

## ПРОДОЛЬНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ДВУХНИТОЧНОГО РАСКАТА В КОНИЧЕСКИХ ВАЛКАХ

ШУЛЬГИН Г.М., МИНАЕВ А.А., ГУБАЙДУЛИН В.Ф. (ДОНГТУ)

С использованием нового подхода к контактному взаимодействию деформируемого металла с конической поверхностью валков в результате совместного решения уравнений равновесия моментов и проекций сил получены уравнения регрессии для определения предельной толщины перемычки и смятия кромок прямоугольных заготовок двухниточного раската при его продольном разделении в конических валках.

Процесс продольного разделения многониточного раската в конических валках (наклонных калибрах) отличается от разделения в гладких цилиндрических валках различными силовыми условиями контактного взаимодействия металла и валков.

В случае прокатки прямоугольной полосы в конических валках (наклонных калибрах) деформированные частицы металла перемещаются по нормали к поверхности валка и, в связи с несовпадением вектора их перемещения с вектором перемещения поверхности валка, проскальзывают (перемещаются) относительно последней в направлении вершины конусной поверхности.

Полагая, что результирующая поперечная составляющая силы трения пропорциональна разности площадей контакта зон разнонаправленного поперечного перемещения металла, соотношение значений реально действующей результирующей поперечной составляющей силы трения  $T$  и максимально возможной составляющей  $fN$  можно представить в виде коэффициента пропорциональности:

$$K = \frac{T}{fN} = \left( \frac{\Delta b_1}{\Delta b_2} - 1 + 2 \frac{\Delta h}{\Delta b_2} \operatorname{tg} \varphi \right) \left( \frac{\Delta b_1}{\Delta b_2} + 1 \right)^{-1},$$

где  $\Delta b_1$ ,  $\Delta b_2$  — соответственно уширение металла в направлении вершины и основания конусной поверхности, мм;  $\Delta h$  — обжатие по нормали к образующей валка, мм;  $\varphi$  — угол наклона образующей конусной поверхности валка к его оси, °;  $f$  — коэффициент контактного трения.

При захвате двухниточного раската, состоящего из прямоугольных заготовок, соединенных перемычкой по диагонали, коническими валками (рисунок 1) в местах контакта заготовок и поверхности валков возникают нормальные силы  $N_1$  и  $N_2$ . Под действием этих сил создается крутящий момент  $M_{кр}$ , стремящийся повернуть заготовки вокруг их продольной оси:  $M_{кр} = 0,5m(N_1 + N_2)$ , где  $m = B \cos \gamma - A \sin \gamma$  — плечо сил  $N_1$  и  $N_2$ , мм;  $\gamma$  — угол наклона широкой грани прямоугольной заготовки к образующей поверхности валка, °;  $B$  и  $A$  — ширина и высота прямоугольных заготовок двухниточного раската, мм.

Этому повороту способствует момент сил трения  $M_{тр}$  и препятствует момент сопротивления сечения заготовок пластическому скручиванию  $M_{сп}$ :

\* Шульгин Г.М. Продольное разделение многониточного раската в цилиндрических валках // Металл и литье Украины. — 1998. — № 1–2. — С. 33–36

$$M_{\text{тр}} = 0,5n(T_1 + T_2);$$

$$M_w = \tau_s W_p,$$

где  $T_1 = fN_1K$ ;  $T_2 = fN_2K$ ;  $n = B \sin \gamma + A \cos \gamma$ ;  $\tau_s$  — предел текучести при сдвиге, МПа.

Для прямоугольного сечения момент пластического сопротивления заготовки при скручивании:

$$W_p = \frac{1}{6}(3B - A)A^2.$$

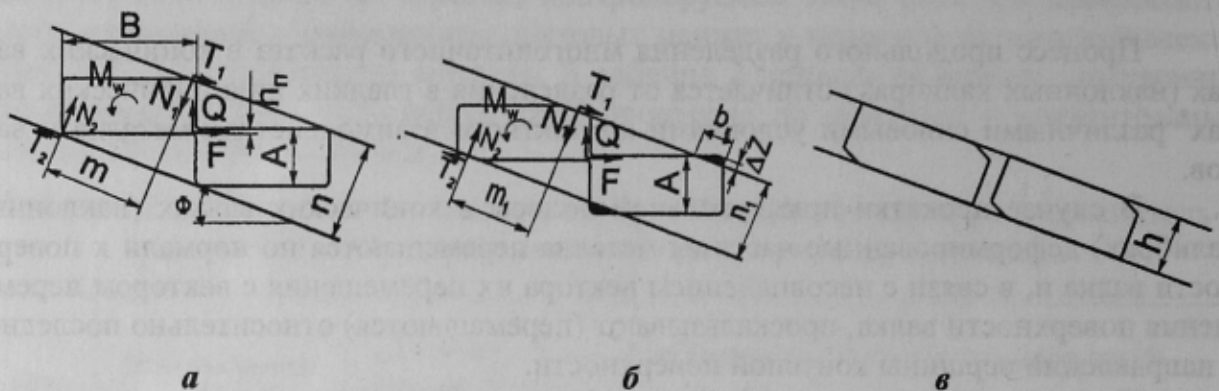


Рисунок 1 – Сечения очага деформации при продольном разделении двухниточного раската в конических валках: *а* — в момент раската валками; *б* — при смятии вершин прямоугольных заготовок; *в* — на выходе из очага деформации

Одновременно под действием крутящего момента  $M_{\text{кр}}$  в зоне перемычки возникают растягивающая сила  $F$  и сдвигающая сила  $Q$ , препятствующие повороту заготовок вокруг продольных осей

$$F = q_n \sigma;$$

$$Q = q_n \tau,$$

где  $q_n = 0,5 h_n l_n$  — срезаемая площадь сечения перемычки,  $\text{мм}^2$ ;  $l_n$  — длина зоны среза перемычки, мм;  $\sigma$  и  $\tau$  — нормальные и касательные напряжения в сечении перемычки, МПа.

По мере прохождения раската в межвалковом зазоре происходит смятие вершин заготовок (рисунок 1, б). При смятии вершин происходит смещение точек приложения сил  $N_1$  и  $N_2$  к центру заготовок и уменьшение плеч  $m$  и  $n$  моментов  $M_{\text{кр}}$  и  $M_{\text{тр}}$  до значений

$$m_1 = m - \frac{4}{3} \Delta Z (\text{ctg} \gamma - \text{tg} \gamma); \quad n_1 = n - 2 \Delta Z,$$

где  $\Delta Z$  — смятие вершины заготовки, мм.

При создании условий, обеспечивающих равенство касательных напряжений в сечении перемычки напряжениям среза ( $\tau_n = \tau_{\text{ср}}$ ), произойдет продольное разделение раската со срезом перемычки.

Для определения параметров двухниточного раската, обеспечивающих его стабильное продольное разделение, решали совместно уравнения равновесия момен-

тов относительно продольной оси заготовки и проекций сил на оси  $OX$  и  $OY$ . Допуская равномерность распределения контактных напряжений на поверхности контакта металла и валков и равенство их пределу текучести ( $p = \sigma_s$ ), приняв отношение  $\frac{\tau_s}{\sigma_s} = \frac{1}{\sqrt{3}}$ , после преобразования получили:

$$\frac{\Delta Z}{A} \sqrt{\frac{R \cdot \Delta Z}{2A^2 \cdot \cos \varphi}} (\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{ctg} \gamma) \left(1 + \frac{C}{D}\right) + \frac{W_p}{D\sqrt{3}} = \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{W_p}{A^3} + \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{h}{A} \sqrt{\frac{R}{A}} \cdot \frac{h}{A} \left[\frac{B}{A} + \left(1 - \frac{\Delta h}{A}\right) K_\gamma\right]}{\frac{m_1}{A} + \frac{Kfn_1}{A}}, \quad (1)$$

где  $\Delta h$  — взаимное смещение заготовок в районе перемычки.

Для обеспечения стабильности процесса разделения величина взаимного смещения заготовок должна превышать толщину перемычки

$$n - h - 2\Delta Z \geq n_n h_n \cos \varphi, \quad (2)$$

где  $h$  — зазор между валками на выходе из очага деформации, мм;  $n_n = h_n / \Delta h = 1 - 1,5$  — коэффициент надежности.

Допустимую величину смятия вершин заготовок находили из условия (2), принимая  $A = h$ :

$$\Delta Z = 0,5 \cdot (n - A - n_n h_n \cos \varphi).$$

Решение нелинейного уравнения (1) относительно  $\frac{h_n}{A}$  и  $\frac{\Delta Z}{A}$  осуществляли численным методом на ПЭВМ типа IBM при различных сочетаниях значений входных факторов процесса разделения  $X_1 = f$ ;  $X_2 = \frac{e}{A}$ ;  $X_3 = \sqrt{\frac{R}{A}}$ ;  $X_4 = \operatorname{tg} \varphi$ ;  $X_5 = n_n$ , определяемых с использованием аппарата математического планирования эксперимента. После обработки результатов расчета методом регрессионного анализа получили следующие уравнения регрессии, действительные при следующих значениях факторов  $f \in (0,3 - 0,5)$ ;  $\frac{B}{A} \in (1,5 - 2,5)$ ;  $\frac{R}{A} \in (10 - 50)$ ;  $\operatorname{tg} \varphi \in 0,15 - 0,55$ ;  $n_n \in (1,0 - 1,5)$ :

$$\begin{aligned} \frac{h_n}{A} = & 0,4084 + 0,3709 \frac{B}{A} + 0,0525 \sqrt{\frac{R}{A}} - 0,9426 n_n - 0,606 f \frac{B}{A} - 0,0056 \frac{B}{A} \sqrt{\frac{R}{A}} + \\ & + 0,2385 f^2 - 0,0578 \left(\frac{B}{A}\right)^2 - 0,0029 \frac{R}{A} + 0,0957 \operatorname{tg}^2 \varphi + 0,3019 n_n^2; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Z}{A} = & 0,3373 - 0,0698 \frac{B}{A} - 0,0448 \sqrt{\frac{R}{A}} + 0,0521 f \frac{B}{A} + 0,0029 \frac{B}{A} \sqrt{\frac{R}{A}} - \\ & - 0,2 f^2 + 0,0028 \frac{R}{A} - 0,0127 \operatorname{tg}^2 \varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

Статистические данные анализа уравнений регрессии (3) и (4) приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Статистические данные анализа уравнений регрессии.

№ п/п	Номер уравнения	Моделируемый параметр	Коэффициент множественной корреляции, $R$	Критерий Фишера, $F$		Остаточная сумма квадратов, $S_{ост.}$
				расч.	табл.	
1	(3)	$h_n/A$	0,997	127,1	2,68	0,000022
2	(4)	$\Delta Z/A$	0,993	56,6	2,44	0,000013

Сравнение экспериментальных значений отношений сторон  $(B/A)_э$ , прямоугольных профилей клиновидного двухниточного раската, соответствующих его разделению при прокатке в конических валках со средним радиусом  $R=100$  мм, с расчетным из преобразованного уравнения (3) отношением сторон  $(B/A)_р$ , показывает их удовлетворительную сходимость. Погрешность расчетных и экспериментальных значений отношений сторон  $B/A$  не превышает — 14,5%.

Анализ влияния входных параметров  $X_1 — X_5$  на моделируемые  $h_n/A$  и  $\Delta Z/A$  осуществляли с использованием графических зависимостей, построенных по уравнениям регрессии (3) и (4) и представленных в нормированном виде. При построении зависимостей значения не анализируемых входных параметров принимали равными среднему значению.

Из анализа графиков следует, что увеличение значений всех входных параметров  $X_1 — X_5$  способствует увеличению предельного значения относительной толщины перемычки и, следовательно, улучшению условий продольного разделения раската.

Наиболее активным фактором, влияющим на предельную толщину перемычки, и, следовательно, определяющим условия продольного разделения двухниточного раската, состоящего из заготовок прямоугольного сечения, является отношение сторон прямоугольных заготовок  $B/A$ . При возрастании соотношения сторон от 1,23 до 2 наблюдается рост максимально возможной толщины перемычки. При дальнейшем увеличении фактора  $B/A$  интенсивность роста предельной относительной толщины перемычки  $h_n/A$  снижается и при значениях  $B/A=2,8$  практически прекращается. Это говорит о достижении предельного значения относительной толщины перемычки  $h_n/A=0,39$ , что более чем на 20% превышает предельную толщину перемычки при продольном разделении двухниточного раската в цилиндрических валках.

Вторым по значимости является параметр  $R/A$ . По мере увеличения относительного радиуса валков увеличивается площадь контактной поверхности, и, следовательно, уменьшается смятие вершин заготовок, что способствует увеличению взаимного смещения прямоугольных заготовок и разделению более толстой перемычки.

Влияние параметров  $X_4=tg\varphi$  и  $X_5=n_n$  на изменение относительной толщины перемычки прямо пропорционально во всем исследуемом диапазоне. Наименьшее влияние на значение относительной толщины перемычки оказывает коэффициент поперечного трения  $f$ .

В результате выполненных исследований разработана математическая модель продольного разделения двухниточного раската, состоящего из прямоугольных заготовок соединенных по диагонали перемычкой, в конических валках и дан анализ влияния основных параметров прокатки на значения предельной толщины перемычки и смятия вершин заготовок.