

УДК621.771.01: 621.982.45

Сатонин А. В.  
Куберский С. В.  
Стриченко С. М.  
Жуков П. Л.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА «МЯГКОГО» ОБЖАТИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

Одним из наиболее перспективных направлений дальнейшего развития технологий и оборудования машин непрерывного литья сортовых заготовок является использование их «мягкого» обжатия, представляющего собой процесс прокатки с небольшими относительными обжатиями при неполной кристаллизации поперечного сечения данных заготовок, то есть при наличии жидкой фазы в их осевой зоне [1, 2]. Реализация данного технического решения позволяет уменьшить, а в ряде случаев и полностью устранить зоны осевой ликвации. Вместе с тем специфика условий реализации процесса «мягкого» обжатия, а именно наличие жидкой фазы и повышенного уровня перепада температур по площади поперечного сечения весьма существенно видоизменяет схему напряженно-деформированного состояния металла и делает актуальным дальнейшее развитие соответствующих методов расчета.

Целью работы является разработка инженерной методики расчета напряжений, деформаций и энергосиловых параметров при реализации процесса «мягкого» обжатия, реализуемого при непрерывном литье блюмовых и сортовых заготовок.

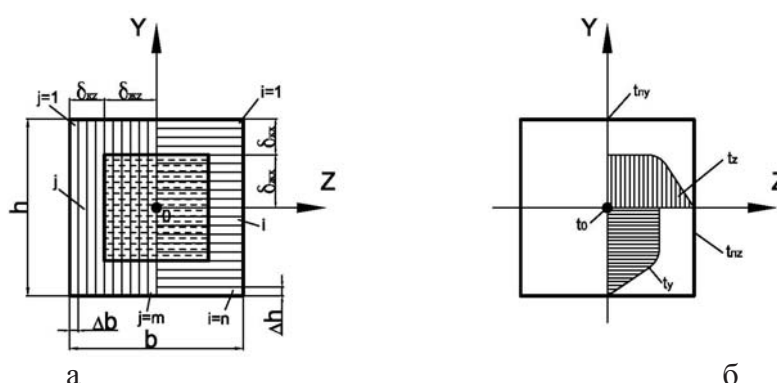


Рис. 1. Расчетные схемы применительно к математическому моделированию напряженно-деформированного состояния металла при реализации «мягкого» обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок

С точки зрения инженерных подходов применительно к расчету текущих значений толщины кристаллизовавшейся корки  $\delta_{кx}$  непрерывнолитой сортовой заготовки (рис. 1), представляют интерес результаты работы [3] в виде алгоритмической последовательности следующих аналитических выражений:

– определяют время  $\tau_k$  полной кристаллизации заготовки толщиной  $h$ :

$$\tau_k = h^2 / (4K_k^2) \text{ (мин)}, \quad (1)$$

где  $K_k = 20...30$  – коэффициент кристаллизации ( $\text{мм}/\sqrt{\text{мин}}$ );

– с учетом полученной количественной оценки  $\tau_k$  и скорости литья  $V_l$ , общая металлургическая длина  $L_M$ , то есть путь, пройденный данным поперечным сечением непрерывнолитой заготовки от мениска кристаллизатора до её полной кристаллизации, а также текущее значение толщины кристаллизовавшейся корки  $\delta_{кx}$  на расстоянии от мениска кристаллизатора  $L_{Mx}$  равны:

$$L_M = V_{\text{л}} \tau_{\text{к}} (\text{М}); \delta_{\text{кк}} = 0,5hL_{Mx}/L_M (\text{мм}). \quad (2)$$

Учитывая схему конечно-разностного подхода [4], а также наличие симметрии по отношению к вертикальной оси  $y$  осуществим разбиение всего поперечного сечения непрерывнолитой заготовки (см. рис. 1, а) по всей толщине  $h$  на  $n$ -ое количество  $i$ -ых и по половине ширины  $B/2$  на  $m$ -ое количество  $j$ -ых элементарных объемов, при этом шаг данных разбиений  $\Delta h, \Delta b$  и геометрические координаты центров тяжести каждого из элементарных объемов  $y_{ji}, z_{ji}$  соответствуют:

$$\Delta h = h/n; \Delta b = b/(2m); y_{ji} = h/2 - \Delta h(i - 0,5); z_{ji} = b/2 - \Delta b(j - 0,5), \quad (3)$$

где  $y, z$  – вертикальная и горизонтальная геометрические координаты, имеющие свое начало в осевой зоне поперечного сечения непрерывнолитой заготовки (см. рис. 1, а);

$i = 1 \dots n; j = 1 \dots m$  – порядковые номера элементарных объемов, отсчет которых начинается от верхней и правой боковой кромок рассматриваемого поперечного сечения.

С учетом возможности наличия жидкой фазы в осевой зоне непрерывнолитой заготовки и толщин кристаллизовавшихся корок по вертикали  $\delta_{\text{кв}}$  и горизонтали  $\delta_{\text{кз}}$ , определяемых количественно выражениями (1)–(3), а также с учетом известных, согласно результатам работ [1, 5] и других, значений температур горизонтальных  $t_{\text{нв}}$  и вертикальных  $t_{\text{нз}}$  наружных поверхностей текущие по ширине и высоте значения температур металла, имеющие место в рамках каждого элементарного объема, могут быть определены как (см. рис. 1, б):

– распределения температур по оси  $z$ :

$$t_{0zj} = t_0 \text{ при } z_j \leq b/2 - \delta_{\text{кз}} = \delta_{\text{кз}}; \quad (4)$$

$$t_{0zj} = t_0 + (t_{\text{нз}} - t_0) \left[ (z_j - \delta_{\text{кз}}) / (b/2 - \delta_{\text{кз}}) \right]^{a_T} \text{ при } \delta_{\text{кз}} < z_j \leq (b/2); \quad (5)$$

– распределения температур по оси  $y$ :

$$t_{ji} = t_0 \text{ при } z_{ji} \leq \delta_{\text{кз}} \text{ и } |y_{ji}| \leq \delta_{\text{кв}}; \quad (6)$$

$$t_{ji} = t_0 + (t_{\text{нв}} - t_0) \left[ (|y_{ji} - \delta_{\text{кв}}|) \right]^{a_T} \text{ при } z_{ji} \leq \delta_{\text{кз}} \text{ и } \delta_{\text{кв}} < |y_{ji}|; \quad (7)$$

$$t_{ji} = t_{0zj} + (t_{\text{нв}} - t_{0zj}) \left[ (|y_{ji}| / (h/2)) \right]^{a_T} \text{ при } \delta_{\text{кз}} < z_{ji}, \quad (8)$$

где  $t_0, \delta_{\text{кз}} = b/2 - \delta_{\text{кз}}; \delta_{\text{кв}} = h/2 - \delta_{\text{кв}}$  – температура, а также полуширина и полуввысота объема жидкой фазы металла в осевой зоне непрерывнолитой заготовки (см. рис. 1);

$a_T$  – степенной показатель, характеризующий форму эпюр распределения температур по толщине кристаллизовавшихся корок (см. рис. 1, б).

С учетом известных значений температур  $t_{ji}$  могут быть определены и соответствующие значения сопротивления сдвигу  $K_{ji}$  металла непрерывнолитой заготовки в каждой точке её поперечного сечения [4, 6].

С целью непосредственного определения энергосиловых параметров процесса «мягкого» обжатия и используя метод верхней оценки [4, 6], рассмотрим применительно к верхней половине очага деформации кинематически допустимые поля скоростей в физической плоскости (рис. 2, а) и в плоскости годографа скоростей (рис. 2, б).

Проведя оси  $X$  и  $Y$  в физической плоскости и плоскости годографа скоростей, как это показано на рис. 2, а и, задавшись радиусами рабочих валков  $R$ , начальной  $h_0$  и конечной  $h_1$  толщиной непрерывнолитой заготовки, а также величиной её абсолютного обжатия  $\Delta h = h_0 - h_1$  определим геометрические координаты особых точек 1, 2, 3:

$$X_2 = L; Y_2 = h_0/2; Y_3 = 0.0; X_1 = 0.0; Y_1 = h_1/2, \quad (9)$$

где  $L = \sqrt{R\Delta h - (\Delta h^2/4)}$  – общая протяженность очага деформации.

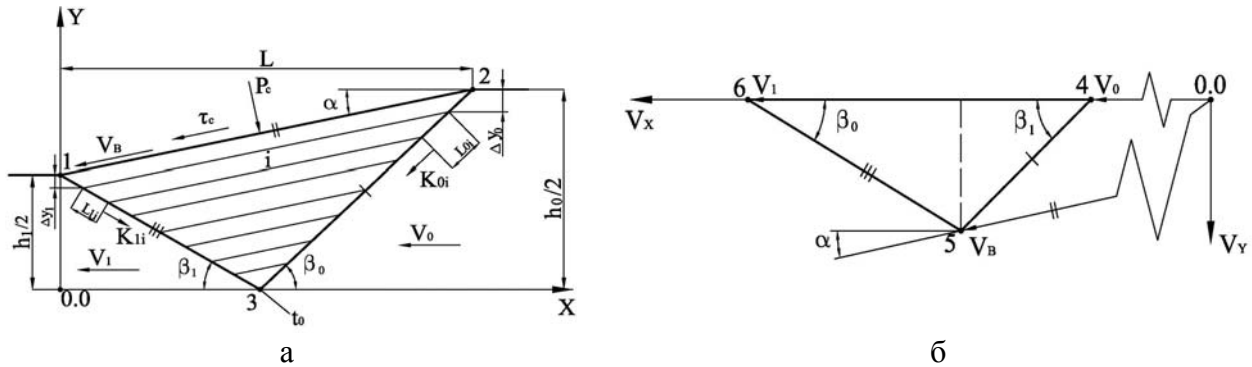


Рис. 2. Кинематически возможные поля скоростей в физической плоскости (а) и в плоскости годографа скоростей (б), при реализации процесса «мягкого» обжатия

Здесь следует отметить, что первоначально геометрическая координата  $X_3$  является неизвестной и будет варьироваться в диапазоне  $0,0 < X_3 < L$ , изменяя тем самым геометрию физической плоскости и значения энергосиловых параметров.

Перенеся угловые характеристики  $\beta_0 = \arctg(Y_1/X_3)$ ;  $\beta_1 = \arctg[Y_2/(X_2 - X_3)]$  на плоскость годографа скоростей (см. рис. 2, б) и, учитывая параллельность линий 23 и 45, 12 и 05, 13 и 56, а также задавшись значением исходной скорости  $V_0$ , определим геометрические координаты особых точек 4 и 6:

$$V_{x4} = V_0; V_{y4} = 0,0; V_{x6} = V_0 h_0/h_1; V_{y6} = 0,0. \quad (10)$$

По отношению к координатам особой точки 5 можно записать:

$$V_{y5} = (V_{x5} - V_{x4}) \operatorname{tg} \beta_0 = (V_{x6} - V_{x5}) \operatorname{tg} \beta_1, \quad (11)$$

откуда в окончательном виде:

$$V_{x5} = ((V_{x6} \operatorname{tg} \beta_1 + V_{x4} \operatorname{tg} \beta_0) / (\operatorname{tg} \beta_0 + \operatorname{tg} \beta_1) - V_{x4}) \operatorname{tg} \beta_0. \quad (12)$$

С учетом известных координат особых точек в физической плоскости и в плоскости годографа скоростей (см. рис. 2) определим мощность формоизменения для каждого отдельного  $j$ -ого элементарного объема непрерывнолитой заготовки (см. рис. 1, а):

$$N_j = \sum_{i=1}^n K_{ji} L_{0i} L_{45} + \sum_{i=1}^n K_{ji} L_{1i} L_{56} = \sum_{i=1}^n K_{ji} L_{0i} \left[ \sqrt{(V_{x5} - V_{x4})^2 + V_{y5}^2} \right] + \sum_{i=1}^n K_{ji} L_{1i} \left[ \sqrt{(V_{x6} - V_{x5})^2 + V_{y5}^2} \right], \quad (13)$$

где  $L_{0i} = h_0/(2n \sin \beta_0)$ ;  $L_{1i} = h_1/(2n \sin \beta_1)$  – шаг разбиения на  $i$ -ые элементарные объемы в сечениях на входе и выходе из очага деформации (см. рис. 1, а; рис. 2, а).

Здесь следует указать на то, что расчет по формуле (16) с варьируемой величиной геометрической координаты  $X_3 = 0,0..L$ , обуславливает наличие массива данных мощностей  $N_j$ , из которого выбирается значение, соответствующее минимуму энергии  $N_{j_{\min}}$ , с учетом которого, следуя методикам работ [4, 6], производили расчет силы  $P$  и суммарного момента  $M$ , имеющих место при реализации процесса «мягкого» обжатия:

$$\tau_{cj} = N_{j_{\min}} \cos \alpha / (LV_e); \quad p_{cj} = \tau_{cj} / \operatorname{tg} \alpha; \quad (14)$$

$$P = 2 \sum_{j=1}^m (\tau_{cj} \operatorname{tg} \alpha + p_{cj} / \cos \alpha) \Delta b; \quad M = PL, \quad (15)$$

где  $p_{cj}$ ,  $\tau_{cj}$  – среднеинтегральные по длине очага деформации значения нормальных и касательных контактных напряжений, соответственно;

$\alpha = \arctg(h_0 - h_1)/(2L)$  – величина угла контакта (см. рис. 2, а);

$V_g = V_{x5} / \cos \alpha$  – протяженность характеристики, отображающей окружную скорость вращения рабочих валков (см. рис. 2, б).

В целом зависимости (1)–(15) в сочетании с методами расчета температур  $t_{ji}$  [1, 2, 5] и сопротивления сдвигу  $K_{ji}$  [4, 6] составили полный алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса «мягкого» обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок. Анализ полученных в этом случае результатов показал на наличие одного глобального минимума суммарной мощности сдвига  $N_{j\min}$ , что подтверждает правомерность использования реализованных в рамках данной работы теоретических решений.

## ВЫВОДЫ

На основе численного конечно-разностного разбиения очага деформации на элементарные объемы, расчета геометрических параметров и температур для каждого из них, а также использования метода верхней оценки разработана инженерная математическая модель энергосиловых параметров процесса «мягкого» обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок, учитывающая возможность наличия жидкой фазы в их осевой зоне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Минаев А. А. Совмещенные металлургические процессы : монография / А. А. Минаев. – Донецк : Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ, 2008. – 552 с.
2. Система технологического проектирования метода «мягкого» обжатия непрерывнолитых блюмов и заготовок в конце затвердевания / А. А. Минаев, Е. Н. Смирнов, А. Н. Смирнов [и др.] // Ресорсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : вид-во СНУ ім. Даля, 2002. – С. 59–66.
3. Машины непрерывного литья заготовок / Л. В. Буланов, Л. Г. Корзулин, Е. П. Парфенов, Н. А. Юровский, В. Ю. Авдонин. – Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2003. – 320 с.
4. 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.
5. Процессы непрерывной разливки : монография / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев [и др.]. – Донецк : ДонНТУ, 2002. – 536 с.
6. Бровман М. Я. Применение теории пластичности в прокатке / М. Я. Бровман. – М. : Металлургия, 1991. – 265 с.

Сатонин А. В. – д-р техн. наук, проф. кафедры АММ ДГМА;

Куберский С. В. – канд. техн. наук, доц. ДГТУ;

Стриченко С. М. – вед. инженер-технолог ОАО «ЕМЗ»;

Жуков П. Л. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ДГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

ОАО «ЕМЗ» – ОАО «Енакиевский металлургический завод», г. Енакиево.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua