

УДК 321.771.61

Л.А. ИСАЕВИЧ, д-р техн. наук,
В.А. КОРОЛЬ, д-р техн. наук,
Д.М. ИВАНИЦКИЙ, канд. техн. наук,
С.В. ИВАНИЦКИЙ (БНТУ)

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗКИХ ПОЛОСОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ КРУГЛОГО ПРОФИЛЯ

В настоящее время значительно возросла потребность строительной отрасли Республики Беларусь в негостированных стальных полосах, используемых, в частности, для изготовления оконной фурнитуры (поворотно-откидные устройства).

Поворотно-откидные устройства (ПОУ) в окнах с деревянными рамами предназначены для плотного примыкания окна в их коробке по всему периметру в закрытом состоянии и возможности открывания створок с их поворотом вокруг горизонтальной и вертикальной осей.

Для обеспечения этого условия в конструкции ПОУ используются полосовые заготовки из стали 10 сечением 2,5×16 мм и 3×10 мм (рисунок 1) с высокими требованиями по точности размерам профиля, прямолинейности и шероховатости их поверхности. Кроме того механические свойства полос должны соответствовать $\sigma_a \geq 500$ МПа, при пластической характеристике $\delta \geq 0,2$.

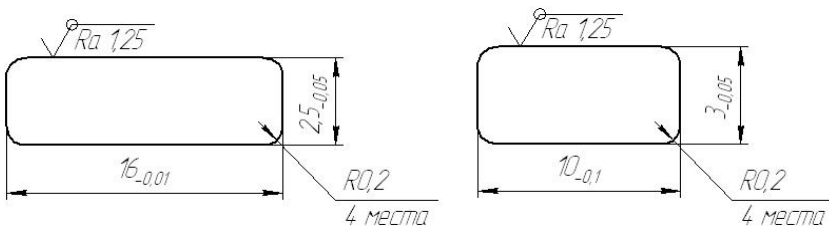


Рисунок 1 – Профили сечений стальных полос для ПОУ

Изготовление таких поворотных-откидных устройств в Республике Беларусь ограничено в связи с отсутствием собственного и в странах СНГ производства стальных узких полос по европейским стандартам, а также недостатком валютных средств для их закупок за рубежом, в основном это изделие немецкой фирмы РОТО ФРАНК.

По маркетинговым исследованиям потребность ПОУ в Республике Беларусь составляет около 900 000 устройств в 2010 г. и будет возрастать в дальнейшем (до 1 000 000 устройств). С учетом экспорта в Россию и на Украину общая потребность в ПОУ определяется в объеме 1 200 000 комплектов в 2011 г.

Предварительные экспериментальные исследования показали, что получение таких полос с повышенными требованиями к точности профиля и шероховатости поверхности, а также высокими механическими свойствами возможно холодной прокаткой из круглого прутка.

В то же время формообразование пластическим деформированием прокаткой изделий и полуфабрикатов в виде узких полос из пруткового материала является достаточно сложным процессом из-за большой неравномерности деформации по ширине. Это обуславливает трудности в достижении высокой размерной точности по толщине и ширине формообразуемых профилей и связано, в первую очередь, с необходимостью использования многократной прокатки с нерегламентированным уширением металла при различных значениях его обжатия.

В настоящее время в практике прокатки прямоугольных полос применяются два принципиально отличных способа.

1. В ступенчатых валках со свободным уширением (рисунок 2). Из недостатков данного способа следует отметить скругление и неровности боковых кромок полосы. Поэтому после каждого прохода в гладких валках следует пропуск в ребровом калибре (рисунок 3), где боковым граням придается правильная форма. Вместе с тем в ребровом калибре обеспечивается получение точных размеров полосы по ширине и необходимая шероховатость поверхности кромок. Обжатие в ребровом калибре, как правило, составляет 5–15 %. После ребрового калибра иногда используют последний проход с минимальным обжатием по толщине.

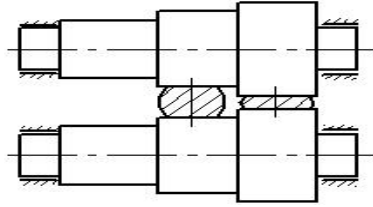


Рисунок 2 – Схема прокатки в ступенчатых валках

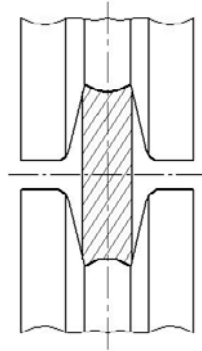


Рисунок 3 – Схема прокатки в ребровом калибре

2. Способ прокатки в закрытых калибрах со стесненным уширением (рисунок 4) применяется чаще для получения тонких полос, так как их прокатка в ступенчатых валках затруднена из-за поперечного изгиба полосы в ребровом калибре. Закрытые калибры делают с закруглением или притуплением, что предохраняет от образования заусенцев при последующей прокатке. При прокатке в закрытых калибрах увеличивается парк валков, поскольку каждой ширине полосы необходим отдельный комплект валков.

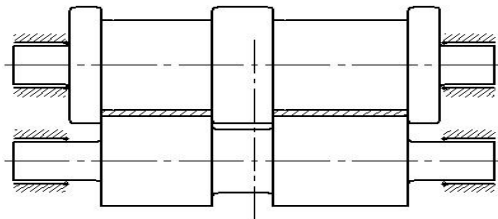


Рисунок 4 – Схема прокатки в закрытых калибрах

При прокатке полос из круглых прутков в замкнутых калибрах необходимо точно установить величину уширения при каждом проходе с целью исключения незаполнения прокатных ручьев, что неизбежно приводит к браку. В процессе прокатки смещаемый объем металла по высоте деформируемого тела увеличивает преимущественно продольные размеры полосы. Но наряду с этим в той или иной мере наблюдается изменение размеров в направлении ширины полосы, т.е. имеет место поперечная деформация. Более определенно поперечную деформацию характеризуют относительное уширение и коэффициент поперечной деформации.

Для практических целей существенное значение имеет предварительное определение величины уширения, поскольку она, как правило, предварительно не задана. Однако в настоящее время нет надежных методик, которые могли бы математически связать факторы, влияющие на величину поперечной деформации при прокатке.

Установлено [1, 2], что на величину и характер развития уширения при прокатке влияет множество факторов процесса. К ним относятся: величина обжатия, распределение обжатий по пропускам и дробность деформации, форма очага деформации, т.е. соотношение между шириной и длиной области деформации, наличие жестких концов, диаметр валков, геометрия полосы, коэффициент трения, наличие подпора или переднего и заднего натяжения.

Рассматривая прокатку прямоугольной полосы в гладких валках, необходимо заметить, что прокатываемый металл в очаге деформации при этом находится в условиях неравномерного трехосного сжатия [3]. Подобная схема главных напряжений является приближенной, отражающей наиболее характерную для всего деформируемого объема тела схему напряженного состояния, поскольку не учитывается возможная неравномерность распределения напряжений в очаге деформации.

Принимая во внимание, что изменение условий прокатки ведет к перераспределению соотношений между главными напряжениями,

а, следовательно, и к изменению соотношений главных деформаций, становится целесообразным изучить влияние тех или иных факторов процесса на эти изменения. Только при правильном выявлении характера изменений напряженного состояния, а точнее – изменения соотношений между главными напряжениями, можно быть уверенным в надежности определения качественной картины развития поперечной деформации.

Наиболее важным показателем, определяющим величину относительного и абсолютного уширения является обжатие. Для практических расчетов величины уширения используется простая и достаточно точная зависимость Жеза [2], который в первом приближении принял

$$b - \hat{A} = a(\hat{I} - h), \quad (1)$$

где b – конечная ширина полосы; \hat{A} – исходная ширина; \hat{I} – начальная толщина; h – конечная толщина; a – коэффициент уширения, рекомендованный Жезом в пределах от 0,35 до 0,48.

Это выражение определяет зависимость абсолютного уширения от величины обжатия и вытяжки в данном пропуске. При этом имеет место обратная связь между вытяжкой и уширением, т.е. увеличение вытяжки влечет за собой падение уширения и наоборот.

Теоретическими исследованиями и экспериментально установлено, что на уширение заметное влияние оказывает дробность деформации, диаметр валков, ширина полосы и контактное трение [2], при этом влияние данных факторов, как было сказано выше, связано с изменением соотношений между главными напряжениями в очаге деформации.

Так, при дробной деформации вследствие уменьшения длины области деформации, оцениваемой хордой $l = \sqrt{(H-h)\frac{D}{2}}$, где D – диаметр валков, объемное напряженное состояние будет характеризоваться уменьшением продольных напряжений по отношению к поперечным, а это приведет к уменьшению уширения.

Аналогично, диаметр валков и ширина полосы оказывают существенное влияние на соотношение между продольными и поперечными напряжениями, и как следствие, на величину уширения.

Анализируя влияние условий прокатки на характер поперечной деформации, остановимся на практических способах ее определения. Выше уже отмечалось, что простейшей зависимостью, определяющей величину уширения, является формула Жеза. Именно эта формула чаще всего используется в практических расчетах. При этом необходимо знать коэффициент a для рассматриваемых условий прокатки. Однако формула Жеза не в достаточной мере учитывает изменение условий прокатки, поэтому для определения уширения были предложены более совершенные формулы, учитывающие, кроме величины обжатия, другие параметры процесса. В технической литературе известно более 40 формул для определения уширения.

По данным ряда исследователей, удовлетворительные результаты по расчету уширения при прокатке прямоугольных полос в цилиндрических валках дает формула Б.П. Бахтинова

$$\Delta B = 1,15 \frac{H-h}{2H} \left(\sqrt{(H-h) \frac{D}{2} - \frac{H-h}{2f}} \right), \quad (2)$$

где f – коэффициент контактного трения.

Подсчет уширения по имеющимся формулам дает более или менее удовлетворительные результаты только для прокатки в гладких валках со свободным уширением. При прокатке по другим схемам поперечную деформацию определить с достаточной точностью очень сложно. Она резко отличается по характеру и по величине для различных участков сечения полосы. Поэтому обычные формулы для определения уширения в этих условиях дают весьма приближенные значения.

Учитывая вышеописанные сложности получения узких полос из круглых прутков, для подтверждения теоретических расчетов о влиянии условий прокатки на характер деформации проведены экспериментальные исследования. В качестве заготовок для исследования применяли круглые прутки от 6 до 10 мм различной длины из стали 10.

Прокатку вели в открытых, закрытых симметричных и ребровых калибрах. Тип прокатного ручья оказывает первостепенное влияние на состояние кромок полосы. Так, например, при прокатке в открытом калибре наблюдалась волнистость и скругленность кромок полосы, в закрытом симметричном – заусенец, а в закрытом ассиметричном – закручивание полосы в виде «пропеллера». По результатам экспериментов для получения стальных полос сечением 3×10 мм и $2,5 \times 16$ мм принято решение использовать комбинированную прокатку, т.е. чередовать плющение заготовки в открытых и закрытых ручьях с калибровкой кромок в ребровых калибрах.

При этом важно было установить диаметры исходных заготовок. Оптимальные диаметры заготовки для получения полосы 3×10 мм – 8 мм и полосы $2,5 \times 16$ мм – 10 мм. При увеличении диаметров заготовки выше оптимальных размеров наблюдается появление заусенца, а в случае их уменьшения образуется чернота на боковых кромках из-за незаполнения калибра. На основании анализа проведенных исследований была выбрана схема прокатки (рисунок 5). Она включает обжатие в ступенчатых валках со свободным уширением и в ребровых калибрах с целью придания боковым граням требуемой формы, заданной шероховатости и обеспечения точности размеров по ширине полосы. Согласно схеме для получения полосы из круглого прутка вначале требуется произвести операцию плющения. В связи с большой неравномерностью деформации на начальном этапе плющения круглого сечения потребовалось тщательное изучение этого процесса для правильного выбора единичных обжатий, обеспечивающих достижение требуемой размерной точности формообразуемых полос.

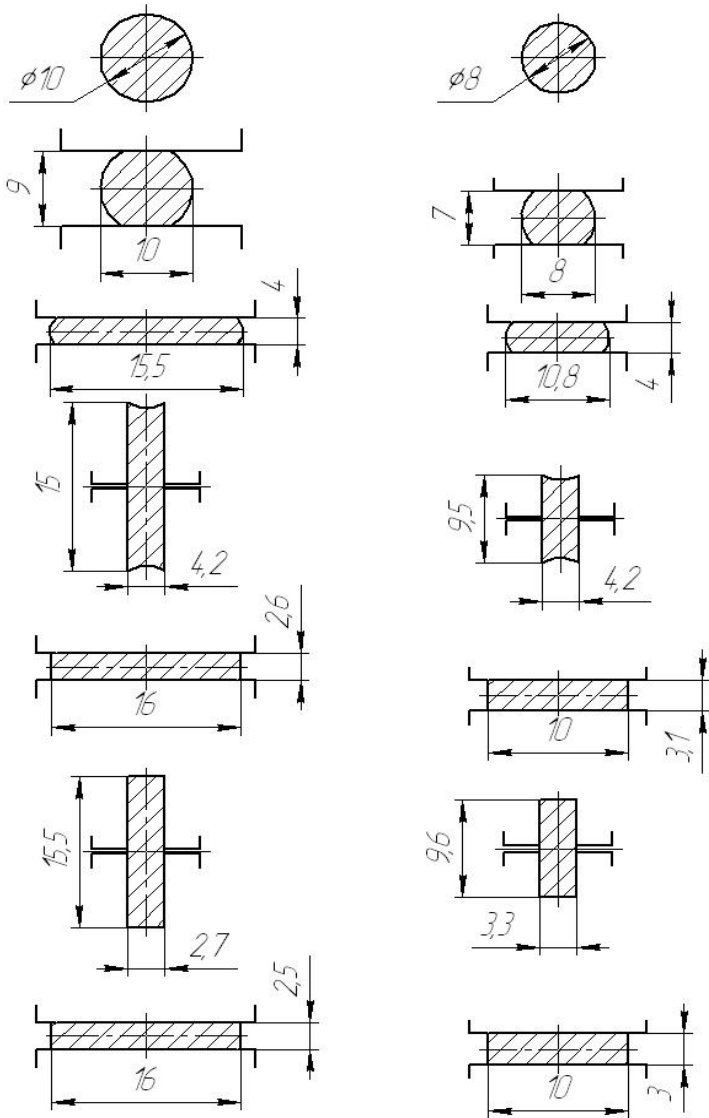


Рисунок 5 – Схема прокатки полос сечением 2,5×16 мм и 3×10 мм

Вначале рассмотрим задачу осадки кругового сечения между плоско-параллельными плитами. Учитывая переменную ширину

кругового сечения по высоте, нетрудно представить, что вначале деформироваться будут участки сечения, прилегающие к контактным площадкам. Поэтому до начала пластического течения участка с наибольшей шириной, когда действующие в нем напряжения достигнут предела текучести, деформация будет оставаться плоской, поскольку вытяжка в этом случае будет отсутствовать. Примем, что в момент начала пластического течения в указанном участке исходное круговое сечение приобретает форму усеченной части эллипса (рисунок 6). При этом верхнее и нижнее основания этой части равны площадкам контакта, а малая полуось эллипса равна радиусу круга. Тогда уравнение эллипса $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ можно представить в новых переменных как

$$\frac{r_k^2}{R^2} + \frac{h^2}{b^2} = 1, \quad (3)$$

поскольку при $y = 0$ $a = R$, при $y = h$ $x = r_k$, где h и r_k – новые переменные.

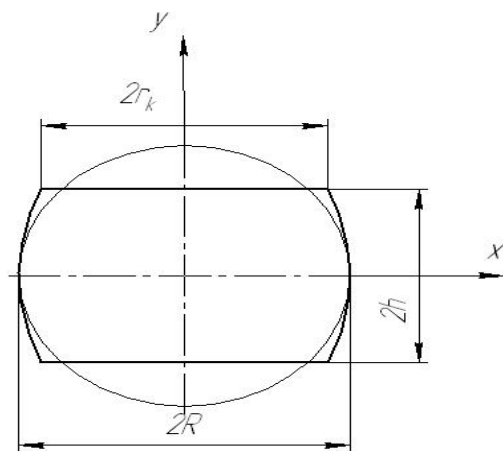


Рисунок 6 – Изменение свободной поверхности круглого сечения в начальный момент осадки между плоско-параллельными плитами

Определим площадь усеченной части эллипса

$$F_{\delta\bar{n},y\bar{e}} = 2 \int_{-h}^h x dx = 2R \int_{-h}^h \sqrt{1 - \frac{h^2}{b^2}} dh = 2Rb \left(\arcsin \frac{h}{b} + \frac{h}{b} \sqrt{1 - \frac{h^2}{b^2}} \right).$$

При отсутствии вытяжки эта площадь равна площади круга исходного прутка, т.е. $F_{\delta\bar{n},y\bar{e}} = F_{\delta\bar{o}}$. Тогда с учетом выражения (3) получим

$$h = \frac{\pi R}{2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r_k^2}{R^2}}} \arcsin \sqrt{1 - \frac{r_k^2}{R^2}} + \frac{r_k}{R} \right)}. \quad (4)$$

Усилие осадки, приходящееся на единицу длины деформируемого прутка, с условием трения по Амонтону [3] запишется в виде

$$P = \sigma_{\delta} \frac{2h}{f} \left[\exp\left(\frac{fr_k}{h}\right) - 1 \right].$$

Пластическая деформация на участке круга, имеющем наибольшую ширину, начнется тогда, когда $P = 2R\sigma_{\delta}$. Отсюда

$$\frac{h}{fR} \left[\exp\left(\frac{fr_k}{h}\right) - 1 \right] = 1. \quad (5)$$

Совместное решение уравнений (4) и (5) численным методом позволяет определить значения r_k и h . Расчетные значения этих величин в зависимости от коэффициента контактного трения при поперечной осадке прутка диаметром 10 мм представлены на рисунке 7. Из графиков видно, что с уменьшением коэффициента контактного трения толщина h падает, а ширина контактной площадки r_k возрастает, что вполне логично.

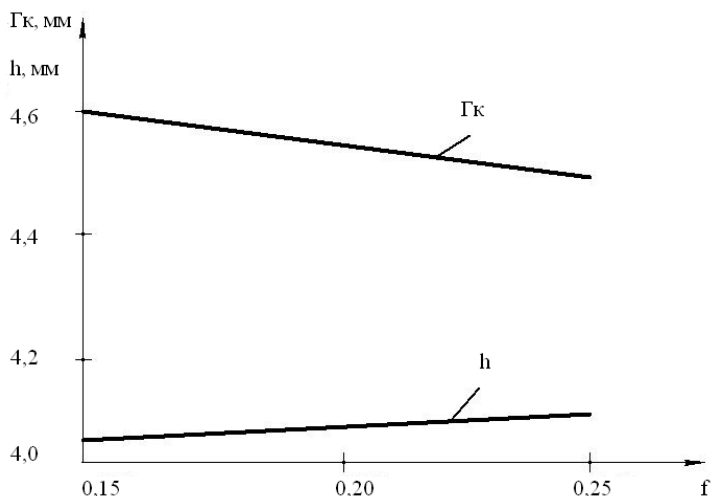


Рисунок 7 – Изменение значений r_k и h от коэффициента контактного трения

Наряду с определением параметров плющения прутков возникает проблема захвата заготовки валками. Так как первоначальный угол захвата исходной прутковой заготовки рабочими валками чаще больше угла трения, то для захвата металла валками необходимо такое значение внешней заталкивающей силы, которое обеспечило бы деформацию начального участка прутка до размеров, соответствующих углу захвата, равному углу трения.

В экспериментах эта проблема решалась механической заправкой конца прутка. В производственных условиях, особенно в крупносерийном производстве, такое решение неприемлемо. Поэтому была разработана схема загрузочного устройства для принудительного заталкивания круглого прутка в валки. Для обеспечения требуемого заталкивающего усилия можно использовать известные технические решения, применяемые в пружинном производстве, в частности, в автоматах для навивки пружин [4]. Для этого используют одну или несколько пар приводных роликов с нарезанными профилированными канавками. Радиус профиля канавки принимают, как правило, в 1,5 раза больше радиуса подаваемой проволоки. Наиболее рациональной схемой подачи прутка принята схема с одной парой приводных подающих роликов диаметром 150 мм.

Появляющуюся серповидность полос после прокатки устраняли последующей правкой на правильном устройстве. Применение правильного устройства позволяет не только устранить серповидность, но и снимает остаточные напряжения после прокатки.

Были проведены исследования механических свойств материала заготовки до и после прокатки. Замечено значительное повышение прочностных характеристик вследствие нагартовки металла при прокатке. Так, предел прочности при растяжении после прокатки достигал 550 МПа, тогда как его величина в состоянии поставки не превышала 400 МПа.

Таким образом, результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований подтвердили возможность получения стальных полос 3×10 мм и $2,5 \times 16$ мм из пруткового материала, широко применяемых в настоящее время при изготовлении поворотных откидных устройств.

Литература

1. Целиков, А.И. Теория продольной прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 380 с.

2. Суворов, И.К. Обработка металлов давлением / И.К. Суворов. – М.: Высшая школа, 1980. – 364 с.

3. Громов, Н.П. Теория обработки металлов давлением / Н.П. Громов. – М.: Металлургия, 1978. – 360 с.

4. Навроцкий, Г.А. Навивка пружин на автоматах / Г.А. Навроцкий, Е.Г. Белков. – М.: Машиностроение, 1978. – 148 с.

УДК 621.70

Л.А. ИСАЕВИЧ, д-р техн. наук (БНТУ)

МЕХАНИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ДЕФОРМАЦИЙ

Для анализа процессов деформирования при обработке металлов давлением С.И. Губкиным [1, 2] было введено понятие механиче-