

УДК 621. 771. 01

Федоринов В. А.  
Спасская А. М.  
Закорвашевич Н. А.  
Коряченко Н. А.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТЕПЕНИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАПАСА ПЛАСТИЧНОСТИ НА КРОМКАХ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ЛЕНТ И ПОЛОС

Наряду с продольной и поперечной разнотолщинностью, показателями плоскостности и формы, уровнем и степенью стабильности результирующих физико-механических свойств, одним из основных показателей качества холоднокатаных лент и полос является наличие внутренних и наружных дефектов сплошности, характеризующимися количественно степенью использования запаса пластичности прокатываемого металла [1, 2]. При этом количественные оценки данного показателя для середины и на кромках прокатываемых полос в силу несоответствия в схемах напряженно-деформированного состояния металла являются различными, что, как показывает опыт промышленной реализации процесса холодной прокатки, предопределяет повышенную вероятность дефектообразования именно на кромках. Отмеченное, в свою очередь, исходя из условия снижения обрывности, регламентирует технологические режимы обжатий и натяжений, а также приводит к снижению коэффициента выхода годного за счет увеличения ширины кромок, обрезаемых в последующем на агрегатах продольной резки.

Целью работы является развитие численных методов расчета показателей степени использования запаса пластичности листового металлопроката с учетом реального характера механизма формирования напряженно-деформированного состояния металла на кромках лент и полос при их холодной прокатке.

Применительно к количественной оценке показателя степени использования запаса пластичности металлов и сплавов  $\psi_x$  при холодной прокатке относительно тонких лент и полос и последующих операций листовой штамповки одной из наиболее широко используемых является методика В. А. Огородникова [2], позволяющая более полно учесть реальный характер развития напряжений и деформаций во времени. Будучи адаптированной, применительно к процессам холодной прокатки, данная методика имеет вид [3]:

$$\psi_x = \int_0^{\varepsilon_{ux}} [1 + a_{\psi} \arctg(d\eta_x / d\varepsilon_{ux})] \frac{\varepsilon_{ux} \arctg(d\eta_x / d\varepsilon_{ux})}{\varepsilon_{upx} * [1 + a_{\psi} \arctg(d\eta_x / d\varepsilon_{ux})]} d\varepsilon_{ux}, \quad (1)$$

где  $x$  – геометрическая координата вдоль очага деформации, направленная противоположно прокатке и имеющая свое начало в конечном граничном сечении зоны пластического формоизменения металла (рис. 1, а);

$a_{\psi} = 0,215$  – коэффициент регрессии при аппроксимации функциональной связи, определяемой направлением деформирования;

$\eta_x$  – текущее значение показателя напряженного состояния металла, определяемое согласно Г. А. Смирнову-Аляеву [2] как:

$$\eta_x = (\sigma_{1x} + \sigma_{2x} + \sigma_{3x})\sigma_{ux},$$

$\sigma_{1x}, \sigma_{2x}, \sigma_{3x}$  – текущие значения главных напряжений, за положительные значения которых приняты напряжения растяжения;

$$\sigma_{ux} = \sqrt{(\sigma_{1x} - \sigma_{2x})^2 + (\sigma_{2x} - \sigma_{3x})^2 + (\sigma_{3x} - \sigma_{1x})^2} / \sqrt{2} - \text{интенсивность напряжений};$$

$\varepsilon_{ux} = (\sqrt{2}/3)\sqrt{(\varepsilon'_{1x} - \varepsilon'_{2x})^2 + (\varepsilon'_{2x} - \varepsilon'_{3x})^2 + (\varepsilon'_{3x} - \varepsilon'_{1x})^2}$  – текущее значение интенсивности логарифмических деформаций;

$\varepsilon'_{1x}, \varepsilon'_{2x}, \varepsilon'_{3x}$  – главные логарифмические деформации, положительные значения которых соответствуют деформациям растяжения;

$\varepsilon_{upx}$  – предельное, с точки зрения разрушения данного материала, текущее значение интенсивности логарифмических деформаций, являющееся справедливым для случая объемного напряженного состояния и определяемое по диаграммам пластичности в соответствии с методикой работы [2].

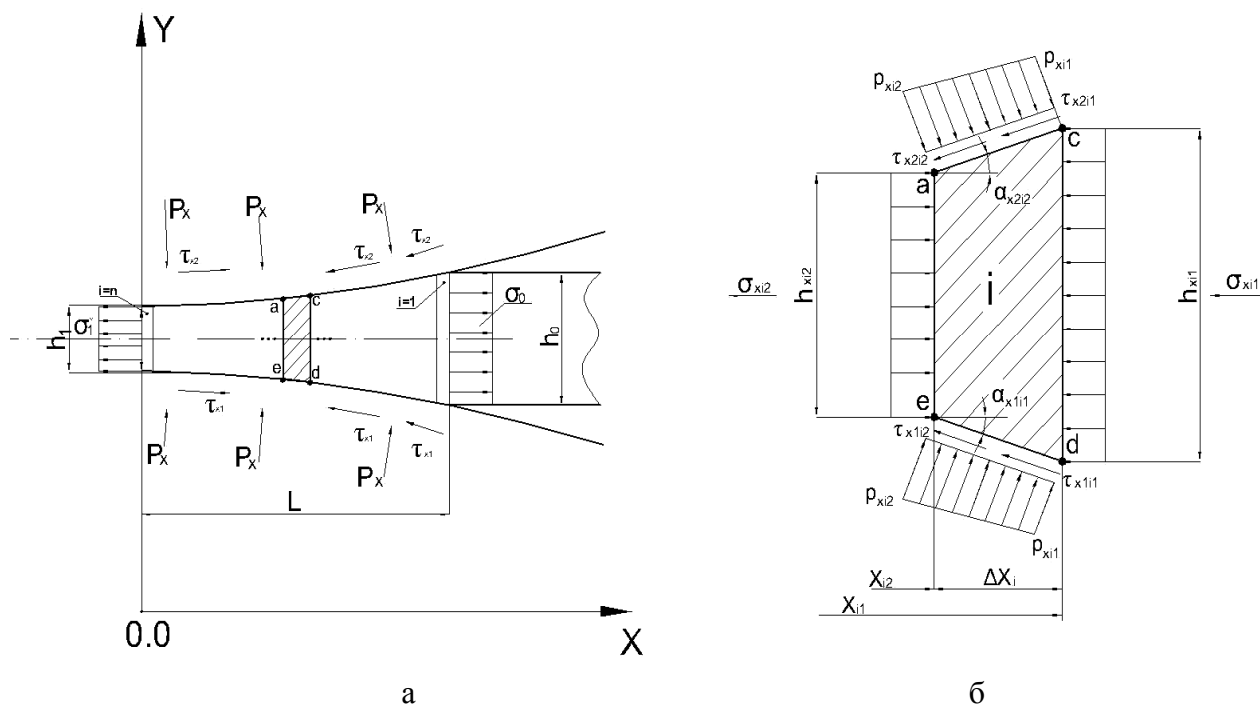


Рис. 1. Расчетные схемы интегрального очага деформации (а) и его выделенного элементарного объема (б) применительно к численному математическому моделированию локальных характеристик напряженно-деформированного состояния металла очага деформации процесса холодной прокатки относительно тонких лент и полос

Осуществив, по аналогии с методиками работ [3–5], разбиение интегрального очага деформации (см. рис. 1, а) на конечное множество  $n$  элементарных объемов  $I = 1 \dots n$  (см. рис. 1, б) и используя рекуррентные решения конечно-разностных форм условий статико-динамического равновесия [3, 4] или условий баланса энергетических затрат [3, 5], рассматриваемых в рамках каждого из них, определяли величину нормальных контактных  $p_{xi2}$  и нормальных осевых  $\sigma_{xi2}$  напряжений. Помимо собственно рекуррентного решения напряженного состояния металла в зоне пластического формоизменения данные численные математические модели напряженного состояния металла с целью максимально корректного учета реального характера распределений геометрических параметров, механических свойств и условий внешнего контактного трения по длине очага деформации включали в себя организацию следующих процедур [3–5]:

- расчет зоны упругого восстановления прокатываемых лент и полос в сечениях на выходе из рабочих валков;
- итерационный расчет относительных протяженностей зон опережения исходя из условия равенства расчетных и заданных значений напряжений переднего натяжения;
- численное интегрирование локальных характеристик напряженного состояния металла с целью определения силы и моментов прокатки;
- итерационную схему решения по учет упругого сплющивания рабочих валков.

Применительно к центральной, то есть основной части холоднокатаных лент и полос с учетом полученных количественных оценок нормальных контактных  $p_{xi2}$  и нормальных

осевых  $\sigma_{xi2}$  напряжений, исходя из предположения о двухмерном характере пластического формоизменения ( $\varepsilon'_{2x} = 0$ ), главные напряжения, входящие в алгоритмическую последовательность (1), с учетом правила знаков должны соответствовать [3]:

$$\sigma_{1xi} = -\sigma_{xi2}; \sigma_{2xi} = -(\sigma_{xi2} + p_{xi2})/2; \sigma_{3xi} = -p_{xi2}. \quad (2)$$

Применительно же к кромкам холоднокатаных полос главные напряжения могут быть определены двумя способами, либо из условия равенства нулю средних напряжений:

$$\sigma_{1xi} = -\sigma_{xi2}; \sigma_{2xi} = 0; \sigma_{3xi} = -2K_{xi2}, \quad (3)$$

либо из условия равенства нулю средних и нормальных осевых напряжений:

$$\sigma_{1xi} = 0; \sigma_{2xi} = 0; \sigma_{3xi} = -2K_{xi2}. \quad (4)$$

Представив по аналогии с методиками работы [3], остальные компоненты уравнения (1) в конечно-разностном виде и адаптировав их применительно к соответствующим численным математическим моделям [3–5], получим:

$$\eta_{xi2} = (\sigma_{1xi} + \sigma_{2xi} + \sigma_{3xi}) / \sqrt{(\sigma_{1xi} - \sigma_{2xi})^2 + (\sigma_{2xi} - \sigma_{3xi})^2 + (\sigma_{3xi} - \sigma_{1xi})^2} / \sqrt{2}; \quad (5)$$

$$d\eta_{xi} = \Delta\eta_{xi} = \eta_{xi2} - \eta_{xi1}; \quad (6)$$

$$de_{uxi} = \Delta e_{uxi} = e_{uxi} - e_{ux(i-1)} = \ln(h_{xi1} / h_{xi2}); \quad (7)$$

$$e_{uxi2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^i \Delta e_{uxi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln(H_0 / h_{xi2}); \quad (8)$$

$$\psi_{xi} = \psi_0 + \sum_{i=1}^i \left[ 1 + a_{\psi} \arctg\left(\frac{\Delta\eta_{xi}}{\Delta e_{uxi}}\right) \right] \frac{e_{uxi2}}{e_{upxi2}^{* [1 + a_{\psi} \arctg(\Delta\eta_{xi} / \Delta e_{uxi})]}} \Delta e_{uxi}, \quad (9)$$

где, согласно используемой рекуррентной схеме решения,  $\eta_{xi1} = \eta_{x(i-1)2}$ ;

$\psi_0$  – показатель степени использования запаса пластичности металла холоднокатаных полос, полученный на предыдущих технологических переделах, то есть в предыдущих проходах;

$H_0$  – толщина полосы в ее исходном, т. е. в отоженном состоянии;

$h_{xi1}, h_{xi2}$  – толщина полосы в начальном и конечном граничных сечениях выделенного  $i$ -ого элементарного объема зоны пластического формоизменения металла (см. рис. 1).

В качестве начального условия использовали соотношение следующего вида:

$$\eta_x|_{i=1} = \sqrt{3}(-\sigma_{xi1}|_{i=1} - p_{xi1}|_{i=1}) / (-\sigma_{xi1}|_{i=1} + p_{xi1}|_{i=1}). \quad (10)$$

В целом, представленные зависимости (2)–(10) в сочетании с соответствующими численными математическими моделями напряженно-деформированного состояния [3–5], составили полный комплекс программного обеспечения по автоматизированному расчету степени использования запаса пластичности металла на различных участках холоднокатаных лент и полос. В качестве примеров результатов численной реализации полученных математических моделей и соответствующих им программных средств на рис. 2 представлены расчетные распределения результирующего значения степени использования запаса пластичности при холодной прокатке на реверсивном стане 250/750 × 900 полос из латуни Л63 с исходной толщиной  $H_0 = 1,0$  мм по трехпроходной схеме.

Анализ представленных и аналогичных им результатов показал, что степень использования запаса пластичности холоднокатаных лент и полос зависит от целого ряда факторов,

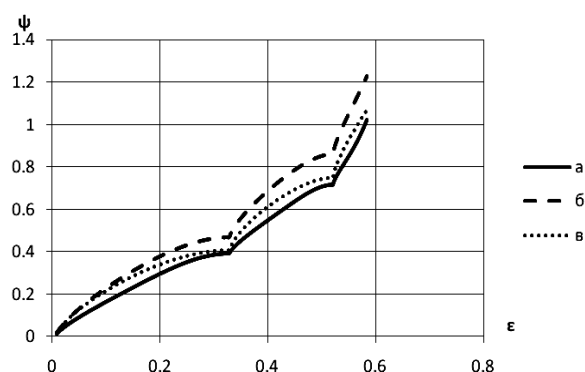


Рис. 2. Расчетные распределения показателя степени использования запаса пластичности прокатываемого материала  $\psi_1$  при холодной прокатке на реверсивном стане  $250/750 \times 900$  латунных (Л63,  $H_0 = 1,0$  мм) полос по их основной части (а) и по кромкам при использовании условия (2) (б) и условия (3) (в)

основными из которых являются технологические режимы обжатий, радиусы рабочих валков, условия внешнего контактного трения, уровни переднего и заднего натяжений, степень кинематической асимметрии и ряд других. При этом количественная оценка данного показателя по кромкам полосы вследствие более низкого уровня средних нормальных осевых напряжений и коэффициента напряженного состояния на 15...25 (%) выше, чем в остальной части, что необходимо учитывать в качестве критериальной оценки при непосредственном автоматизированном проектировании технологических режимов процесса холодной прокатки.

### ВЫВОДЫ

С учетом специфики механизма формирования напряженно-деформированного состояния металла холоднокатаных лент и полос уточнена и расширена математическая модель текущих и результирующих значений показателя степени использования запаса пластичности. Установлено, что в самом общем случае условия реализации процесса холодной прокатки показатели степени использования запаса пластичности на кромках на 15...25 (%) выше, при этом их количественная оценка может быть снижена за счет интенсификации технологических режимов обжатий, увеличения радиусов рабочих валков и коэффициентов внешнего контактного трения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформация, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Машиностроение, 1970. – 229 с.
2. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 175 с.
3. 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.
4. 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. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 559–564.
5. Сатонин А. В. Численная одномерная математическая модель процесса прокатки относительно тонких композиционных листов и полос, основанная на энергетическом подходе / А. В. Сатонин // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ : ДДМА, 1998. – С. 36–41.

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

Спаская А. М. – аспирант ДГМА;

Закорвашевич Н. А. – студент ДГМА;

Коряченко Н. А. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua