

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОЛОСЫ ИЗ ПРУТКА

Доктора техн. наук, профессора ЗДОР Г. Н., ИСАЕВИЧ Л. А.,  
ИВАНИЦКИЙ С. В.

Белорусский национальный технический университет

Современные технологии изготовления приспособлений для лечения ортопедотравматологических больных, например полуколец к аппарату Илизарова (рис. 1), требуют использования заготовок в виде узких полос с заданными геометрическими параметрами и механическими свойствами. Такие заготовки можно получить из горячекатаных листов с последующей разрезкой их на узкие полосы и механической обработкой с закруглением кромок. Вследствие специфики резки на ножницах качество кромок получается низким. Кроме того, горячекатаный лист не обеспечивает требуемых механических свойств. Таким образом, по своим механическим свойствам, особенно по точностным характеристикам и шероховатости поверхности, повышенным требованиям к форме боковых кромок такие полосы целесообразнее получать методом плющения круглого прутка. В настоящем сообщении предпринята попытка разработки теории и технологии формообразования продольной прокаткой в гладких валках из круглого прутка полос, используемых впоследствии в качестве исходных заготовок для гибки в штампах названных выше полуколец.

Однако из-за неравномерности деформации на начальных этапах плющения круглого сечения требуется изучение этого процесса для выбора единичных обжатий, обеспечивающих достижение точности геометрии и размеров формообразуемых полос. При этом необходимо рассчитать величину уширения. Для начала процесса плющения рассмотрим задачу осадки кругового сечения между плоскопараллельными плитами. Учитывая переменную ширину кругового сечения по высоте, нетрудно представить, что вначале деформироваться будут участки сечения, прилегающие к контактным площадкам.

Поэтому до пластического течения участка с наибольшей шириной, когда действующие

в нем напряжения достигнут предела текучести, деформация будет оставаться плоской, так как вытяжка в этом случае отсутствует.

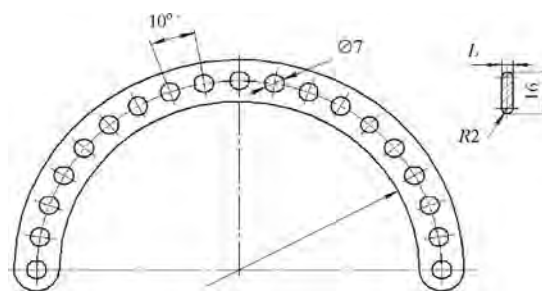


Рис. 1. Полукольцо к аппарату Илизарова

Примем, что в момент начала пластического течения в указанном участке исходное круговое сечение приобретает форму усеченной части эллипса (рис. 2). При этом верхнее и нижнее основания этой части равны площадкам контакта, а малая полуось эллипса – радиусу исходного круга (прутка).

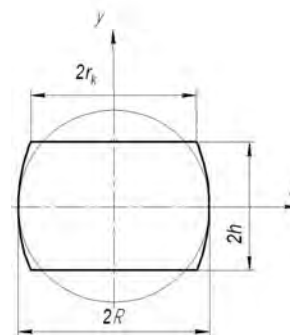


Рис. 2. Изменение свободной поверхности кругового сечения в начальный момент осадки между плоскопараллельными плитами

Тогда уравнение эллипса  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$  в обозначениях, принятых на рис. 2, можно представить как

$$\frac{r_k^2}{R^2} + \frac{h^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

где  $h$  и  $r_k$  – новые переменные;  $b$  – большая (отсутствующая на рисунке) полуось эллипса.

Поскольку при  $y = 0$   $a = R$ , при  $y = h$   $x = r_k$ .

Определим площадь усеченной части эллипса

$$F_{\text{ус.эл}} = 2 \int_{-h}^h x dx = 2R \int_{-h}^h \sqrt{1 - \frac{h^2}{b^2}} dh = 2Rb \left( \arcsin \frac{h}{b} + \frac{h}{b} \sqrt{1 - \frac{h^2}{b^2}} \right).$$

При отсутствии вытяжки эта площадь равна площади исходного кругового сечения, т. е.  $F_{\text{ус.эл}} = F_{\text{кр}}$ . Тогда, решая относительно  $h$ , с учетом выражения (1) получим

$$h = \frac{\pi R}{2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r_k^2}{R^2}}} \arcsin \sqrt{1 - \frac{r_k^2}{R^2}} + \frac{r_k}{b} \right)} \quad (2)$$

Усилие осадки, приходящееся на единицу длины деформируемого прутка, с условием трения по Зибелю [1]

$$P = 2\sigma_T r_k \left( 1 + \frac{f r_k}{2h} \right),$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала прутка;  $f$  – коэффициент контактного трения.

Пластическая деформация на участке круга, имеющего наибольшую ширину, начнется тогда, когда  $P = 2R\sigma_T$ . Отсюда с учетом предыдущего выражения получим

$$h = \frac{f r_k}{2 \left( \frac{R}{r_k} - 1 \right)} \quad (3)$$

Решив совместно численным методом выражения (2) и (3), определим величины  $r_k$  и  $h$ . Расчетные значения этих величин в зависимости от коэффициента контактного трения при поперечной осадке прутка диаметром 10 мм представлены на рис. 3.

Поскольку в этом случае вытяжки прутка еще не происходит, можно определить эквивалентное по площади данному усеченному эллипсу

прямоугольное сечение с заданным значением высоты  $h_0 = 2h$  и шириной  $B_0 = \pi R^2/h_0$  [2]. После этого рассмотрим уширение полосы заданного сечения при прокатке в валках.

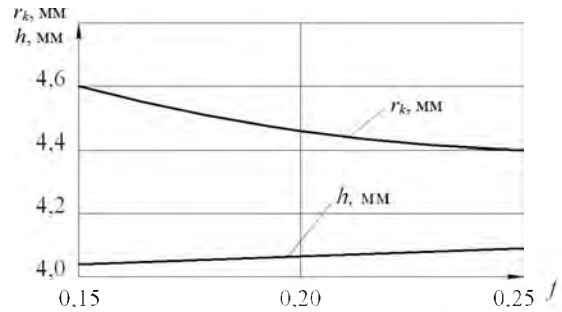


Рис. 3. Зависимость значений  $r_k$  и  $h$  от коэффициента контактного трения

Пусть условно весь объем металла, заключенного в пределах боковой зоны  $ABD$  (рис. 4), будет деформироваться в направлении ширины [2]. Тогда из равенства элементарных смещенных объемов можно записать

$$h_x dx \frac{dB_x}{4} = -1/2 y dx dh_x,$$

откуда найдем

$$dB_x = -2y \frac{dh_x}{h_x} \quad (4)$$

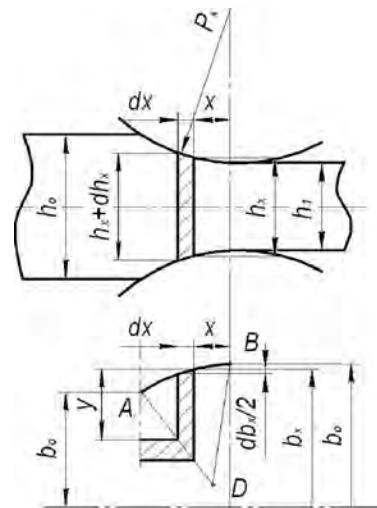


Рис. 4. Условный элементарный объем боковой зоны, смещаемый на уширение

Зависимость между  $y$  и  $h_x$  может быть найдена из условия, что на границах боковой

зоны в пределах зон отставания и опережения средние по высоте подката поперечные напряжения  $\sigma_y$  и средние по высоте продольные напряжения  $\sigma_x$  приблизительно должны быть равны. Каждому изменению  $\sigma_y$  будет соответствовать равное ему на протяжении всей границы зон. Таким образом, если на протяжении всей границы зон  $\sigma_y = \sigma_x$ , то вдоль границы должно выполняться условие  $d\sigma_y = d\sigma_x$ . Приближенно  $d\sigma_x$  можно выразить согласно [2] как

$$d\sigma_x = \frac{2\tau_s \mp \tau_x}{\operatorname{tg}\varphi} \frac{dh_x}{h_x}, \quad (5)$$

где знак «минус» в правой части выражения относится к зоне отставания, а знак «плюс» к зоне опережения.

Аналогично из условия равновесия элемента металл шириной  $dy$  в направлении уширения находим

$$d\sigma_y = \frac{2\tau_y}{h_y} dy, \quad (6)$$

где  $\tau_y$  – контактные касательные напряжения, действующие в поперечном направлении;  $h_y$  – высота сечения прокатываемого металла, которая постоянна при рассмотрении любой точки на границе зон в отличие от  $h_x$ .

Приравняв правые части уравнений (5) и (6), получим

$$dy = \frac{1}{2 \left( \frac{2\tau_s \mp \tau_x}{\tau_y} \mp \frac{\tau_x}{\tau_y \operatorname{tg}\varphi} \right) h_y} \frac{dh_x}{h_x}. \quad (7)$$

Для приближенного решения этого уравнения можно принять  $\tau_x = 2f_x \tau_s$ ,  $\tau_y = 2f_y \tau_s$ .

Кроме того, при определении границ боковой зоны с зонами отставания и опережения дугу захвата принимаем равной хорде [2]. Обозначим  $\operatorname{tg}\varphi = \Delta h/2l$ , где  $l = \sqrt{R\Delta h}$ . После подстановки в (7) можно записать

$$dy = \frac{1}{2 \left( \frac{1}{f_y} \mp \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) h_y} dh_x. \quad (8)$$

Интегрируя это выражение, для зоны отставания получим

$$y = \frac{1}{2 \left( \frac{1}{f_y} \mp \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) h_x + C}. \quad (9)$$

Постоянную интегрирования  $C$  находим из условия, что при  $h_x = h_0$   $y = 0$ . Тогда

$$C = \frac{-1}{2 \left( \frac{1}{f_y} \mp \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) h_0}.$$

С учетом этого выражения (9) принимает вид

$$y = \frac{1}{2 \left( \frac{1}{f_y} \mp \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) (h_x - h_0)}.$$

После подстановки  $y$  в (4) и последующих преобразований получим

$$dB_x = \left( \frac{1}{f_y} \mp \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) \left( h_0 \frac{dh_x}{h_x} - dh_x \right).$$

Найдем ширину полосы в очаге деформации на расстоянии  $x$  от плоскости, проходящей через оси валков, проинтегрировав предыдущее выражение

$$B_x = \left( \frac{1}{f_y} - \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) (h_0 \ln h_x) + C.$$

Постоянную интегрирования  $C$  находим из условия, что при  $h_x = h_0$   $B_x = B$ . Значит, можно записать

$$B_0 = \left( \frac{1}{f_y} - \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) (h_0 \ln h_0 - h_0) + C.$$

Отсюда:

$$C = B_0 - \left( \frac{1}{f_y} - \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) (h_0 \ln h_0 - h_0) + C$$

и

$$B_x = B_0 + \left( \frac{1}{f_y} - \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) h_0 \ln \frac{h_x}{h_0} + h_0 - h_x. \quad (10)$$

Аналогичное решение проведем для зоны опережения

$$y = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{f_y} + \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) h_x + C.$$

Постоянную интегрирования  $C$  найдем из условия, что при  $h_x = h_1$   $y = 0$

$$C = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{f_y} + \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) h_1,$$

откуда:

$$y = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{f_y} + \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) (h_x - h_1)$$

и

$$dB_x = \left( \frac{1}{f_y} + \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) \left( h_1 \frac{dh_x}{h_x} - dh_x \right).$$

Проинтегрировав данное выражение, получим

$$B_x = \left( \frac{1}{f_y} + \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) (h_1 \ln h_x) + C.$$

Постоянную интегрирования  $C$  найдем из условия, что при  $h_x = h$   $B_x = B_n$ .

С учетом этого последнее выражение примет вид

$$B_n = \left( \frac{1}{f_y} + \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) (h_1 \ln h_n - h_n) + C.$$

Отсюда

$$C = B_n - \left( \frac{1}{f_y} + \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) (h_1 \ln h_n - h_n),$$

и окончательно имеем

$$B_x = B_n + \left( \frac{1}{f_y} + \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) \left( h_1 \ln \frac{h_x}{h_n} + h_n - h_x \right). \quad (11)$$

Подставив в выражение (11) вместо  $B_x$  и  $h_x$  величины  $B_1$  и  $h_1$ , получим уравнение для расчета зависимости ширины прокатной из прутка полосы от ее толщины

$$B_1 = B_n + \left( \frac{1}{f_y} + \frac{f_x 2l}{f_y \Delta h} \right) \left( h_1 \ln \frac{h_1}{h_n} + h_n - h_1 \right).$$

На рис. 5 представлены расчетные и экспериментальные зависимости изменения конечной ширины прокатанных из прутка диаметром

10 мм полос от единичных обжатий. Для упрощения расчетов принимали  $f_x = f_y$ . При этом в отсутствие смазки согласно [1]  $f = 0,15$ .

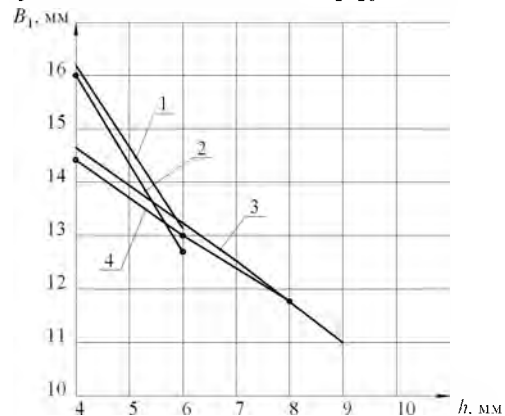


Рис. 5. Зависимость ширины прокатанной из прутка полосы от ее конечной толщины: 1 – расчетные значения; 2 – экспериментальные данные для прутка, прокатанного за два прохода; 3, 4 – соответственно теоретические и экспериментальные данные за три прохода

Эксперименты проводили прокаткой без смазки прутка диаметром 10 мм в гладких валах радиусом 1000 мм. По результатам экспериментов видно, что для получения требуемых размеров поперечного сечения полосы (рис. 1) круглый прутки диаметром 10 мм обжимаются за два прохода. При прокатке прутка за три и четыре прохода снижается величина уширения и не достигается требуемая ширина полосы при заданной ее толщине. За первый проход прутки обжимали до толщины 6,2 мм шириной 12,9 мм, затем за второй проход получали полосу толщиной 4 мм, достигая требуемой ширины 16 мм. Как видно из рис. 5 (кривые 1 и 2), экспериментальные значения несколько ниже расчетных. Это связано с тем, что в расчетах не учитывалось влияние жестких концов на снижение величины уширения [2].

### ВЫВОД

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что технология формообразования узких стальных полос из круглого прутка позволяет без больших сложностей получать прокат с заданными размерами поперечного сечения при правильном выборе единичных обжатий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Громов, Н. П. Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – М.: Металлургия, 1978. – 359 с.