удовлетворяют граничным условиям. Результаты расчетов совпадают с реальными эпюрами контактных напряжений. Следует подчеркнуть, что полученные выражения едины для всего очага деформации и нет необходимости разбивать его на отдельные зоны контактного трения.



а



б

Рис.3. - Распределение нормальных (а) и касательных (б) напряжений по высоте полосы при осадке $f=0.3$, $L/H=1, \dots, 12.5$

Выводы:

1. Возможно построение гармонических функций вида $\exp\theta \cdot \cos A\Phi$ и $\exp\theta \cdot \sin A\Phi$ при условии, что их аргументы также являются гармоническими функциями.
2. Аргументы функций $A\Phi$ и θ могут использовать построения вида $\exp\theta \cdot \cos A\Phi$ и $\exp\theta \cdot \sin A\Phi$, т.к. они тождественно удовлетворяют уравнению Лапласа при условии $\theta_x = -A\Phi_y$, $\theta_y = A\Phi_x$.
3. Получены выражения для компонентов тензора напряжений с использованием вложенных гармонических функций.
4. Определена область допустимых значений для определения контактных напряжений с использованием общепринятых данных работы [5].
5. Расчет напряжений показывает, что они качественно и количественно соответствуют экспериментальным данным.

Библиографический список

1. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести [Текст] / Н.Н. Малинин, - М.: Машиностроение, 1975. - 399 с.
2. Chygyryns'kyu V.V. A Generalised Theory of Plasticity [Text] / V.V. Chygyryns'kyu, A.Ya. Kachan, I. Mamuzić, A.N. Ben' // Materials and Technology. Institute of Metals and Technology – Ljubljana, Slovenija. - POB 431. – 2010. – P. 141-145.
3. Чигиринский В.В. Обобщенная теория пластичности. Модель сложной пластической среды [Текст] / В.В. Чигиринский, А.Я. Качан, А.Н. Бенъ // Вестник национального технического университета Украины. Политехнический институт – Киев, 2008. – С. 141-148.
4. Чигиринский В.В. Некоторые особенности обобщенной теории пластичности для упрочняющейся среды [Текст] / В.В. Чигиринский, А.Н. Бенъ // Вестник двигателестроения – Запорожье, 2008. - № 2 – С. 8-12.
5. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1977. - 424 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВАЛКОВ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ MSC.VISUALNASTRAN 4D

С.А. Машеков, А.Е. Нургазаев, Е.З. Нугман, Казахский Национальный Технический Университет

Известно, что одним из основных направлений повышения качества прокатываемых полос является обеспечение минимальной продольной и поперечной разнотолщинности, а также планшетной формы полосы [1]. В настоящее время для прокатки полос с заданной толщиной, профилем и планшетной формой ведутся работы, направленные на совершенствование прокатного оборудования, создания новых способов прокатки, конструкций прокатных станов и валковых систем, разработку автоматических систем управления толщиной, профилем и планшетностью прокатываемых полос.

По нашему мнению лучшим методом регулирования разнотолщинности и планшетности является уменьшение усилия прокатки от одной клетки к другой в направлении прокатки. С этой целью нами усовершенствована конструкция прокатного стана [2].

Усовершенствованный стан содержит рабочие клетки, электродвигатель, муфту, опорные неприводные валки, рабочие приводные валки, станину, опорную плиту. Имеющие от одного двигателя переменного тока приводы клетки содержат рабочие и опорные валки постоянного диаметра, а в последовательно расположенных клетях диаметр рабочих валков уменьшается в направлении прокатки, соответственно диаметр опорных валков увеличивается. При этом вращение валков осуществляют через общую цепную передачу, индивидуальную муфту и накрест лежащие диаметром одинаковые колеса и шестерни, имеющие зубчатую передачу, а диаметры рабочих и опорных валков определяют по формуле, соответственно:

$$D_{i+1} = \frac{h_i \cdot D_i \cdot n_i \cdot (1+s_i)}{h_{i+1} \cdot n_{i+1} \cdot (1+s_{i+1})}; \quad D_{j-1} = \frac{h_j \cdot D_j \cdot n_j \cdot (1+s_j)}{h_{j-1} \cdot n_{j-1} \cdot (1+s_{j-1})}; \quad (1)$$

где h_i, h_j – толщина прокатываемой полосы в i или j клетях; n_i и n_j – частота вращения валков i или j клетки; N – порядковый номер клетки; s_i и s_j – опережение на выходе из валков i или j клетки ($i = 1, 2, \dots, N; j = N, \dots, 2, 1$).

В усовершенствованном стане горизонтальные оси верхних и нижних валков первых трех клетей без нажимного механизма смещены от оси прокатки в вертикальном направлении на величину: