

МЕХАНИКА ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ДВУТАВРОВ В УНИВЕРСАЛЬНЫХ КАЛИБРАХ

Непряхин С.О., Раджабов З.Н.

Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Ключевые слова: вариационный принцип минимума полной мощности, двутавровый профиль, универсальный калибр, прокатка.

Аннотация. В работе представлена постановка задачи по прокатке двутаврового профиля в универсальном балочном калибре. Основным условием прокатки фасонных профилей является равенство коэффициентов вытяжки по элементам профиля. С целью определения коэффициентов обжатия по элементам профиля, которые бы удовлетворяли данному условию, применили вариационный принцип минимума полной мощности.

MECHANICS OF DOUBLE T-SECTION ROLLING IN UNIVERSAL GROOVES

Nepryakhin S.O., Radzhabov Z.N.

Ural federal university, Ekaterinburg

Keywords: the variational principle of minimum total power, H-beam, universal beam groove, rolling.

Abstract. The paper presents the formulation of the problem of rolling an H-beam in a universal beam groove. The main condition for rolling of shaped section is the equality of the drawing ratio for the profile elements. In order to determine the compression coefficients for the profile elements that would satisfy this condition, we applied the variational principle of the minimum total power.

Для однозначного описания формоизменения металла при прокатке двутавров в универсальном калибре (рис.1) используют следующие безразмерные независимые параметры: коэффициент обжатия шейки $1/\eta_{\text{ш}} = d'/d$; коэффициент обжатия полков двутавра $1/\eta_{\text{ф}} = a'/a$; относительная высота фланцев профиля $\tilde{b} = h_{\text{ф}}/a$; относительная толщина фланцев $\tilde{a} = a/d$; относительное приращение фланцев $\Delta\tilde{h}_{\text{ф}} = \Delta h_{\text{ф}}/d$; приведенный диаметр горизонтальных валков $A_{\Gamma} = R_{\Gamma}/d$; наклон фланцев профиля $tg\varphi$.

Рассматривали случай прокатки двутавра с параллельными гранями полков ($\varphi = \varphi'$) в калибре с одинаковой длиной бочки горизонтальных валков ($l'_{\text{ш}} = l_{\text{ш}}$).

При расчете рациональных режимов обжатий, обеспечивающих высокое качество двутавров, необходимо получить максимально возможную равномерность деформации по шейке и фланцам, что достигается за счет выполнения условия

$$\lambda_{\text{ф}} = (1 + \varepsilon)\lambda_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{ф}}$ и $\lambda_{\text{ш}}$ - коэффициенты вытяжки шейки и фланцев

($\lambda_{\text{ш}} = \omega'_{\text{ш}}/\omega_{\text{ш}}$ и $\lambda_{\text{ф}} = \omega'_{\text{ф}}/\omega_{\text{ф}}$); $\varepsilon = 0,00 \div 0,03$ для увеличения вытяжки фланцев с целью устранения волнистости стенки.

Задачей данной работы является определение таких значений коэффициентов обжатия по фланцу $1/\eta_{\phi} = a'/a$ и шейке $1/\eta_{ш} = d'/d$, при которых обеспечивается выполнение условия (1).

Для решения поставленной задачи использовали вариационный принцип минимума полной мощности [1].

Описание геометрической модели

При постановке задачи двутавровый профиль был разделен на три участка (рис. 1). Участок I соответствует шейке двутаврового профиля. Участки II и III образуют фланец профиля, при рассмотрении данных участков оси z и y были повернуты на угол φ (z', y').

Шейка (участок I) деформируется между двумя горизонтальными валками в условиях плоского деформированного состояния ($l'_{ш} = l_{ш}$), поскольку в соответствии с условием (1) перетекание металла между элементами профиля отсутствует. Уравнение контактной поверхности шейки запишем следующим образом

$$d(x) = d + R_{\Gamma} - \sqrt{R_{\Gamma}^2 - x^2}. \quad (2)$$

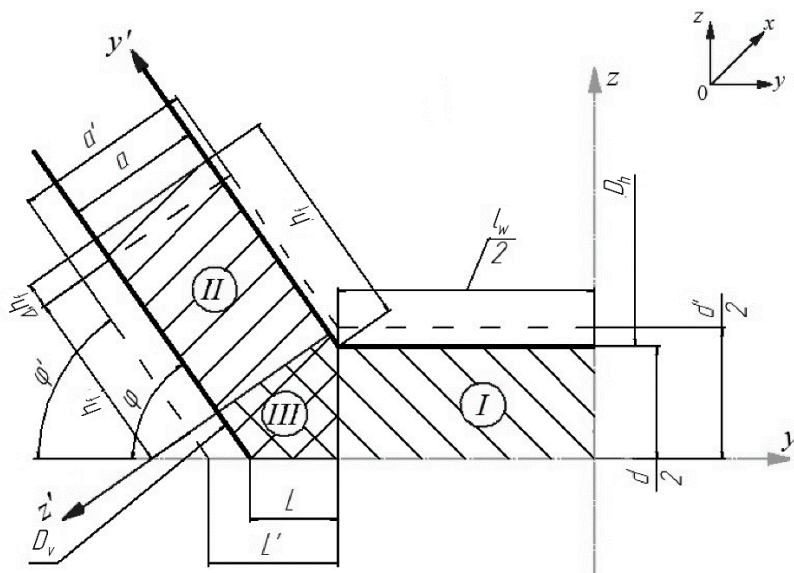


Рис. 1. Схема прокатки двутаврового профиля в универсальном балочном калибре

Участок II фланца деформируется между горизонтальным и неприводным вертикальным валками. Для упрощения поставленной задачи оси z и y были повернуты на угол φ . В итоге рассматриваем деформацию фланца, как прокатку на гладкой бочке валка с постоянным радиусом.

Уравнение контактной поверхности фланца с вертикальным валком запишем в виде

$$a(x) = a' - \Delta h_a + R'_B - \sqrt{R'^2_B - x^2}, \quad (3)$$

где $R'_B = R_B \cdot \sin(\varphi)$.

Функцию, описывающую изменение высоты фланца, представили в виде

$$h_{\phi x} = h'_{\phi} \cdot \sqrt{\beta_{\Pi}^2 - (\beta_{\Pi}^2 - 1) \left(\frac{x^3}{l_{\phi}^3} \right) \left(10 - 15 \frac{x}{l_{\phi}} + 6 \frac{x^2}{l_{\phi}^2} \right)}, \text{ где } - \beta_{\phi} \text{ коэффициент}$$

приращения фланца $\beta_\Phi = 1 + \frac{\Delta h_\Phi}{h'_\Phi}$; l_Φ – длина очага деформации фланца $l_\Phi = \sqrt{2R'_B \cdot \Delta h_a - \Delta h_a^2}$.

Участок III фланца деформируется только вертикальным валком. Уравнение контактной поверхности участка III со стороны вертикального вала описывается уравнением (3).

Кинематически возможное поле скоростей течения металла

При построении кинематически возможного поля скоростей полагали, что все элементы профиля выходят из очага деформации со скоростью V_1 , которую представили в виде:

$$V_1 = v \cdot V_{\text{вг}}, \quad (4)$$

где v – коэффициент опережения по шейке; $V_{\text{вг}}$ – скорость вращения горизонтального вала на участке шейки.

Поле скоростей течения металла для каждого элемента профиля определяли с учетом гипотезы плоских сечений и гипотезы прямых вертикалей. Из условия постоянства секундных объемов имеем:

$$V_{xI} = V_1 \frac{d}{dx}, \quad V_{xII} = V_1 \frac{\omega_\Phi}{\omega_{x\Phi}}, \quad (5)$$

где V_{xI} , V_{xII} – продольные составляющие скорости течения металла для шейки и фланца соответственно; d_x – текущая вдоль оси x высота шейки; $\omega_{x\Phi}$ – текущая вдоль оси x площадь поперечного сечения фланца.

Далее были определены остальные составляющие поля скоростей для каждого участка. Участок I – $V_{yI} = 0, V_{zI} = -z \cdot \frac{\partial V_{xI}}{\partial x}$; участок II –

$$V_{y'II} = - \int_0^y \left(\frac{\partial V_{xII}}{\partial x} + \frac{\partial V_{z'II}}{\partial z'} \right) dy', \quad V_{z'II} = \frac{V_{xII} \cdot x \cdot z'}{a(x) \cdot \sqrt{R_B'^2 - x^2}}; \quad \text{участок III} \quad V_{y'III} = 0,$$

$$V_{z'III} = -z' \cdot dV_{xII}.$$

Геометрическая модель очага деформации и кинематически возможное поле скоростей построены с точность до двух неизвестных величин: коэффициента опережения v , приращения (утяжки) фланца Δh_Φ , которые необходимо определить в результате решения задачи.

После построения поля скоростей перемещений получим поле скоростей деформации, для каждого участка профиля исходя и вычислим для каждого участка интенсивность скоростей деформации сдвига

$$H = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\xi_{xx} - \xi_{yy})^2 + (\xi_{yy} - \xi_{zz})^2 + (\xi_{zz} - \xi_{xx})^2 + 6(\xi_{xy}^2 + \xi_{yz}^2 + \xi_{zx}^2)}. \quad (6)$$

При постановке задачи приняли, что на всей контактной поверхности происходит скольжение металла относительно валков и среднее напряжение трения равно

$$\bar{\tau}_{\text{тр}} = \psi \tau_s,$$

где ψ – показатель трения; τ_s – сопротивление металла на сдвиг.

Напряжения трения в зонах отставания и опережения распределяются неравномерно, причем в зоне отставания они обычно больше, чем в зоне

опережения. Чтобы это учесть, примем гипотезу, согласно которой средние напряжения трения в зонах отставания $\bar{\tau}_{\text{ТР.ОТ}}$ и опережения $\bar{\tau}_{\text{ТР.ОП}}$ распределяются пропорционально средним скоростям скольжения в этих зонах $\bar{V}_{\text{СК.ОТ}}$ и $\bar{V}_{\text{СК.ОП}}$, а в каждой зоне полные напряжения трения постоянны. В соответствии с принятой гипотезой имеем

$$\bar{\tau}_{\text{ТР.ОТ}} = \bar{\tau}_{\text{ТР}} \frac{\bar{V}_{\text{СК.ОТ}}}{\bar{V}_{\text{СК}}}; \quad \bar{\tau}_{\text{ТР.ОП}} = \bar{\tau}_{\text{ТР}} \frac{\bar{V}_{\text{СК.ОП}}}{\bar{V}_{\text{СК}}}. \quad (7)$$

Средние скорости скольжения равны

$$\bar{V}_{\text{СК.ОТ}} = \frac{1}{F_{\text{ОТ}}} \int_{F_{\text{ОТ}}} \bar{V}_{\text{СК}} dF; \quad \bar{V}_{\text{СК.ОП}} = \frac{1}{F_{\text{ОП}}} \int_{F_{\text{ОП}}} \bar{V}_{\text{СК}} dF; \quad \bar{V}_{\text{СК}} = \frac{\bar{V}_{\text{СК.ОП}} \cdot F_{\text{ОП}} + \bar{V}_{\text{СК.ОТ}} \cdot F_{\text{ОТ}}}{F_{\text{ОТ}} + F_{\text{ОП}}}, \quad (8)$$

где $F_{\text{ОП}}$ и $F_{\text{ОТ}}$ - площади контактной поверхности зон отставания и опережения соответственно.

Границей раздела контактной поверхности на зоны отставания и опережения является нейтральная линия, уравнение которой определяется из условия равенства нулю проекций полной скорости скольжения на касательную к окружности вала.

Для участка I (шейка) нейтральная линия представляет собой прямую параллельную оси y , а координату $x_{\text{нш}}$ определяли из уравнения

$$V_{\text{СК.}I}^* = V_{\text{СК.}xI} \cdot \cos \alpha_x + V_{\text{СК.}zI} \cdot \cos \alpha_x = 0. \quad (9)$$

Для получения координаты нейтральной линии на поверхности контакта участка II фланца с горизонтальным валком необходимо решить уравнение

$$V_{\text{СК.}xII} \cdot \cos \alpha_{xy'} + V_{\text{СК.}y'II} \cdot \cos \alpha_{xy'} = 0, \quad (10)$$

где $\alpha_{xy'}$ - текущий центральный угол горизонтального вала на плоскости xy' ; $\sin \alpha_{xy'} = \frac{x}{R_{\text{ГII}}}$, где $R_{\text{ГII}} = R_{\text{Г}} - (y' + \Delta d \sin(\varphi)) \cdot \sin(\varphi)$.

Аналогичный расчет был выполнен для участка III.

По результатам численного решения были получены координаты нейтральной линии, общий вид которой показан на рис.2.

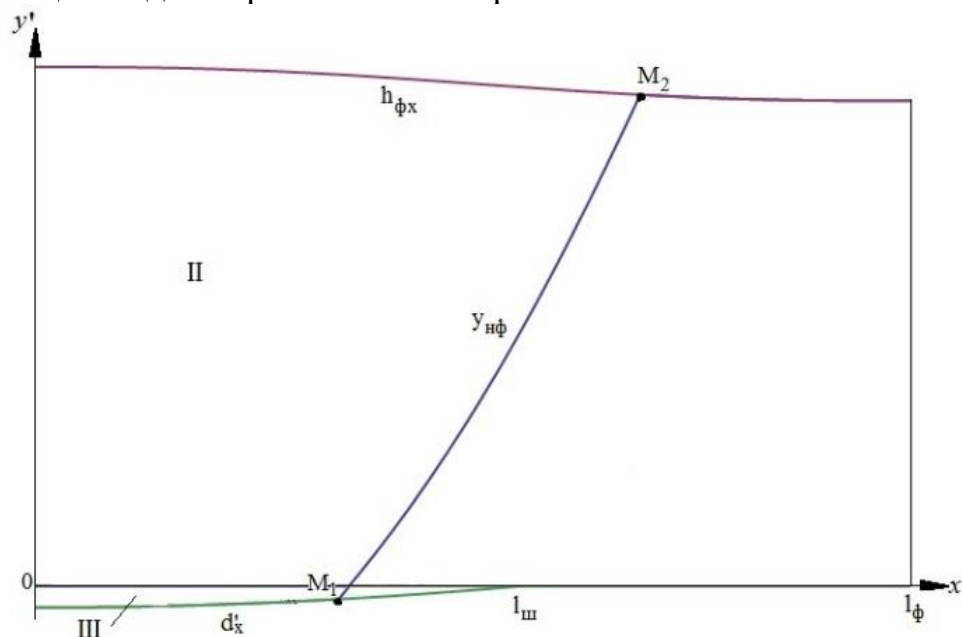


Рис. 2. Нейтральная линия на поверхности контакта фланца с горизонтальным валком

Нейтральная линия на контактной поверхности вертикального вала с фланцем представляет собой прямую параллельную оси y' , координата $x_{нфв}$ которой составляет половину длины очага деформации по фланцу $l_{ф}$, поскольку вертикальные валки являются неприводными.

Для определения неизвестных параметров v и $\Delta h_{ф}$ используем два уравнения:

- вариационное уравнение принципа минимума полной мощности для идеально-пластической среды $\delta(N_{вн} + N_{ср} - N_{ск} - N_{вал}) = 0$; (11)

- уравнение баланса мощности $N_{вн} + N_{ср} - N_{ск} - N_{вал} = 0$. (12)

Составляющие этих уравнений на каждом участке определяем по формулам: мощности внутренних сил $N_{вн} = \int_V \tau_s \cdot H dV$; мощности сил среза

$N_{ср} = \int_{F_{ср}} \tau_s |V_{ср}| dF = \int_{F_{ср}} \tau_s |V^+ - V^-| dF$, где V^+ и V^- - проекции скорости

течения металла на касательную плоскость к поверхности среза $F_{ср}$ соответственно с внутренней и внешней сторон этой поверхности; мощности напряжений трения на скоростях скольжения $N_{ск} = - \int_{F_k} \tau_{ТР} \cdot V_{СК} dF$; мощности, подводимые валками $N_{вал} = - \int_{F_k} \tau_{ТР}^* \cdot V_{ВГ} dF$.

Поскольку напряжения в зонах отставания и опережения разные по величине, то $N_{ск}$ и $N_{вал}$ определяются выражениями:

$$N_{ск} = - \int_{F_{от}} \bar{\tau}_{ТР.от} \cdot V_{СК} dF - \int_{F_{оп}} \bar{\tau}_{ТР.оп} \cdot V_{СК} dF;$$

$$N_{вал} = \int_{F_{от}} \tau_{ТР.от}^* \cdot V_{ВГ} dF + \int_{F_{оп}} \tau_{ТР.оп}^* \cdot V_{ВГ} dF,$$

где $\tau_{ТР.от}^* = -\bar{\tau}_{ТР.от} \frac{V_{СК}^*}{V_{СК}}$; $\tau_{ТР.оп}^* = -\bar{\tau}_{ТР.оп} \frac{V_{СК}^*}{V_{СК}}$.

Систему уравнений (11) и (12) решали численным методом на ЭВМ по специально разработанной методике.

В ходе данной работы, с помощью применения вариационного принципа минимума полной мощности, осуществлена постановка задачи по прокатке двутаврового профиля в универсальном калибре с целью определения рациональных режимов обжатий.

Список литературы

1. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного технического университета, УПИ, 2001. – 836 с.

Сведения об авторах:

Непрыхин Сергей Олегович – к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением», УрФУ, г.Екатеринбург;

Раджабов Зоид Нурудинович – бакалавр кафедры «Обработка металлов давлением», УрФУ, г.Екатеринбург.