

УДК 621. 771. 01

Федоринов В. А.
 Чуруканов А. С.
 Юрков К. Ю.
 Закорвашевич Н. А.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПО КРОМКАМ ОТНОСИТЕЛЬНО ТОНКИХ ЛЕНТ ПРИ ИХ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

Одной из технологических особенностей процесса холодной прокатки относительно тонких и узких лент является повышенная степень влияния прикромочного эффекта, определяющего величину уширения и уровень энергосиловых параметров данного процесса [1]. При этом специфика механизма формирования граничных условий обуславливает существенное видоизменение схемы напряженно-деформированного состояния металла именно по кромкам прокатываемых лент, что делает необходимым учет данного эффекта как с точки зрения энергосиловых параметров процесса прокатки, так и с точки зрения количественной оценки степени использования запаса пластичности.

Целью работы является уточнение численных математических моделей процесса холодной прокатки относительно тонких лент [2, 3] на основе учета влияния прикромочного эффекта.

Осуществив в соответствии с методиками работ разбиение всей протяженности очага деформации на n -ое количество i -ых элементарных объемов и, определив текущие значения нормальных контактных напряжений p_{xi2} для каждого из них, произведем дополнительно разбиение поперечного сечения половины ширины $b_{xi2}/2$ прокатываемой ленты на конечное t -ое множество j -ых элементарных объемов и рассмотрим условие статического равновесия для каждого из них при проектировании всех сил на ось Z (рис. 1):

$$\sum F_{zj} = (s_{xi2zj1} - s_{xi2zj2})h_{xi2} + 0,5(t_{1xi2zj1} + t_{1xi2zj2} + t_{2xi2zj1} + t_{2xi2zj2})\Delta z_{xi2} = 0, \quad (1)$$

где s_{xi2zj1} , s_{xi2zj2} – нормальные осевые напряжения, действующие в начальном (последний цифровой индекс 1) и конечном (последний цифровой индекс 2) сечениях, положительные значения которых соответствуют напряжениям сжатия;

$t_{1xi2zj1}$, $t_{1xi2zj2}$, $t_{2xi2zj1}$, $t_{2xi2zj2}$ – текущие значения касательных контактных напряжений, действующих на прокатываемую ленту в рамках рассматриваемого ее поперечного сечения со стороны нижнего (первый цифровой индекс 1) и верхнего (первый цифровой индекс 2) рабочих валков;

h_{xi2} – толщина прокатываемой ленты в конечном граничном сечении i -го элементарного объема, полученного путем разбиения очага деформации по оси X [2, 3];

$\Delta z_{xi2} = b_{xi2}/(2m)$ – шаг разбиений ширины прокатываемой ленты на j -ые элементарные объемы, определяемый их общим количеством m .

С учетом аналитических описаний касательных контактных напряжений и условия пластичности, уравнение (1) может быть трансформировано как:

$$(s_{xi2zj1} - p_{xi2zj2} + 2K_{xi2})h_{xi2} + 0,5[p_{xi2zj1}(f_{1xi2zj1} + f_{2xi2zj1}) + p_{xi2zj2}(f_{1xi2zj2} + f_{2xi2zj2})]\Delta z_{xi2} = 0, \quad (2)$$

откуда, по отношению к искомым величинам нормальных контактных p_{xi2zj2} и нормальных осевых s_{xi2zj2} напряжений, в окончательном виде имеем:

$$p_{xi2zj2} = \frac{2(s_{xi2zj1} + 2K_{xi2})h_{xi2} + p_{xi2zj1}(f_{1xi2zj1} + f_{2xi2zj1})\Delta z_{xi2}}{2h_{xi2} - (f_{1xi2zj2} + f_{2xi2zj2})\Delta z_{xi2}}; \quad (3)$$

$$S_{xi2zj2} = p_{xi2zj2} - 2K_{xi2}, \quad (4)$$

где количественные оценки напряжений p_{xi2zj1} и S_{xi2zj1} , согласно используемой рекуррентной схеме решения, являются известными, исходя из результатов расчета предыдущего $(j-1)$ элементарного поперечного сечения;

$2K_{xi2}$ – текущее по длине очага деформации удвоенное значение сопротивления сдвигу металла прокатываемой ленты, определяемое на основе методики работы [2];

$f_{1xi2zj1}, f_{2xi2zj1}, f_{1xi2zj2}, f_{2xi2zj2}$ – текущие значения коэффициентов внешнего трения, характеризующие согласно закону Амонтона-Кулона $t_{xz} = p_{xz}f_{xz}$ [1] величину касательных контактных напряжений в очаге деформации.

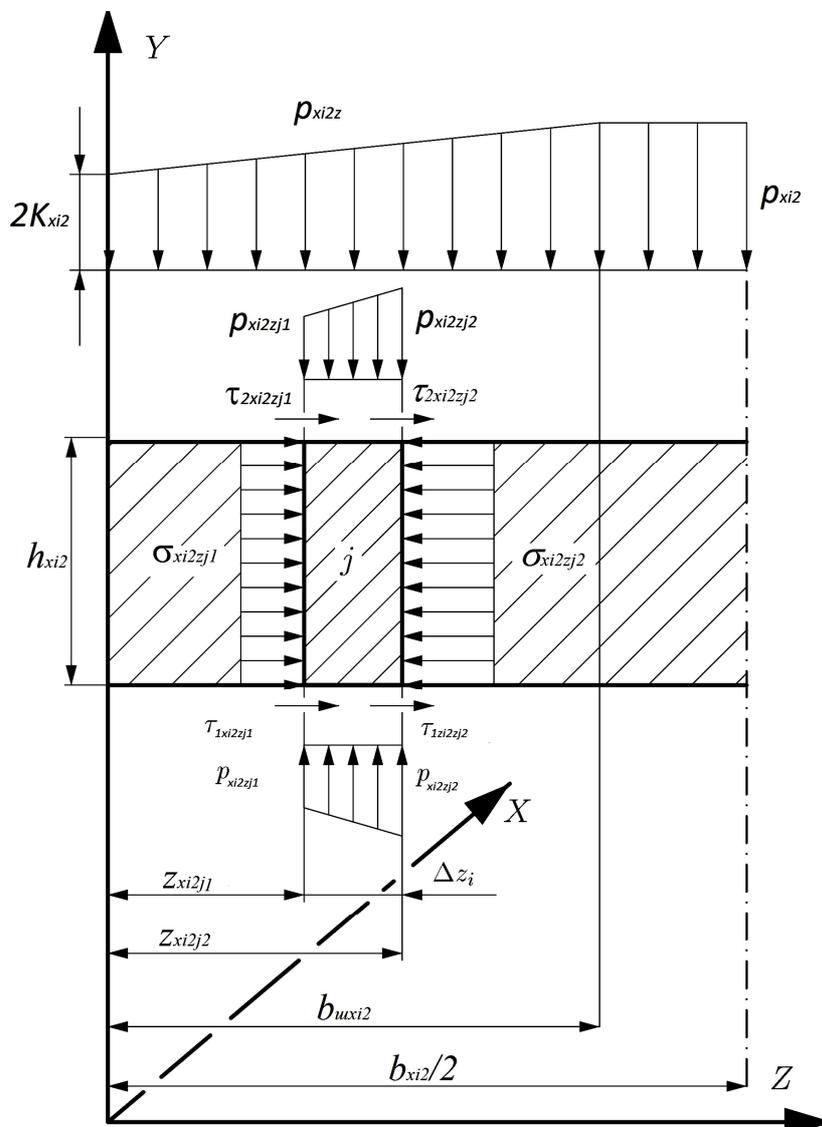


Рис. 1. Расчетная схема очага деформации при математическом моделировании напряженно-деформированного состояния металла по кромкам относительно тонких лент при их холодной прокатке

В качестве направления рекуррентного решения использовали направление от кромок прокатываемой ленты к ее середине, то есть направление, соответствующее оси Z, имеющей

свое начало на кромке и являющейся перпендикулярной оси прокатки (см. рис. 1). С учетом этого начальные условия и условия связи используемой рекуррентной схемы решения соответствовали:

$$z_{xi2j1} \Big|_{j=1} = 0,0; \quad s_{xi2zj1} \Big|_{j=1} = 0,0; \quad p_{xi2zj1} \Big|_{j=1} = 2K_{xi2}; \quad (5)$$

$$z_{xi2j2} = z_{xi2j1} + \Delta z_{xi2}; \quad z_{xi2(j+1)1} = z_{xi2j2}; \quad s_{xi2z(j+1)1} = s_{xi2zj2}; \quad p_{xi2z(j+1)1} = p_{xi2zj2}. \quad (6)$$

Непосредственно численное рекуррентное решение, учитывая симметрию поперечных i -ых сечений очага деформации, производили только для одной из кромок (см. рис. 1), завершая его по мере равенства нормальных контактных напряжений, полученных при расчете вдоль p_{xi2} и поперек p_{xi2zj2} оси прокатки, то есть по мере выполнения условия вида:

$$p_{xi2zj2} \geq p_{xi2}. \quad (7)$$

При этом геометрическая координата z_{xi2j2} , соответствующая началу выполнения условия (7), была принята за протяженность зоны повышенного уширения b_{uxi2} для каждой из кромок.

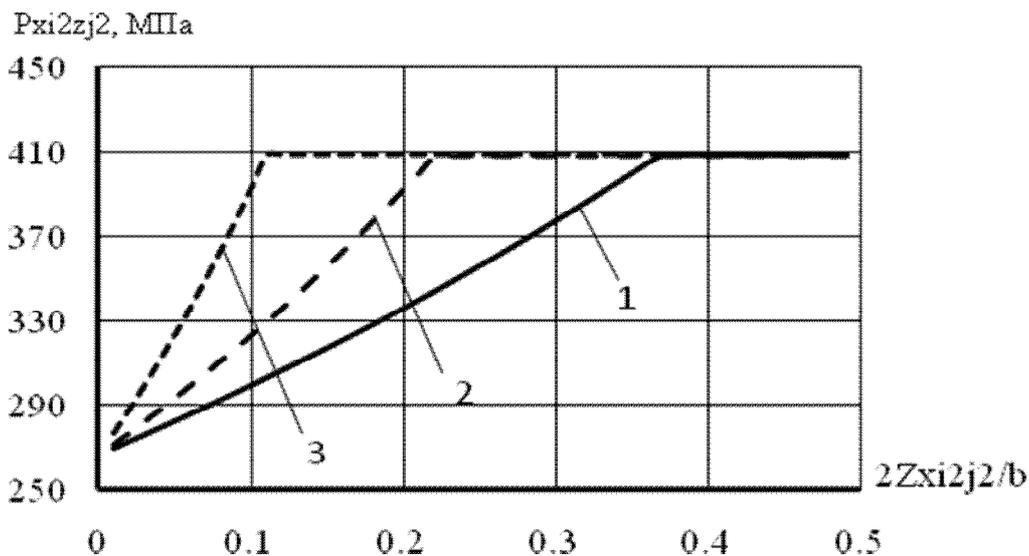


Рис. 2. Расчетные распределения нормальных контактных напряжений по ширине очага деформации p_{xi2z} при холодной прокатке латунных лент (Л63) на реверсивном стане 250: 1 – $b = 30$ мм; 2 – $b = 50$ мм; 3 – $b = 100$ мм

С учетом количественной оценки порядкового номера j -го элементарного сечения $\left(m^* \Big|_{p_{xi2zj2} \geq p_{xi2}} \right)$, для которого выполняется соотношение (7), определяли также и среднеинтегральное значение нормальных контактных напряжений для i -го поперечного сечения всего очага деформации:

$$p_{cxi2} = 2 \left[\sum_{j=1}^{m^*} 0,5 (p_{xi2zj1} + p_{xi2zj2}) \Delta z_{xi2} + p_{xi2} (b_{xi2}/2 - b_{uxi2}) \right] / b_{xi2}, \quad (8)$$

знание которого необходимо для последующего численного интегрирования по i -ой процедуре рекуррентного решения и определения интегральной величины силы прокатки в зоне пластического формоизменения металла с учетом наличия прикромочного эффекта:

$$p = \sum_{i=1}^n 0,5(p_{cxi1} + p_{cxi2}) \Delta x b_{xi2}. \quad (9)$$

В целом представленные зависимости (3)–(9) составили математическое обеспечение подпрограммы, уточняющей численные математические модели процессов симметричной и асимметричной прокатки относительно тонких лент. В качестве примера результатов численной реализации полученных программных средств на рис. 2 представлены расчетные распределения нормальных контактных напряжений по ширине определенного поперечного сечения очага деформации. Анализ полученных в этом случае результатов свидетельствует о том, что учет прикромочного эффекта приводит к снижению среднеинтегральных значений нормальных контактных напряжений p_{cxi2} , а вместе с этим и к соответствующему снижению интегрального значения силы прокатки. При этом степень уточнения по результатам расчета силы прокатки находится в диапазоне 5...15 (%), большие значения которого соответствуют прокатке более узких лент.

Анализ представленных и аналогичных им результатов показал, что нормальные контактные напряжения, возникающие при прокатке относительно тонких лент, неравномерно распределяются по ширине прокатываемого металла вследствие более низкого уровня средних нормальных осевых напряжений. При этом степень уточнения, как показала количественная оценка получаемых результатов, находилась в диапазоне (5...15 %).

ВЫВОДЫ

На основе численного подхода, предполагающего разбиение очага деформации по его длине и ширине с последующим рекуррентным решением условий статического равновесия выделенных элементарных объемов, уточнены численные математические модели процесса холодной прокатки относительно тонких лент, обеспечивающие учет прикромочного эффекта. При этом степень уточнения по силе прокатки, как показала количественная оценка полученных результатов, находится в диапазоне (5...15 %), большие значения которого соответствуют прокатке более узких лент.

ЛИТЕРАТУРА

1. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
2. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 243 с.
3. Сатонин А. В. Численное конечно-разностное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при реализации различных технологических схем обработки давлением / А. В. Сатонин // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 559–564.

Федоринов В. А. – канд. техн. наук, проф. ректор ДГМА;

Чуруканов А. С. – аспирант ДГМА;

Юрков К. Ю. – инженер ТСО ДГМА;

Закорвашевич Н. А. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua