



*The results of modeling of the stressedly-deformed state on the surface of samples at rolling in millings are given. The influence of factors of the deformation focus form and parameters of cut on the stressedly-deformed state at rolling of slugs in templets is investigated.*

А. Б. СТЕБЛОВ, Д. В. ЛЕНАРТОВИЧ, БНТУ

УДК 621.771.26.01

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ ЗАГОТОВОК НА СОРТОВОМ СТАНЕ

При расчете калибровки валков сортовых профилей граничными условиями, влияющими на выбор системы калибров, распределение коэффициентов вытяжки по проходам, являются допустимые углы захвата, условия устойчивости полосы в калибрах, прочность рабочих валков, мощность двигателей главной линии стана и пластичность металла. Все известные методы расчета калибровки валков не учитывают процесс накопления повреждений на поверхности раската, что не позволяет заранее прогнозировать вероятность появления дефектов и уровень зачистки металла при выборе конкретной схемы деформации. В данной работе представлены результаты исследования по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) при прокатке сортовых профилей, т.е. в ящичных калибрах с защемлением полосы.

В [1] была предложена инженерная модель для расчета накопления повреждений и использования запаса пластичности в поверхностных слоях металла  $\psi_i$  для случая прокатки слитков и заготовок на блюмингах:

$$\psi_i = \sum_{i=1}^n \left[ E_i(T_D, \tau) \frac{\Lambda_i}{\Lambda_{pi}(P, T_D, \xi_u, \sigma/T)} \right], \quad (1)$$

где  $n$  – число проходов;  $\Lambda_i$  – степень деформации сдвига частицы металла за данный проход;  $\Lambda_{pi}$  – степень деформации сдвига к моменту разрушения (пластичность), характерная для напряженного состояния данной частицы в том же проходе;  $P$  – «природа» стали, фактор, учитывающий влияние марки стали, технологии металлургического производства и структурной неоднородности металла на пластичность;  $T_D$  – температура прокатки;  $\tau$  – время;  $\xi_u$  – скорость деформации;  $E_i$  – величина, учитывающая залечивание части дефектов при пластической деформации и в промежутках между стадиями деформирования [2].

Эта модель базируется на феноменологических представлениях оценки критерия пластичности в постановке В.Л. Колмогорова [3], который в качестве такого критерия предложил величину  $\Lambda_p$  – степень деформации сдвига ( $d\Lambda_p = Hd\tau$ ), где  $H$  – интенсивность деформаций сдвига. Феноменологическая теория разрушения металлов при пластической деформации основана на понятии степени использования ресурса пластичности металла  $\psi$ , характеризующей поврежденность металла и изменяющейся от 0 до 1. Условие деформирования металла без разрушения сформулировано в следующем виде:

$$\psi = \int_0^t B(\tau) E(t-\tau) \frac{Hd\tau}{\Lambda_p} < 1, \quad (2)$$

где  $B(\tau)$  и  $E(t-\tau)$  – функции, учитывающие немонотонность деформации и залечивание части дефектов при деформации и изменяющиеся от 0 до 1.

Для расчета степени использования запаса пластичности металла при прокатке необходимо предварительно определить напряженно-деформированное состояние: траектории движения частиц, степень деформаций сдвига ( $\Lambda$ ) и показатель напряженного состояния ( $K$ ) в каждой точке деформируемого тела.

Для случая прокатки слитков и заготовок на гладкой бочке валков были получены следующие уравнения:

для боковой поверхности:

$$\Lambda_i^F = -0,28 + 0,4 \frac{\Delta h}{H_0} + 0,17 \frac{H_0}{B_0} - 0,36 \frac{\Delta f}{H_0} + \Lambda(\Delta T)_i^F,$$

$$\Lambda(\Delta T)_i^F = 0,89 \frac{l}{h_c} + 0,0047 \Delta T \left( 0,2817 - \frac{l}{h_c} \right) + 0,17(1 - 0,009 \Delta T) \left( \frac{2z}{h} \right)^2,$$

$$K_i^F = 0,509 - 0,98 \frac{l}{h_c} - 0,31 \frac{\Delta f}{H_0} - 0,38 \frac{H_0}{B_0} + 0,83 \left( \frac{l}{h_c} \frac{H_0}{B_0} \right) + K(\Delta T)_i^F,$$

$$K(\Delta T)_i^F = 0,0154 \Delta T \left( \frac{l}{h_c} - 0,2545 \right) + 0,0718(1 - 0,0381 \Delta T) \left( \frac{2z}{h} \right)^2;$$

для контактной поверхности:

$$\Lambda_i^K = 0,31 - 0,71 \frac{l}{h_c} - 0,94 \frac{\Delta f}{H_0} + 3,7 \frac{\Delta h}{H_0} - 0,23 \frac{H_0}{B_0} + \Lambda(\Delta T)_i^K,$$

$$\Lambda(\Delta T)_i^K = 0,01 \left[ \Delta T \left( 0,23 - \frac{l}{h_c} + 0,0007 \Delta T \right) + (6,4 + 0,07 \Delta T(1 - 0,01 \Delta T)) \left( \frac{2z}{h} \right)^2 \right],$$

$$K_i^K = -2,8 + 6,6 \frac{l}{h_c} + 1,01 \frac{\Delta f}{H_0} - 1,56 \frac{\Delta h}{H_0} + 0,14 \frac{H_0}{B_0} + K(\Delta T)_i^K,$$

$$K(\Delta T)_i^K = 0,0124 \Delta T \left( 2,984 \frac{l}{h_c} - 1 \right),$$

где  $l/h_c$ ,  $\Delta h/H_0$ ,  $H_0/B_0$  – известные в теории продольной прокатки параметры очага деформации. Параметр  $\Delta f/H_0$  характеризует фактор формы боковой поверхности раската после каждого прохода в валках:  $+\Delta f/H_0$  соответствует выпуклой грани,  $-\Delta f/H_0$  – вогнутой боковой грани (двойная бочка). Неравномерность нагрева слитка по сечению моделирует параметр  $\Delta T$ .

Исследования были выполнены на свинцовых образцах. Авторами [1] при прокатке экспериментальных полос исследовалось изменение НДС в поверхностных слоях раската методом сеток, наносимых на поверхность моделей типографическим способом. В работе [4] Е.Г. Зудовым применена сетка, включающая в себя систему взаимно перпендикулярных прямых линий и соприкасающихся окружностей.

В процессе прокатки свинцовых образцов валки тормозили, получая на образцах очертания очага деформации (рис. 1). Данная методика была использована для определения степени деформации сдвига и показателя НДС на контактной и свободной поверхностях раската.

Свинцовые слитки отливали в стальные ложницы, затем слитки проковывали на молоте с узкими бойками. Поверхность слитков подвергалась строжке до необходимых размеров сечения, которое выбиралось исходя из условий проведения эксперимента. На поверхность слитка типографическим способом наносили мелкочаеистую координатную сетку. Размеры поперечного сечения слитка изменялись в пределах 28–42х66–72 мм, диаметры валков – 120 и 240 мм.

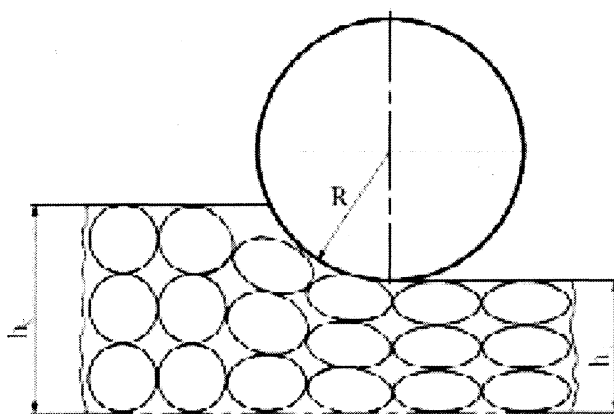


Рис. 1. Очаг деформации при прокатке

Условия проведения эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. Уровень и интервалы варьирования факторов

Фактор	Интервал варьирования	Уровень		
		основной	верхний (+1)	нижний (-1)
$l/h_c$	0,12	0,48	0,6	0,36
$\Delta h/H_0$	0,066	0,154	0,22	0,088
$H_0/B_0$	0,6	1,0	1,6	0,4
$\Delta f/H_0$	0,12	0	+0,12	-0,12
$\Delta T$	100	0	+100	-100

Измерение координатной сетки проводили на инструментальном микроскопе БМИ с точностью до 0,005 мм. При этом определяли величину и направление большой и малой осей эллипсов первоначально круглой ячейки. Степень деформации сдвига некоторой ячейки, прошедшей вдоль линии через очаг деформации, равна:

$$\Lambda = \int_0^l H dt, \quad (5)$$

где  $H$  – интенсивность скоростей деформаций сдвига.

В пределах очага деформации имеется  $n$  ячеек. При переходе из  $(i-1)$ -го в  $i$ -е положение ячейка претерпевает некоторую малую деформацию  $\Delta\Lambda_i$ , поэтому

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \Delta\Lambda_i, \quad (6)$$

$\Delta\Lambda_i$  считается монотонной:

$$\Delta\Lambda_i = 2\sqrt{\varepsilon_{1i}^2 + \varepsilon_{1i}\varepsilon_{2i} + \varepsilon_{2i}^2}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{1i} = \ln a_i/a_{i-1}$ ;  $\varepsilon_{2i} = \ln b_i/b_{i-1}$ ;  $a$  и  $b$  – большая и малая оси эллиптической ячейки  $i$ -го и  $(i-1)$ -го номеров.

Из физических уравнений состояния получили

$$\sigma_3 - \sigma = (\lambda)\varepsilon_3, \quad (8)$$

где  $\lambda = 2T/H$  – скалярный коэффициент, выражаемый через обобщенные характеристики напряженно-деформированного состояния;  $T$  – интенсивность касательных напряжений;  $H$  – интенсивность скоростей деформаций сдвига [3].

Из-за отсутствия на свободной поверхности нормальных напряжений ( $\sigma_3 = 0$ ) и с учетом уравнения несжимаемости  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$  из формулы (4) получили показатель напряженного состояния в каждой ячейке:

$$K_i = (\sigma/T)_i = 2(\varepsilon_{1i} + \varepsilon_{2i})/\lambda_i. \quad (9)$$

Средний за процесс деформации ячейки показатель напряженного состояния можно определить как средневзвешенную величину:

$$K = (\sigma/T)_{cp} = \left[ \sum_{i=1}^n (\sigma/T)_i \lambda_i \right] / \lambda. \quad (10)$$

На контактной поверхности показатель  $K_i$  определяется по Н.Я. Бровману и равен:

$$K_i = (\sigma/T)_i = -2n_\sigma + 1, \quad (11)$$

где  $n_\sigma = \bar{P}/(2\tau_s)$ ;  $\bar{P}$  – среднее удельное давление при прокатке высоких полос при  $l/h_c < 1$ .

Полученные уравнения регрессии (3)–(4) позволили с достаточной точностью рассчитывать напряженно-деформированное состояние на контактной и боковой поверхности при прокатке слитка на гладкой бочке, что подробно описано в работе [1].

Работ по исследованию напряженно-деформированного состояния при прокатке сортовых профилей очень мало. Известна работа [5], в которой НДС при прокатке сортовых профилей исследовано только для некоторых систем калибров. В работе [6] предложены исследования и приведены

результаты, полученные при прокатке в ящичных калибрах, широко применяющихся в первых клетях непрерывно-заготовочных и сортовых станов. Очаг деформации (рис. 2) при прокатке в ящичных калибрах однозначно характеризуется следующими безразмерными параметрами:  $X_1 = l/h_c$ ,  $X_2 = \Delta h/H_0$ ,  $X_3 = H_0/B_0$ ,  $X_4 = K_3 = (B_K - B_D)/H_1$  – выпуск калибра (коэффициент защемления).

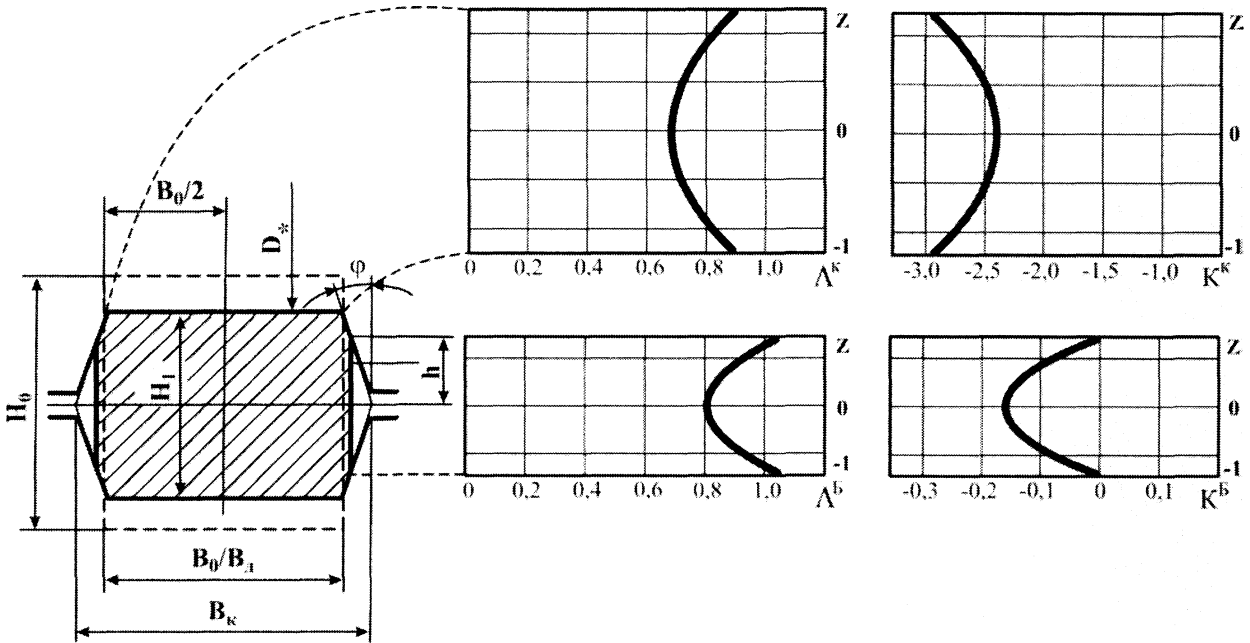


Рис. 2. Изменение НДС ( $\Lambda_i^b$ ,  $\Lambda_i^k$ ,  $K_i^b$ ,  $K_i^k$ ) на контактной и боковой поверхностях заготовки при прокатке в ящичных калибрах при  $l/h_c = 0,95$ ;  $\Delta h/H_0 = 0,272$ ;  $H_0/B_0 = 1,43$ ;  $K_3 = 0,14$ ;  $\Delta T = 0$

Уровни и интервалы варьирования параметров выбраны в соответствии с реальным диапазоном изменения их в существующих калибровках рабочих валков для крупно- и среднесортных станов (табл. 2).

Таблица 2. Интервалы варьирования технологических параметров

Уровни	Параметры			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Основной (0)	1,16	0,246	1,5	0,3
Верхний (+)	1,68	0,323	2,0	0,4
Нижний (-)	0,64	0,17	1,0	0,2
Интервал варьирования	0,64	0,077	0,5	0,1

С целью определения влияния геометрических параметров очага деформации на напряженно-деформированное состояние был использован некомпозиционный план второго порядка для четырех факторов, матрица которого приведена в табл. 3.

Образцы также изготавливали из свинца и на все грани наносили координатную сетку с размером ячейки 2 мм. При прокатке на лабораторных станах с диаметрами валков 115 и 270 мм образцы тормозили в валках, получая недокаты. Координаты узлов сетки замеряли на инструментальном микроскопе с электронно-цифровой индикацией.

После статистической обработки результатов измерений были получены регрессионные уравнения для расчета НДС на контактной и боковой поверхностях полосы при прокатке в ящичных калибрах:

$$\Lambda_i^b = 0,326 - 0,104 \frac{l}{h_c} - 0,45K_3 + 2,65 \frac{\Delta h}{H_0} - 0,067 \frac{H_0}{B_0} + 0,25 \left( 1 + 2,24 \frac{\Delta h}{H_0} - 0,36 \frac{H_0}{B_0} \right) \left( \frac{2z}{h} \right)^2, \quad (12)$$

$$K_i^b = -0,2 - 0,176 \frac{H_0}{B_0} + 0,39K_3 + 0,93 \frac{\Delta h}{H_0} + 0,07 \left( 1 + 2,25 \frac{\Delta h}{H_0} \right) \left( \frac{2z}{h} \right)^2, \quad (13)$$

Таблица 3. Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	+	+	0	0
2	+	-	0	0
3	-	+	0	0
4	-	-	0	0
5	0	0	+	+
6	0	0	+	-
7	0	0	-	+
8	0	0	-	-
9	0	0	0	0
10	+	0	0	+
11	+	0	0	-
12	-	0	0	+
13	-	0	0	-
14	0	+	+	0
15	0	+	-	0
16	0	-	+	0
17	0	-	-	0
18	0	0	0	0
19	+	0	+	0
20	+	0	-	0
21	-	0	+	0
22	-	0	-	0
23	0	+	0	+
24	0	+	0	-
25	0	-	0	+
26	0	-	0	-
27	0	0	0	0

$$\Lambda_i^K = 0,4 + 2,34 \frac{\Delta h}{H_0} - 0,6K_3 - 0,12 \frac{l}{h_c} - 0,13 \frac{H_0}{B_0} + 0,052 \left( 8,48 \frac{l}{h_c} - 0,89 \frac{H_0}{B_0} - 1 \right) \left( \frac{2z}{h} \right)^2, \tag{14}$$

$$K_i^K = -1,486 - 3,12 \frac{\Delta h}{H_0} - 0,53K_3 - 0,003 \left( 8,33 \frac{l}{h_c} - 106 \frac{H_0}{B_0} - 1 \right) \left( \frac{2z}{h} \right)^2.$$

Наибольшее влияние на степень деформации сдвига  $\Lambda_i^B$ ,  $\Lambda_i^K$  оказывает коэффициент обжатия  $X_2$ ; на показатель напряженного состояния  $K_i^B$ ,  $K_i^K$  – коэффициент обжатия  $X_2$  и исходное отношение осей полосы  $X_3$ .

Результаты расчетов по выражениям (12) – (14) позволяют с достаточной точностью моделировать НДС на поверхности раскатов при прокатке в ящичных калибрах. На рис. 2 представлены результаты расчетов изменения степени деформации  $\Lambda_i^B$ ,  $\Lambda_i^K$  и показателя напряженного состояния  $K_i^B$  и  $K_i^K$  на свободной и контактной поверхностях очага деформации.

Анализ распределения степени деформации сдвига на свободной боковой поверхности показал, что характер распределения напоминает кривые, полученные при прокатке прямоугольных полос в гладких валках. Однако благодаря более низким очагам деформации неравномерность деформированного состояния значительно меньше. Максимальные значения  $\Lambda_i^B$  соответствуют участкам боковой поверхности полосы, прилегающим к боковому контакту (выпуску калибра). Это объясняется значительными сдвиговыми деформациями в указанных точках очага деформации. На контактной поверхности наибольшее значение  $\Lambda_i^K$  имеют участки металла, расположенные в углах профиля.

Средний показатель напряженного состояния на боковой и контактной поверхностях имеет значительно меньшую неравномерность, чем степень деформации сдвига. На контактной поверхности действуют значительные сжимающие напряжения ( $K^K \ll 0$ ), так же как и при прокатке по системе ромб–квадрат. Для прокатки в ящичных калибрах характерна мягкая схема напряженного состояния ( $K < 0$ ) и на свободной поверхности. При определенном сочетании параметров процесса на части

образцов наблюдаются растягивающие напряжения на участках боковой поверхности, прилегающей к боковому контакту.

В выражения (12) – (14) не включены параметры  $\Delta f/H_0$ , так как изменений формы боковой поверхности при прокатке в калибрах с защемлением полосы нет. Влияние температурного перепада  $\Delta T$  сечению полосы в выражениях (3) – (4) для случая прокатки полосы на гладкой бочке может быть учтено в качестве поправки для конкретно заданной разницы между температурой на поверхности и в центре полосы при прокатке в калибрах.

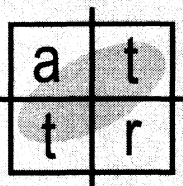
Полученные выражения (12) – (14) позволяют рассчитать характеристики напряженно-деформированного состояния, а затем и запас пластичности для конкретной марки стали при прокатке заготовок сечением 300x400 и 250x300 мм в условиях стана 850 РУП «БМЗ».

#### Литература

1. Стеблов А.Б., Филиппов В.В., Ленартович Д.В., Тищенко В.А. Напряженно-деформированное состояние раската при прокатке на заготовочных станах и блюмингах // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2003. №3. С. 32–37.
2. Анисович Г.А., Стеблов А.Б., Филиппов В.В. и др. Залечивание дефектов при горячей прокатке // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. №2. С. 108–110.
3. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. М.: Металлургия, 1970.
4. Зудов Е.Г. Исследование напряжений, деформации и разрушения раскатов из блюминговых слитков: Дис. ... канд. техн. наук, Свердловск, 1973.
5. Смирнов В.К., Тимофеев В.В. // Обработка металлов давлением. Уральский политехн. ин-т. Свердловск, 1979. №6. С. 66–73.
6. Егоров В.Д., Смирнов В.К., Зудов Е.Г. и др. Напряженно-деформированное состояние на поверхности полосы при прокатке в ящичных калибрах // Изв. вузов. Черная металлургия. 1983. №6. С. 37–40.



**КСПРЕСС-  
ИНФОРМАЦИЯ**



WFO Member

**18-я Международная национальная конференция по литейному производству и сопутствующая выставка Румынской литейной технической ассоциации состоятся 9–11 июня 2005 г. в г. Брасове (Румыния).**

Конференция предполагает собрать исследователей, профессоров из технических университетов, проектировщиков, технический и производственный персонал литейных цехов, бизнесменов. Свое участие подтвердили около 100 румынских литейных производств.

- Регистрационный взнос за участие одного делегата – 100 евро.
- Представление технического доклада с коммерческой направленностью – 150 евро.
- Стоимость выставочной площади – 40 евро/м<sup>2</sup>.

#### Подробная информация по адресу:

Prof. Iulian RIPOSAN, President of ATTR, Phine: +4074 5371462,  
+4021 4029543; Fax: +4021 4102397;

E-mail: [riposan@foundry.pub.ro](mailto:riposan@foundry.pub.ro);

Dr. Ion Alexandry BACANU, Executive Secretary of ATTR:

Phine: +40722 208115; Phine/Fax: +4021 3203267;

E-mail: [ibacanu@huettenes-albertus.ro](mailto:ibacanu@huettenes-albertus.ro)