

УДК 621.771.23

Руденко Е. А.
Литвиненко Б. С.
Саливан С. В.

СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕДУЦИРОВАНИЯ СЛЯБОВ С МНОГОКРАТНЫМ ОБЖАТИЕМ В КАЛИБРОВАННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВАЛКАХ

Технология редуцирования непрерывнолитых слябов может быть реализована в начале черновой группы клетей широкополосного стана в отдельной вертикальной реверсивной клетки за один-три прохода, или в первой мощной универсальной реверсивной клетки за один-три прохода. В первом случае сляб последовательно обжимается в вертикальных гладких или калиброванных валках, во втором – последовательные обжатию осуществляются во втором и третьем проходах. Расчет силы и момента прокатки по проходам необходим для оценки распределения обжатий и степени загрузки оборудования редуцирующей клетки.

После первого и последующих проходов поперечное сечение сляба отличается от прямоугольного, принимая на прикромочных участках форму калибра или свободных наплывов при прокатке на гладкой бочке.

Процесс редуцирования слябов относится к случаю прокатки сверхвысоких и высоких полос. Силу и момент прокатки в этих случаях для первого прохода в вертикальных валках, когда сляб имеет прямоугольное сечение, можно определить по известным методикам [1–3]. В работе [4] приведена методика расчета силы и момента прокатки во втором и третьем последовательных проходах. Ее недостаток – не точный учет контактной площади в вертикальных валках, а также отсутствие зависимости для определения коэффициента плеча силы прокатки во втором и третьем последовательных проходах.

Целью работы является совершенствование методики расчета силы и момента прокатки в гладких и калиброванных вертикальных валках при редуцировании сляба за несколько последовательных проходов.

Исследование силовых параметров редуцирования слябов за один – три прохода выполнили на лабораторном стане. Масштаб моделирования $m = 1 : 30$, материал – свинец. Моделировали процесс редуцирования слябов шириной $B_0 = 1100, 1500$ и 1900 мм, толщиной $H_0 = 240$ мм в вертикальных валках диаметром $D_0 = 1800$ мм с гладкой бочкой и с тремя ящичными калибрами (табл. 1).

Таблица 1

Размеры ручьев калибров

№ калибра	B_d , мм	B_p , мм	H_p , мм	$\text{tg } \varphi$	φ , град	D_k , мм
1	240	340	150	0,33	20,3	1500
2	240	320	195	0,2	12,6	1410
3	240	300	250	0,1	6,35	1320

В табл. 1 обозначено: B_d – ширина дна ручья; B_p – ширина ручья у разъема; H_p – глубина ручья; φ – угол наклона боковой стенки; $\text{tg } \varphi$ – выпуск.

Скорость прокатки образцов составила 30 мм/с, что соответствует скорости натуре 0,9 м/с. По закону подобия среднее давление при моделировании $p_{ср.м}$ и в натуральных условиях $p_{ср.н}$ должны быть одинаковы:

$$p_{ср.м} = p_{ср.н} \quad (1)$$

Моделирование осуществляли с использованием свинцовых образцов, которые при комнатной температуре моделируют температурные условия горячей прокатки (1180–1200 °С), но имеют низкое значение предела текучести. Поэтому расчетные значения среднего давления перерасчитывают на условие прокатки образцов из стали Ст3кп по формуле:

$$P_{cp.Ст3кп} = K_{mat.} P_{cp.Sn} \quad (2)$$

где $K_{mat.}$ – коэффициент, учитывающий различие предела текучести стали и свинца:

$$K_{mat.} = \frac{\sigma_{m0Ст3кп}}{\sigma_{m0Sn}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{m0Ст3кп}$ – статический предел текучести низкоуглеродистой стали Ст3кп;

σ_{m0Sn} – предел текучести свинца ($\sigma_{m0Sn} = 15 \frac{H}{мм^2}$).

Статический предел текучести стали Ст3кп при $\varepsilon = 0,001$; $u = 10^{-5}$ 1/с:

$$\sigma_{m0Ст3кп}^{69}. \quad (4)$$

При $t = 1200$ °С:

$$\sigma_{m0Ст3кп} = 69 e^{-0,444} = 44,3 \text{ Н/мм}^2.$$

Тогда по (3):

$$K_{mat.} = \frac{44,3}{15} = 2,95.$$

Образцы каждой партии одной ширины обжимали в вертикальных валках по различным режимам: за один, два и три последовательных прохода. В каждом проходе записывали на осциллографе силу P_e и момент M_e прокатки. После каждого обжатия на образцах измеряли толщину на контактной поверхности H_k (прокатка в гладких вертикальных валках) или глубину заполнения ручья калибра $H_{зан}$ (прокатка в калиброванных вертикальных валках).

При моделировании в качестве параметров были приняты: среднее давление p_{cp} (перерасчитанное для стали Ст3кп), Н/мм²; толщина раската на контакте H_k , мм; коэффициент заполнения глубины ручья $K_{зан}$.

Коэффициент заполнения ручья металлом рассчитывали как отношение:

$$K_{зан} = H_{зан} / H_p. \quad (5)$$

В качестве независимых переменных приняли:

- накопленную по проходам относительную деформацию $\sum \Delta B_i / B_0$ ($\sum \Delta B_i$ – сумма обжатий от 1-го до i -го прохода);
- показатель дробности деформации (число последовательных проходов) $\sum \Delta B_i / \Delta B_{cp}$ (ΔB_{cp} – среднее обжатие в i -х проходах);
- фактор формы поперечного сечения сляба B_0 / H_0 ;
- обобщенный показатель калибра $K_{кал}$, учитывающий влияние на среднее давление размеров ручьев и ширины раската.

Обобщенный показатель калибров рассчитывали по формуле [4]:

$$K_{\text{кал}} = \sqrt{\frac{1 + 0,1H_p / (B_p - B_\partial)}{1 - 2H_p / B_{0i}}} \quad (6)$$

Из (6) следует, что при прокатке на гладкой бочке ($H_p = 0$) $K_{\text{кал}} = 1$.

При моделировании отношение B_0/H_0 принимало значения 4,58; 6,25; 7,92. Разовые и суммарные обжатия составляли 2,4 и 6 мм (в натуре 60, 120 и 180 мм).

Значения $K_{\text{кал}}$ изменяли в диапазоне: 1-й (1,17–1,26); 2-й (1,25–1,41); 3-й (1,39–1,61).

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить зависимости для определения геометрических и силовых параметров прокатки.

Сила прокатки определяется по зависимости:

$$P_{vi} = p_{\text{ср.в.}i} \cdot l_{\partial.в.и} \cdot B_{\kappa i}, \quad (7)$$

где $p_{\text{ср.в.}i}$ – среднее давление металла на валки, Н/мм²;

$l_{\partial.в.и} = \sqrt{\Delta B_i D_{\kappa i} / 2}$ – длина очага деформации, мм;

$\Delta B_i, D_{\kappa i}$ – обжатие и катающий диаметр вертикальных валков, мм;

$B_{\kappa i}$ – ширина очага деформации, мм.

Ширина очага деформации при обжатии раската в вертикальных валках с гладкой бочкой равна толщине раската на контакте с валком. Получили следующую зависимость для определения контактной толщины:

$$H_{\kappa i} / B_0 = 0,28821 + 0,334551 \left(\frac{\sum \Delta B_i}{B_0} \right) + 0,00886 \left(\frac{\sum \Delta B_i}{B_{\text{ср}}} \right) - 0,020504 \left(\frac{B_0}{H_0} \right). \quad (8)$$

Ширину очага деформации при обжатии в калиброванных вертикальных валках определяли как горизонтальную проекцию контактной поверхности металла со стенками ручья калибра по формуле:

$$B_{\kappa i} = 2K_{\text{зан}} \cdot H_p \cdot \text{tg } \varphi. \quad (9)$$

Получили следующую зависимость для определения $K_{\text{зан}}$:

$$K_{\text{зан}} = -2,049 + 3,07624 \cdot \left(\frac{\sum \Delta B_i}{B_0} \right) + 0,022 \cdot \left(\frac{\sum \Delta B_i}{B_{\text{ср}}} \right) + 0,12 \cdot \left(\frac{B}{H} \right) + 1,268K_{\text{кал}}. \quad (10)$$

Зависимость для расчета среднего контактного давления имеет вид:

$$p_{\text{ср.в.}i} = 0,231K_t \cdot K_{\text{ст}} \cdot K_{\text{срп}} \cdot K_{\text{кал}} \left(37,1 + 15,8 \frac{\sum_{i=1}^{i=i} \Delta B_i}{B_{01}} + 0,433 \frac{\sum_{i=1}^{i=i} \Delta B_i}{\Delta B_{0i}} - 72,5 \frac{l_{\partial.в.и}}{H_{\text{в.пр.}i-1}} \right), \quad (11)$$

где B_{01} – ширина перед первым проходом;

$K_{\text{ст}} = \sigma_{m_{\text{ст}}} / \sigma_{m_{\text{Ст.Зкп}}}$ – коэффициент, учитывающий химический состав стали;

$\sigma_{m_{\text{ст}}}, \sigma_{m_{\text{Ст.Зкп}}}$ – сопротивление деформации данной стали и стали СтЗкп при заданных условиях прокатки;

$K_{стр}$ – коэффициент, учитывающий плотность металла (для литых слябов в первом проходе выбирают в диапазоне $K_{стр} = 0,8–0,9$, для катаных слябов (или после первого обжатия) $K_{стр} = 1$);

K_t – коэффициент, учитывающий отклонение температуры металла от 1180 °С:

$$K_t = e^{-0,003(t-1180)} \quad (12)$$

Момент прокатки определяется по зависимости:

$$M_{ei} = 2P_{ei} \psi_{ei} l_{\partial vi}, \quad (13)$$

где ψ_{ei} – коэффициент плеча силы прокатки в вертикальных валках.

В результате математической обработки опытных данных получили следующую зависимость для определения ψ_{ei} :

$$\psi = 0,129 + 0,033 \cdot \frac{B_0}{H_0} - 0,0092 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=i} \Delta B_i}{\Delta B_{cp_i}} + 0,026 \cdot \frac{L_{d_i}}{H_0} + 0,178 \cdot K_{кал} \quad (14)$$

ВЫВОДЫ

По результатам физического моделирования процесса редуцирования слябов с многократными последовательными обжатиями в вертикальных валках впервые получены адекватные эмпирические зависимости для определения силы и момента прокатки в гладких и калиброванных вертикальных валках по последовательным проходам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бровман М. Я. Усовершенствование технологии прокатки толстых листов / М. Я. Бровман, Б. Ю. Зеличенко, А. И. Герцев. – М. : Металлургия, 1968. – 256 с.
2. Экспериментальное исследование силовых параметров процесса редуцирования слябов в калиброванных вертикальных валках // Наукові праці ДонДТУ. – Донецьк : ДонДТУ. – 2001. – Вип. № 31. – С. 86–88. – (Серія «Металургія»).
3. Руденко Е. А. Математическая модель формоизменения концов раската в плане при редуцировании в универсальной клетке широкополосного стана / Е. А. Руденко // Наука, производство, предпринимательство – развитию металлургии : сб. научн. тр. – Донецк : Лик, 1998. – С. 43–48.
4. Руденко Е. А. Расчет силовых параметров редуцирования слябов с многократными последовательными обжатиями в вертикальных валках и ширины раската после прокатки в горизонтальных валках / Е. А. Руденко, А. П. Митьев, С. Н. Денисов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : сб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 1 (3). – С. 89–93.

Руденко Е. А. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;

Литвиненко Б. С. – аспирант ДонНТУ;

Саливан С. В. – студент ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: omd@fizmet.dgtu.donetsk.ua