

УДК 621.771.61

Г. Н. ЗДОР, Л. А. ИСАЕВИЧ, С. В. ИВАНИЦКИЙ

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗОГНУТЫХ
НА РЕБРО ПОЛОСОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРОКАТКОЙ ЗАГОТОВОК ИЗ ПРУТКА

Белорусский национальный технический университет

(Поступила в редакцию 02.07.2010)

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 резкой их на узкие полосы и дальнейшей механической обработкой с закруглением кромок. При резке на ножницах качество кромок получается низким. Кроме того, горячекатаный лист не обеспечивает требуемых механических свойств. Для достижения требуемого качества по точности и шероховатости поверхности такие полосы целесообразнее получать методом плющения круглого прутка. В настоящей статье представлены теория и технология формообразования продольной прокаткой в гладких валках из круглого прутка полос, используемых в качестве исходных заготовок для прокатки полуколец.

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

Поэтому до пластического течения металла на участке с наибольшей шириной, когда действующие в нем напряжения достигнут предела текучести, деформация будет оставаться плоской, так как вытяжка в этом случае отсутствует. 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 данной части равны площадкам контакта, а малая полуось эллипса равна радиусу исходного круга (прутка). Тогда уравнение эллипса с обозначениями, принятыми 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.

Определим площадь усеченной части эллипса

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

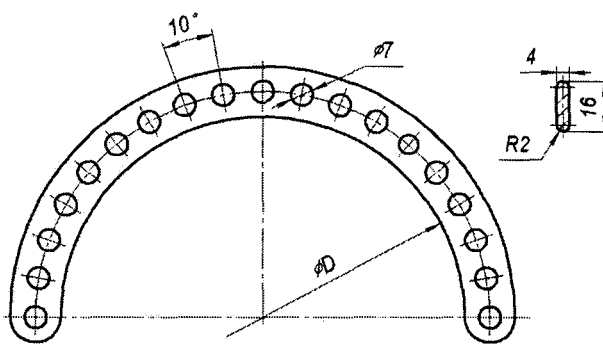


Рис. 1. Полукольцо к аппарату Илизарова

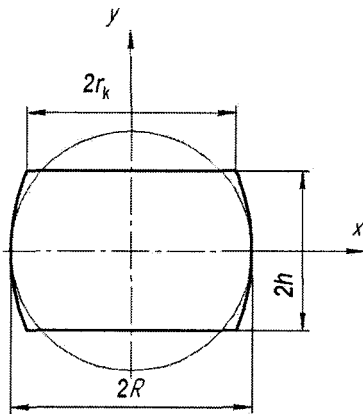


Рис. 2. Изменение свободной поверхности кругового сечения в начальный момент осадки между плоскопараллельными плитами

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

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

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

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

где σ_{τ} – предел текучести материала прутка; f – коэффициент контактного трения.

Пластическая деформация на участке круга, имеющем наибольшую ширину, начнется тогда, когда $P = 2R\sigma_{\tau}$. 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 данных 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]. Затем рассмотрим уширение полосы заданного сечения при прокатке в валках.

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

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

отсюда найдем

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

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 σ_y и средние по высоте продольные напряжения σ_x приблизительно должны быть равны. Каждому изменению σ_y будет соответствовать равное ему изменение на протяжении всей границы зон. Таким образом, если на протяжении зон $\sigma_y = \sigma_x$, то должно выполняться условие $d\sigma_y = d\sigma_x$.

Приближенно $d\sigma_x$ можно выразить, согласно [2]:

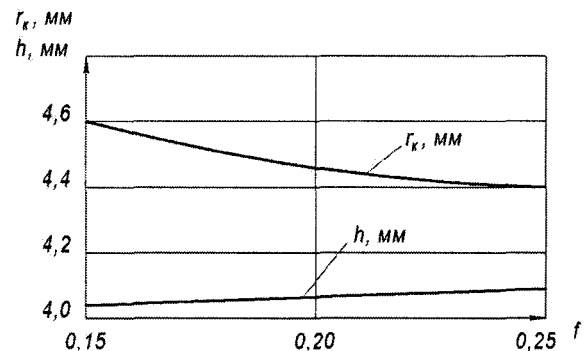


Рис. 3. Зависимость значений r_k и h от коэффициента контактного трения

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

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

Аналогично из условия равновесия элемента металла шириной dy в направлении уширения находим

$$d\sigma_y = (2\tau_y / h_y) dy, \quad (6)$$

где τ_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

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

Для приближенного решения уравнения (7) 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 $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta h}{2l}$, где $l = \sqrt{R\Delta h}$. После их подстановки в (7) можно записать

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

Интегрируя выражение (8), для зоны отставания получаем

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

Постоянную интегрирования C находим из условия $h_x = h_0$:

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

С учетом этого выражение (9) принимает вид

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

После подстановки y в формулу (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 найдем из условия, что при $h_x = h_0$ $B_x = B$. Можно записать

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

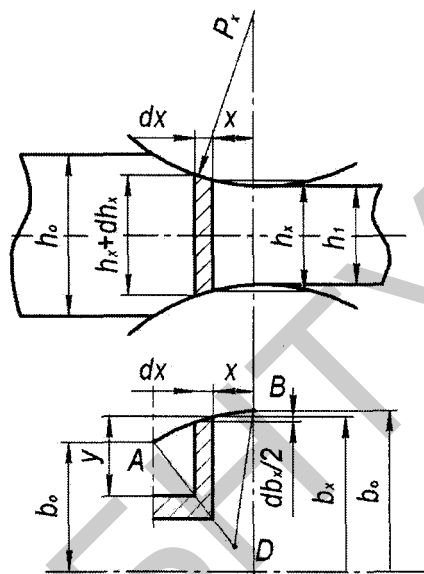


Рис. 4. Условный элементарный объем боковой зоны, смещаемый на уширение

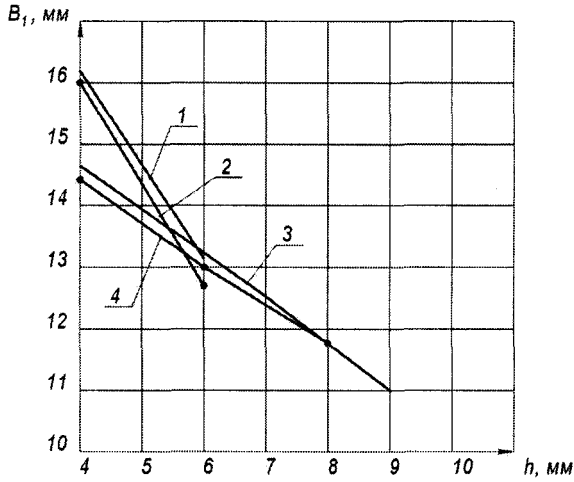


Рис. 5. Зависимость ширины прокатанной из прутка полосы от ее конечной толщины: 1 – расчетные значения, 2 – экспериментальные данные для прутка, прокатанного за 2 прохода, 3, 4 – соответственно теоретические и экспериментальные данные за 3 прохода

и далее

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

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 $h_x = h_n$ $B_x = B_n$. С учетом можно записать

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

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 получим

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

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

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

Расчетные и экспериментальные зависимости изменения конечной ширины прокатанных из прутка диаметром 10 мм полос от единичных обжатий представлены на рис. 5. Для упрощения расчетов принимали $f_x = f_y$. При этом в отсутствие смазки, согласно [1], $f = 0,15$.

Эксперименты проводили прокаткой без смазки прутка диаметром 10 мм в гладких валках радиусом 100 мм. По результатам экспериментов видно, что для получения требуемых размеров

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 далее

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

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

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

поперечного сечения полосы (рис. 5) круглый пруток диаметром 10 мм обжимается за 2 прохода. При прокатке прутка за 3 и 4 прохода снижается величина уширения и не достигается требуемая ширина полосы при заданной ее толщине. За 1-й проход пруток обжимали до толщины 6,2 мм шириной 12,9 мм, затем за 2-й проход получали полосу толщиной 4 мм, достигая требуемой ширины 16 мм. Как видно из графиков 1 и 2 (рис. 5), экспериментальные значения несколько ниже расчетных. Это связано с тем, что в расчетах не учитывалось влияние жестких концов на снижение величины уширения [2].

При деформировании полосы на ребро в валках (рис. 6) путем поперечного изгиба с одновременным перемещением заготовки между валками, имеющими возможность изменения параметра гибки [3], не обеспечивается равная кривизна по всей длине изгибаемой заготовки. В связи с этим интерес представляет процесс прокатки с верхним или нижним давлением [2]. В практике прокатного производства хорошо известно появление изгиба полосы при неравенстве диаметров рабочих валков [4]. Полоса в таких случаях обычно изгибается в сторону валка меньшего диаметра. Изгиб полосы наблюдается также при прокатке в валках одинакового диаметра, но вращающихся с разными окружными скоростями.

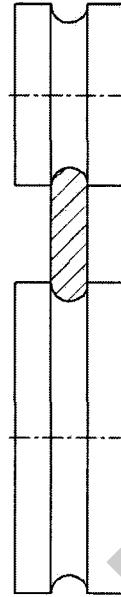


Рис. 6. Схема обжатия полосы в валках на ребро

Рассчитаем радиус изгиба полосы при обжатии в валках. Существует точка зрения, что наряду с фактором разности окружных скоростей валков необходимо принимать во внимание также различие в обжатии полосы валками неодинакового диаметра [4].

Из рассмотрения кинематики процесса прокатки получено соотношение для определения радиуса изгиба срединного слоя полосы [4]:

$$r = \frac{1+k \frac{1+S_2}{1+S_1} h_1}{1-k \frac{1+S_2}{1+S_1} \frac{V_2}{V_1} \frac{h_1}{2}}, \quad (12)$$

где $r = r_2 + \frac{h_1}{2}$; r_2 – внутренний радиус полосы; $k = \frac{V_2}{V_1} < 1$; S_1 и S_2 – величины опережения соответственно на валках радиусом R_1 и R_2 ; h_1 – толщина полосы на выходе из валков; V_1 и V_2 – окружные скорости валков радиусом R_1 и R_2 соответственно.

Таким образом, радиус изгиба полосы как по величине, так и знаку зависит от значений опережений S_1 и S_2 , т. е. в конечном счете от величин нейтральных углов γ_1 и γ_2 , которые определяются совокупностью всех условий прокатки, а не только влиянием отдельных факторов (например, обжатий со стороны каждого вала и их окружных скоростей). Расчет значения r можно произвести по следующей формуле [6]:

$$r = \frac{1+k \left[1 + \left(\frac{R_2}{h_1} - 0,5 \right) \gamma_2^2 \right] \sqrt{\left[1 + \left(\frac{R_1}{h_1} - 0,5 \right) \gamma_1^2 \right]} h_1}{1-k \left[1 + \left(\frac{R_2}{h_1} - 0,5 \right) \gamma_2^2 \right] \sqrt{\left[1 + \left(\frac{R_1}{h_1} - 0,5 \right) \gamma_1^2 \right]} \frac{h_1}{2}}. \quad (13)$$

В случае использования критического рассогласования окружных скоростей валков $\gamma_1 < 1$ и выражение (13) принимает более простой вид [6]:

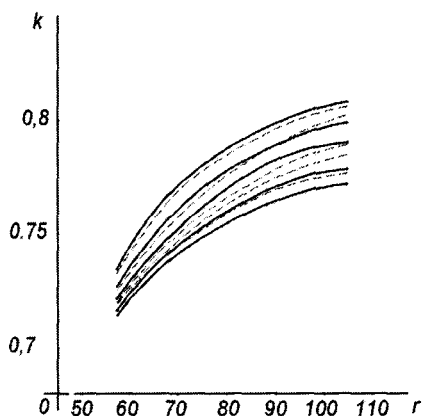


Рис. 7. Зависимость радиуса изгиба полосы от коэффициента критического рассогласования окружных скоростей валков и величины обжатия: сплошная линия – расчетные данные, штриховая линия – экспериментальные данные

$$r = \frac{1 + k_{\text{кр}} \left[1 + \left(\frac{R_2}{h_1} - 0,5 \right) \gamma_2^2 \right] h_1}{1 - k_{\text{кр}} \left[1 + \left(\frac{R_2}{h_1} - 0,5 \right) \gamma_2^2 \right] 2}. \quad (14)$$

Однако следует отметить, что величина коэффициента критического рассогласования окружных скоростей валков в формуле (14) получена из условия равенства объема металла, проходящего через каждое сечение очага деформации в единицу времени, и поэтому не позволяет описать возможный изгиб полосы на выходе из валков. Решая уравнение (14) относительно коэффициента рассогласования окружных скоростей валков, получаем

$$k = \frac{2r - h_1}{(2r + h_1) \left[1 + \left(\frac{R_2}{h_1} - 0,5 \right) \gamma_2^2 \right]}. \quad (15)$$

Уравнение (15) позволяет рассчитать требуемый коэффициент рассогласования окружных скоростей валков по заданному радиусу изгиба полосы и величине ее обжатия. Расчет проводили для полос из нержавеющей стали. Величину обжатия изменяли от 1 до 5 мм. Результаты расчета представлены на рис. 7. Из рисунка видно, что с увеличением требуемого радиуса изгиба полосы растет и коэффициент критического рассогласования окружных скоростей валков, в то же время его значение тем меньше, чем больше величина обжатия полосы.

Для подтверждения полученных расчетных данных были проведены эксперименты по изгибу на ребро полос из нержавеющей стали. Использовали полосы толщиной 4 мм различной ширины (от 17 до 22 мм) и прокатывали на ребро до ширины 16 мм, тем самым обеспечивая разную величину обжатия. Достигали необходимый радиус изгиба полосы, изменяя коэффициент критического рассогласования окружных скоростей валков и величину обжатия. Результаты экспериментов представлены на рис. 7, из которого видно, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются между собой.

Выводы

1. Технология формообразования узких стальных полос из круглого прутка позволяет получать прокат с заданными размерами поперечного сечения при правильном выборе единичных обжатий.

2. При прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков, изменяя величины критического рассогласования окружных скоростей валков и обжатия, можно добиться необходимого радиуса изгиба полосы на ребро по всей ее длине.

Литература

1. Громов Н. П. Теория обработки металлов давлением. М., 1978.
2. Целиков А. И., Никитин Г. С., Рокотян С. Е. Теория продольной прокатки. М., 1980.
3. Лысов М. Н. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. М., 1966.
4. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов. Свердловск, 1960.
5. Степаненко А. В., Король В. А., Смирнова Л. А. Прокатка полос переменного профиля. Гомель, 2001.
6. Исаевич Л. А., Сидоренко М. И., Иваницкий С. В. // Вестн. БНТУ. Мн., 2003. № 4. С. 20–23.

G. N. ZDOR, L. A. ISAYEVICH, S. V. IVANITSKI

PARTICULARITIES OF MANUFACTURE OF STRIP PRODUCTS BENT TO EDGE BY ROLLING OF BAR BILLETS

Summary

A theory and technology for forming of strips from round bar by lengthwise rolling in flat rollers, which are further used as blanks for bending in rollers with given radius to obtain half-rings for Ilizarov's device, are described.