

В.И.Биба, В.А.Олейник

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ КРУГЛЫХ ПРОФИЛЕЙ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Целью работы является разработка методики калибровки валков, обеспечивающей достижение высокой точности размеров горячекатаного проката при прокатке в чистовых калибрах. Изложен универсальный метод расчета и построения круглых двух- и трехвалковых калибров с выпусками различной формы с учетом допускаемых отклонений по диаметру проката любого класса точности. Применение калибров, рассчитанных по данной методике, обеспечивает получение круглых профилей с заданной точностью, способствует предотвращению образованию лампасов и «уса», обеспечивает устойчивую работу клетей.

прокатка, калибровка валков, чистовой калибр, методика, круглый профиль, заданная точность

Современное состояние вопроса. Точность размеров сечения горячекатаного проката является одним из главных показателей качества и, наряду с прочностными и структурными характеристиками металла, определяет качество и конкурентоспособность горячекатаного проката. Для проката, используемого по прямому назначению, к числу которого можно отнести арматурный прокат, уголки, швеллеры, балки, рельсы и ряд других профилей, повышение точности прокатки позволяет производить прокат в минусовом поле допуска и экономить металл за счет снижения веса погонного метра профиля. В настоящее время в связи с удорожанием энергоносителей особенно актуальным стало повышение точности проката, предназначенного для дальнейшего передела. Использование точного проката для переработки волочением, калибровкой, высадкой, резанием в сочетании с промежуточными дробными размерами, как это предусмотрено во многих зарубежных стандартах DIN 59 115, ISO 1035/1, EN 10060 и др. с допускаемыми отклонениями до $\pm 0,15$ мм, позволяет подобрать горячекатаный прокат с размерами близкими к размерам калиброванного или обточенного проката и, благодаря этому, снизить затраты на передел за счет уменьшения обжатий при калибровке и волочении или за счет уменьшения сбега металла при обработке резанием. В ряде случаев, где не требуется очень высокая точность размеров, например, при производстве цепей, тяг, клемм, крупных пружин и ряд других изделий, горячекатаный прокат высокой точности может использоваться вместо калиброванного, исключая дорогостоящий передел.

Возможность использовать высокоточный горячекатаный прокат взамен калиброванного в ряде случаев является единственным выходом из создавшегося положения и этому есть конкретные примеры. Так, в конце 90-х годов, когда калибровочный цех Константиновского металлургического завода, являвшийся основным поставщиком калиброванного проката для изготовления метизов различного назначения, был выведен из эксплуатации, возникшая проблема поставок калиброванного проката была решена за счет производст-

ва высокоточного горячекатаного проката. С конкретными запросами о возможности замены калиброванного круглого проката точным горячекатаным прокатом обратились: Луганский завод коленчатых валов – для изготовления пальцев траков диаметром 22 мм из стали 50Г с отклонениями по диаметру не $+0/-0,3$ мм, Артемовский машиностроительный завод и «Ковельсельмаш» – для изготовления высокопрочных цепей из легированных сталей с отклонениями на уровне $\pm 0,2$ мм. Подобные запросы поступают и от других предприятий на прокат для изготовления пружинных клемм для крепления рельсов к шпалам, для крупных пружин и других изделий. Однако, как показал анализ, достижение указанной точности размеров горячекатаного проката возможно только при прокатке в точно рассчитанных чистовых калибрах, выполненных с учетом заданной точности прокатки и с выпусками оптимальной формы.

Особенностью горячей прокатки круглых профилей является заметное отличие размеров и формы калибра от размеров и формы готового профиля как вследствие температурного расширения, так и в связи с тем, что круглые калибры должны иметь горизонтальный диаметр (замеренный по ширине калибра) несколько больший, чем вертикальный диаметр (замеренный по дну калибра). Это вызвано тем, что если калибр будет иметь форму правильного круга, то даже небольшое переполнение калибра металлом, связанное с изменяющимися технологическими условиями, может привести к образованию лампаса или «уса», что является браковочным признаком. Поэтому, с целью предотвращения подобных явлений, круглые калибры необходимо выполнять с развалом (или выпуском), представляющим собой дополнительную площадь сечения калибра на участке, прилегающем к разьему валков, способную вместить тот или иной объем смещенного в поперечном направлении металла и снизить возможность образования лампаса или «уса». Для выполнения такой роли выпуск должен быть достаточно объемным (иметь простор на уширение) и, в то же время, при полном заполнении калибра металлом не выводить профиль за пределы заданного плюсового допуска соответствующего класса точности. Такое двойственное назначение выпуска требует точного определения формы и размеров выпуска.

В опубликованных руководствах по калибровке валков для прокатки круглых профилей используется ряд приемов по построению калибров с выпусками той или иной формы. Наиболее распространенными, особенно для мелких круглых профилей и катанки, являются выпуски, образованные касательными линиями, проведенными из точек, ограничивающих ширину круглого калибра к основной окружности калибра. В калибрах для прокатки более крупных профилей используют выпуски, очерченные радиусом большим радиуса калибра из смещенного центра и некоторые другие приемы по построению круглых калибров с увеличенным горизонтальным диаметром. Так в работах [1, 2] предлагается выполнять чистовые калибры в виде правильного круга диаметром, равным диаметру проката в горячем состоянии с добавлением части допуска. При сближении верхнего и нижнего валков высота калибра уменьшается, а ширина калибра остается неизменной, что делает горизонтальный размер калибра больше вертикального и, таким образом, образует

своеобразный выпуск. В работах [3,4] приведены методы расчета круглых калибров с прямыми выпускам с аналитическим определением их элементов. В данных работах за основу расчета приняты выражения, описывающие взаимосвязь элементов круглого калибра с прямым выпуском.

В работе [3] соотношение элементов круглого калибра с прямым выпуском представлено неоправданно сложным и не совсем точным выражением

$$d_r = b_k = d_k + 2 [R_k \cos \alpha + (R_k \sin \alpha + S/2) \operatorname{tg} \alpha] - d \cos \beta, \quad (1)$$

где b_k , R_k – диаметр и радиус калибра; α – угол наклона касательной S – зазор между валками β – угол «зазора», не точно определенный в данной работе как $\beta = \arcsin S/d$.

В работе [4] для расчета круглых калибров с прямым выпуском, использовано общеизвестное выражение (2), точно отображающее соотношение элементов круглого калибра с прямым выпуском

$$b_k = d_k / \cos \alpha - S \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

Однако, оба выражения не имеют решения, поскольку в них кроме неизвестной ширины калибра b_k , неизвестным является и угол наклона касательной α , величина которого зависит от диаметра проката, зазора между валками, допускаемого плюсового отклонения и ширины калибра.

В данных работах не было получено решения по аналитическому определению угла α . Как выход из положения, авторами работы [3] для определения ширины калибров с прямым выпуском, было предложено использовать «подходящие» углы наклона касательной, единые для больших размерных групп проката. Так, для группы проката диаметром $10 \div 30$ мм, был принят угол α равный $26^\circ 35'$; диаметром $30 \div 45$ мм – $21^\circ 50'$; диаметром $50 \div 55$ мм – $14^\circ \div 16^\circ 40'$; диаметром $56 \div 105$ мм – $11^\circ 20'$. Такие же единые углы наклона касательных были приняты в работе [4], в которой выражение (2) было преобразовано для расчета ширины калибров отдельных размерных групп проката подстановкой значений косинуса и тангенса соответствующего угла α . Так, для группы проката диаметром $10 \div 30$ мм, для которой в работе [3] был принят единый угол α , равный $26^\circ 35'$, было получено следующее выражение

$$b_k = 1,12 d_{\text{пр}} - 0,5 S, \quad (3)$$

где 1,12 – обратная величина $\cos 26^\circ 35'$; 0,5 – величина $\operatorname{tg} 26^\circ 35'$.

Подобные выражения были получены и для других групп проката путем подстановки в них значений косинусов и тангенсов углов α , предложенных в работе [3].

Принятие единого угла α для больших размерных групп проката совершенно не приемлемо, поскольку в действительности угол наклона касательной изменяется в широких пределах. в зависимости от диаметра проката, зазора между валками и величины плюсового допуска и должен определяться отдельно для каждого конкретного диаметра проката и других базовых данных. В подтверждение этому на рис.1, поз.1 представлено действительное изменение угла α для размерной группы проката диаметром от 5,5 до 30 мм обычного класса точности. Для сравнения, на этом же рисунке (поз. 3) приведен рекомендованный авторами угол α равный $26^\circ 35'$, единый для размерной группы диаметром $10 \div 30$ мм, который, как следует из графика, не пригоден ни для одного размера профиля в диапазоне диаметров $10 \div 30$ мм

.Подобное несоответствие принятых к расчету углов наклона касательной α выявлено и для других размерных групп.

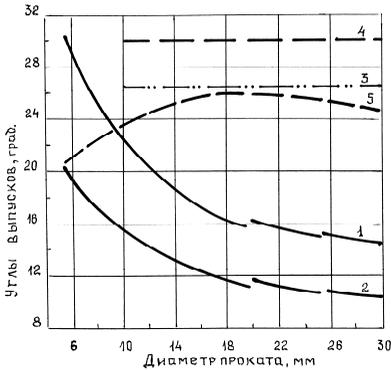


Рис.1.Изменение углов выпусков (пояснение позиции 2,4,5 в тексте).

Полученные значения ширины калибров при расчете по приведенным выражениям и назначенным углам наклона касательной намного превышают значения диаметра проката с плюсовым допуском, вплоть до 2 мм, что вынуждает вести прокатку с не заполнением калибра, т.е. в неустойчивом режиме,

и, как следствие, с не стабильными размерами сечения по длине проката.

Что касается калибров с более совершенными формами выпусков, в частности, очерченными радиусом большим радиуса калибра, то такие калибры применяются в заводской практике при прокатке средних и крупных профилей, однако, точных и всесторонне обоснованных аналитических решений для построения таких калибров не получено. В приведенных в литературе методиках [5,6], определяют радиус выпуска калибра, исходя из графического построения калибра без точного определения ширины калибра с учетом допускаемого плюсового отклонения, без чего невозможно произвести расчет калибра для прокатки профиля с заданной точностью. Наиболее точный метод расчета калибров с выпуском, образованным радиусом большим радиуса калибра, предложен калибровщиком комбината «Криворожсталь» Слюсаренко Н.Г., однако, и в этой методике не учитывается заданная точность прокатки.

Недостатком существующих методик является попытка получить необходимые параметры для построения круглых калибров с выпусками различной формы, решив одно обобщенное уравнение. Однако, такое решение невозможно, поскольку элементы, образующие форму и размеры калибров с выпусками, определяются, с одной стороны, нормативно-технологическими параметрами (таким элементом является ширина калибра) и, с другой стороны, геометрическим соотношением элементов, образующих выпуск (диаметром проката и зазором между валками), включая и ширину калибра, которая определяется отдельно с учетом заданной точности прокатки. В этой связи возникла необходимость разработки методов расчета чистовых калибров с точным и достоверным определением всех параметров калибра, способных обеспечить стабильное получение высокоточных профилей в условиях неизбежных деформационных, скоростных и температурных изменений в процессе прокатки.

Универсальный метод расчета двухвалковых круглых калибров с выпусками различной формы. В данной статье предлагается к рассмотре-

нию универсальная методика расчета калибров для прокатки круглых профилей с учетом всех особенностей прокатки металла в круглых калибрах и заданной точностью размеров проката по диаметру и овальности. Конкретно в данной статье рассмотрены методы расчета и построения круглых двух- и трехвалковых калибров со следующими формами выпусков: прямым (рис.2); скругленным, выполненным радиусом, большим радиуса калибра ($R_{\text{вып}} > R_k$), из центра O , смещенного по линии FO вглубь калибра (рис.3) и скругленным, выполненным радиусом, равным радиусу калибра ($R_{\text{вып}} = R_k$), из центра O , смещенного относительно центра калибра O (рис.4).

Принципиальной особенностью данной методики является разделение расчета калибров на два этапа. На первом этапе, исходя из нормативно-технологических параметров прокатки (зазора между валками, стандартного или назначенного плюсового отклонения и диаметра прокатываемого профиля), определяют ширину калибра, а также диаметр калибра и глубину вреза, которые одинаковы для калибров одного размера с любой формой выпуска. На втором этапе расчета определяют параметры, необходимые для построения выпусков, которые рассчитывают по специальным методикам применительно к той или иной форме выпуска.

В разработанной методике за основу расчета принято определение размера в калибре с выпуском любой формы, который раньше других размеров калибра может вывести прокатываемый профиль за пределы плюсового допуска при полном заполнении калибра металлом. Как следует из приведенных схем (рис. 2, 3, 4), таким наибольшим размером в круглом двухвалковом калибре с выпуском любой формы является расстояние между накрест лежащими кромками калибра (на рис. 2, 3, 4 – это расстояние между точками А и С и В и D), которое, чтобы не вывести профиль за пределы плюсового допуска, не должно превышать следующего значения

$$d_{\text{max}} = 1,013 (d_{\text{пр}} + \delta^+), \quad (4)$$

где d_{max} – максимальный размер в сечении калибра (размер по диагоналям АС и ВD);

$d_{\text{пр}}$ – номинальный диаметр проката в холодном состоянии;

δ^+ – плюсовой допуск ;

1,013 – коэффициент линейного расширения металла, обычно применяемый на практике

Полученное по выражению (4) значение d_{max} , позволяет достоверно и точно определить требуемую ширину калибра (B_k) с учетом плюсового допуска (δ^+) по стандарту или назначенного технологического плюсового отклонения и зазора между валками (S)

$$B_k = \sqrt{((d_{\text{пр}} + \delta^+) \cdot 1,013)^2 - S^2} \quad (5)$$

)

Общими параметрами при расчетах чистовых калибров с любой формой выпуска, наряду с параметрами d_{max} и B_k , являются диаметр и радиус калибра (d_k и R_k) и глубина вреза ручья ($h_{\text{пр}}$)

$$d_k = 1,013 d_{\text{пр}}; \quad R_k = d_k/2, \quad (6)$$

сти сторон: $AE \perp FM$, $FE \perp OM$, $AF \perp OF$.

Угол $\angle FOM$, соответствующий углу наклона касательной α , включает угол выпуска φ и угол зазора γ и может быть представлен как

$$\alpha = \varphi + \gamma \quad (9)$$

Согласно схеме (рис.2) угол выпуска φ и угол зазора γ определяется как

$$\varphi = \arccos R_k / R_{\max}, \quad (10)$$

$$\gamma = \arcsin S / 2 R_{\max} \quad (11)$$

Принимая во внимание, что $R_k = d_k / 2 = d_{\text{пр}} \cdot 1,013 / 2$;

$$R_{\max} = d_{\max} / 2 = [(d_{\text{пр}} + \delta^+) \cdot 1,013] / 2, \quad (12)$$

выражение для определения угла α приобретает следующий вид

$$\alpha = \arccos \{d_{\text{пр}} / (d_{\text{пр}} + \delta^+)\} + \arcsin \{S / [(d_{\text{пр}} + \delta^+) \cdot 1,013]\} \quad (13)$$

Угол для изготовления шаблона (рис. 2), составит

$$\Psi = 90^\circ + \alpha \quad (14)$$

Угол установки заточного устройства для заправки резцов и алмазных кругов под выпуск будет равен

$$\lambda = 90^\circ - \alpha \quad (15)$$

Проверку правильности определения угла наклона касательной можно произвести, решив уравнение (2) как тождество, подставляя в выражение $b_k = d_k / \cos \alpha - S \operatorname{tg} \alpha$,

соответствующие значения, полученные при прямом расчете данного калибра: b_k – по (5); d_k – по (6 или 7); α – по (13), а также заданное значение S .

Равенство левой и правой частей уравнения будет означать правильность определения угла наклона касательной α .

Двухвалковые калибры с выпуском, образованным радиусом большим радиуса калибра ($R_{\text{вып}} > R_k$)

Для получения проката более близкого к форме правильного круга и с более ёмким выпуском, способным вместить больший объем смещенного металла при увеличении уширения, предпочтительно строить чистовые калибры со округленными выпусками, в частности, выполненными радиусом большим радиуса калибра из центра O (рис.3).

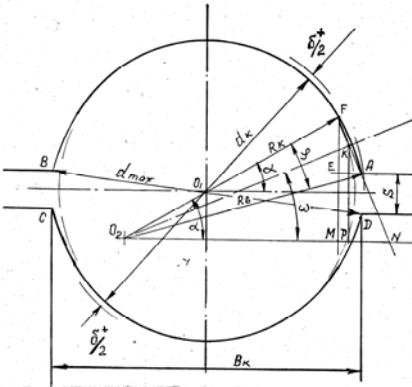


Рис. 3. Двухвалковый калибр с выпуском, образованным радиусом большим радиуса калибра, $R_{\text{вып}} > R_k$

В отличие от калибров с прямым выпуском, в калибрах с округленными выпусками угол раскрытия калибра α устанавливается предвзвешенно, исходя из практической целесообразности и для определенной размерной группы проката принимается одинаковым. Наиболее

употребительным можно считать угол α , равный 30° , который обеспечивает прокатку в круглой части ручья калибра на участке в 120° (по усмотрению калибровщика угол α может быть назначен другим, например, 25° или 20°).

Для калибров с выпуском, выполняемым радиусом $R_{\text{вып}}$ большим радиуса калибра R_k параметром, определяющим форму и размер выпуска, является величина радиуса выпуска, которая согласно схеме, приведенной на рис.3, может быть определена как

$$R_{\text{вып}} = L_{\text{ак}} / \sin \varphi/2 \quad (16)$$

где $L_{\text{ак}}$ – половина хорды, стягивающей дугу выпуска AF ;

$R_{\text{вып}}$ – радиус выпуска (отрезок OF, рис.3) ;

$\varphi/2$ – половина угла дуги выпуска AF, значение которого (согласно схеме, приведенной на рис. 3) может быть представлено как

$$\varphi/2 = \alpha - \omega \quad (17)$$

здесь ω – вспомогательный угол ($< KO'M$).

При заданных значениях угла α , величины зазора между валками S и, определенных на первом этапе расчета, значений R_k, R_{max}, B_k величина $L_{\text{ак}}$ может быть определена по следующему выражению

$$L_{\text{ак}} = \sqrt{(A_x - E_{x_y})^2 + (F_y - E_y)^2} / 2, \quad (18)$$

где A_x, E_{x_y}, F_y и E_y – конструкционные точки, координаты которых согласно рис.3 соответствуют следующим значениям:

$$A_x = B_k / 2; E_{x_y} = R_k \cdot \cos \alpha; F_y = R_k \cdot \sin \alpha; E_y = S / 2$$

Подставляя в (18) координаты точек A_x, E_{x_y}, F_y и E_y , получим выражение для определения величины $L_{\text{ак}}$

$$L_{\text{ак}} = \sqrt{(B_k / 2 - R_k \cos \alpha)^2 + (R_k \sin \alpha - S / 2)^2} / 2 \quad (19)$$

Принимая во внимание равенство углов $\angle KO'M(\omega) = \angle AFE = \angle AKP$, получим вспомогательный угол ω ,

$$\omega = \arctg \{(A_x - E_{x_y}) / (F_y - E_y)\} = \arctg \{(B / 2 - R_k \cdot \cos \alpha) / (R_k \sin \alpha - S / 2)\} \quad (20)$$

Величину радиуса выпуска получим, подставляя в выражение $R_{\text{вып}} = L_{\text{ак}} / \sin (\alpha - \omega)$ значения $L_{\text{ак}}$ из (19) и ω из (20), а также заданный угол α . При принятии угла $\alpha = 30^\circ$, для которого $\sin 30^\circ = 1/2$, а $\cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$, расчетные формулы (19) и (20) упрощаются, принимая следующий вид

$$L_{\text{ак}} = \sqrt{(B_k - R_k \sqrt{3})^2 + (R_k - S)^2} / 4 \quad (19')$$

$$\omega = \arctg \{(B_k - R_k \sqrt{3}) / (R_k - S)\} \quad (20')$$

Проверку правильности определения $R_{\text{вып}}$ можно выполнить, решив выражение (21)

$$B_k = 2[\sqrt{R_{\text{вып}}^2 - ((R_{\text{вып}} - R_k) \sin \alpha + S / 2)^2} - (R_{\text{вып}} - R_k) \cos \alpha], \quad (21)$$

как тождество, подставляя в него значения составляющих, полученных при прямом их определении: B_k – по (5), R_k – по (6) и заданные значения S и α . (Выражение 21 абсолютно точно отображает связь элементов калибра $R_{\text{вып}} >$

R_k , рис. 3). Равенство левой и правой частей уравнения будет означать правильность произведенного расчета по определению $R_{\text{вып}}$.

Применение калибров, рассчитанных по данной методике, позволило производить прокат высокой точности и обеспечить поставку проката для изготовления пальцев траков диаметром 22 мм, высокопрочных цепей диаметром от 14 до 30 мм, клемм диаметром 16, пружин диаметром 24 – 30 мм, крупных болтов и гаек непосредственно из горячекатаного проката, взамен ранее применявшегося калиброванного проката.

Двухвалковые калибры с выпуском, образованным радиусом равным радиусу калибра ($R_{\text{вып}} = R_k$).

Другим вариантом построения чистового калибра с округленным выпуском может быть калибр с выпуском, выполненным радиусом равным радиусу калибра ($R_{\text{вып}} = R_k$), из центра O' , смещенного относительно центра калибра O на величину $\Delta O'_{(x)}$ и $\Delta O'_{(y)}$ (рис.4). При таком построении калибра рабочие контуры резцов и абразивных кругов, предназначенных для нарезки калибров, выполняются в виде правильного полукруга, а выпуск калибра производится отводом резца (абразивного или алмазного круга) от дна готового калибра на величину $\Delta O'_{(y)}$ и последующим смещением резца (круга) вправо и влево на величину $\Delta O'_{(x)}$ от вертикальной оси калибра.

Для данной формы калибра, как и для калибров с выпуском ($R_{\text{вып}} > R_k$), угол раскрытия калибра α назначают предварительно равным 30° или другим, близким к значению 30° , например, 25° или 20° . Графически смещение центра дуги контура выпуска может быть получено засечками из фиксированных точек контура калибра : на рис.4 из точки А, ограничивающей ширину калибра, и из точки F, с которой начинается раскрытие калибра.

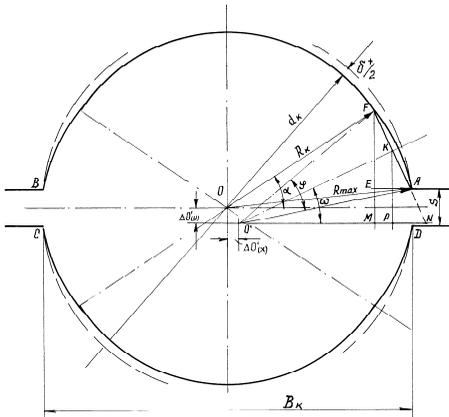


Рис. 4. Двухвалковый калибр с выпуском, образованным радиусом равным радиусу калибра, $R_{\text{вып}} = R_k$

При аналитическом определении параметров калибра данного типа, как и для калибров других типов, первоначально производится определение диаметра калибра (d_k), наибольшего размера в сечении калибра (d_{max}) и ширины калибра (B_k) по выше приведенным общим выражениям (6 или 7, 4 и 5, соответственно). Дальнейшие расчеты по определению смещения центра дуги выпуска O' относительно центра калибра O производят по следующей методике. Согласно схеме, приведенной на рис.4, указанное смещение центра O' может быть определено как:

$$\Delta O'_{(x)} = B_k / 2 - R_k \cdot \cos (\omega - \varphi / 2), \quad (22)$$

$$\Delta O'_{(y)} = R_k [\sin \alpha - \sin (\omega + \varphi / 2)], \quad (23)$$

здесь ω – вспомогательный угол, равный $\varphi/2$ – половина угла выпуска, $\omega = \text{arctg} \{ (B_k / 2 - R_k \cdot \cos \alpha) / (R_k \cdot \sin \alpha - S / 2) \}$; (24)

$$\varphi/2 = \arcsin \left(\sqrt{(B_k / 2 - R_k \cdot \cos \alpha)^2 + (R_k \cdot \sin \alpha - S / 2)^2} / 2R_k \right) \quad (25)$$

Конечные расчеты по определению смещения центра O' производят по выражениям (22) и (23) после подстановки в них заданного угла α и значений углов ω и $\varphi/2$, полученных по выражениям (24) и (25). Для калибров с углом раскрытия $\alpha = 30^\circ$ для которого $\sin 30^\circ = 1/2$, а $\cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$) выражения (24) и (25) упрощаются, принимая следующий вид:

$$\omega = \text{arctg} \{ (b_k - R_k \sqrt{3}) / (R_k - S) \} \quad (24')$$

$$\varphi/2 = \arcsin \left(\sqrt{(B_k - R_k \sqrt{3})^2 + (R_k - S)^2} / 4R_k \right) \quad (25')$$

Расчет трехвалковых круглых калибров с выпусками различной формы. Разработанная методика расчета и построения круглых двухвалковых калибров с выпусками различной формы пригодна также для расчета и построения трехвалковых круглых калибров с прямым выпуском и выпусками, образованными радиусами $R_{\text{вып}} > R_k$ и $R_{\text{вып}} = R_k$.

Комбинированная схема трех валкового круглого калибра с прямым выпуском и скругленным выпуском ($R_{\text{вып}} > R_k$) приведена на рис.5.

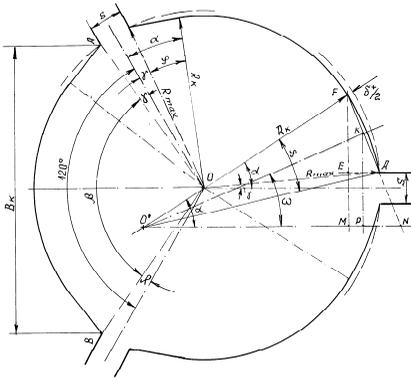


Рис. 5. Комбинированная схема трехвалкового калибра с прямым выпуском и выпуском $R_{\text{вып}} > R_k$

При расчете трехвалковых круглых калибров на первом этапе расчета определяют следующие базовые параметры, общие для трехвалковых калибров с любой формой выпусков:

– диаметр и радиус калибра

$$d_k = d_{\text{пр}} \cdot 1,013; R_k = R_{\text{пр}} \cdot 1,013 \quad (26)$$

здесь $R_{\text{пр}}$ – номинальный радиус проката в холодном состоянии;

– наибольший размер (R_{max}) в сечении трехвалкового круглого калибра, который для трехвалкового калибра определяется расстоянием от центра калибра до кромок ручья (на рис. 5 – это расстояние между центром калибра O и точками A) и, который не должен превышать следующего значения

$$R_{\text{max}} = (R_{\text{пр}} + \delta^+ / 2) \cdot 1,013; \quad (27)$$

– угол зазора $\gamma = \arcsin \{ 0,5 S / R_{\text{max}} \}$; (28)

– проекцию R_{max} на ось зазора (вспомогательный параметр):

$$R_{\text{max}(\text{ос})} = R_{\text{max}} \cos \gamma; \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{– ширину калибра} & B_K &= 2 R_{\max} \sin \beta / 2, & (30) \\
 & \text{где} & \beta &= 120^\circ - 2 \gamma
 \end{aligned}$$

Дальнейшие расчеты параметров трехвалкового круглого калибра определяют по специальным методикам применительно к той или иной форме выпуска.

Трехвалковые калибры с прямым выпуском.

В трехвалковых калибрах с прямым выпуском, как и в калибрах двухвалковых с прямым выпуском, параметром, определяющим форму и размер выпуска, является угол наклона касательной α , к окружности калибра, который, как следует из схемы приведенной на рисунке 5, включает угол выпуска ϕ и угол зазора γ , т.е. $\alpha = \phi + \gamma$.

Согласно схеме, приведенной на рис.5, и с учетом параметров, полученных на первом этапе расчета, определим углы ϕ и γ

$$\phi = \arccos R_K / R_{\max} = \arccos \{ R_{\text{пр}} / (R_{\text{пр}} + 0,5 \delta^+) \} \quad (31)$$

$$\gamma = \arcsin S / 2 R_{\max} = \arcsin \{ 0,5 S / [(R_{\text{пр}} + 0,5 \delta^+) 1,013] \} \quad (32)$$

В конечном виде формула для определения угла наклона касательной α будет иметь следующий вид

$$\alpha = \arccos \{ R_{\text{пр}} / (R_{\text{пр}} + 0,5 \delta^+) \} + \arcsin \{ 0,5 S / [(R_{\text{пр}} + 0,5 \delta^+) 1,013] \} \quad (33)$$

Трехвалковые калибры, с выпуском, образованным радиусом большим радиуса калибра ($R_{\text{вып}} > R_K$).

В трехвалковых калибрах (рис.5) с выпуском, образованным радиусом большим радиуса калибра ($R_{\text{вып}} > R_K$), радиус выпуска, как и в двухвалковых калибрах, может быть определен по выражению

$$R_{\text{вып}} = L_{\text{ак}} / \sin \phi / 2 = L_{\text{ак}} / \sin (\alpha - \omega), \quad (34)$$

где α – предварительно заданный угол раскрытия калибра ($30-20^\circ$);

$R_{\text{вып}}$ – радиус выпуска (отрезок $O'F$, рис.5)

Величину полухорды $L_{\text{ак}}$ и значение вспомогательного угла ω определим по следующим выражениям

$$L_{\text{ак}} = \sqrt{(R_{\max(OS)} - R_K \cdot \cos \alpha)^2 + (R_K \cdot \sin \alpha - 0,5S)^2} / 2 \quad (35)$$

$$\omega = \arctg \{ (R_{\max(OS)} - R_K \cdot \cos \alpha) / (R_K \sin \alpha - S / 2) \} \quad (36)$$

Проверку определения $R_{\text{вып}}$ можно выполнить, решив выражение

$$R_{\max(OS)} = \sqrt{(R_{\text{вып}}^2 - [(R_{\text{вып}} - R_K) \sin \alpha + 0,5S]^2} - (R_{\text{вып}} - R_K) \cdot \cos \alpha \quad (37)$$

как тождество, подставляя в данное уравнение значения соответствующих параметров, полученных при прямом определении радиуса выпуска. Равенство левой и правой частей уравнения будет означать правильность произведенного расчета по определению $R_{\text{вып}}$.

Трехвалковые калибры, с выпуском, образованным радиусом равным радиусу калибра ($R_{\text{вып}} = R_K$).

Трехвалковые круглые калибры могут быть выполнены с выпуском, образованным радиусом равным радиусу калибра из центра O' , смещенного относительно центра калибра (рис.6)

Графически смещение центра дуги контура выпуска может быть получено засечками из точек F и A радиусом, равным радиусу калибра. Этим же ра-

диусом из полученного, смещенного, центра выполняется контур выпуска в виде дуги FA.

При аналитическом определении параметров калибра такой формы, первоначально определяют базовые параметры; R_k , R_{max} , γ , $R_{max(os)}$, B_k по выражениям (27 – 30) и назначают угол раскрытия калибра $\alpha = 30^\circ - 20^\circ$. Дальнейшие расчеты по определению смещения центра дуги выпуска O' производят по следующей методике

Согласно схеме, приведенной на рис.6, указанное смещение может быть определено как

$$\Delta O'_{(x')} = R_{max(os)} - R_k \cos(\omega - \varphi/2), \quad (38)$$

$$\Delta O'_{(y')} = R_k [\sin \alpha - \sin(\omega + \varphi/2)], \quad (39)$$

здесь ω – вспомогательный угол, равный:

$$\omega = \arctg \{ (R_{max(os)} - R_k \cdot \cos \alpha) / (R_k \sin \alpha - S/2) \}; \quad (40)$$

$\varphi/2$ – половина угла выпуска, величина которого может быть определена по выражению:

$$\varphi/2 = \arcsin \{ \sqrt{(R_{max(os)} - R_k \cos \alpha)^2 + (R_k \sin \alpha - 0,5S)^2} / 2R_k \} \quad (41)$$

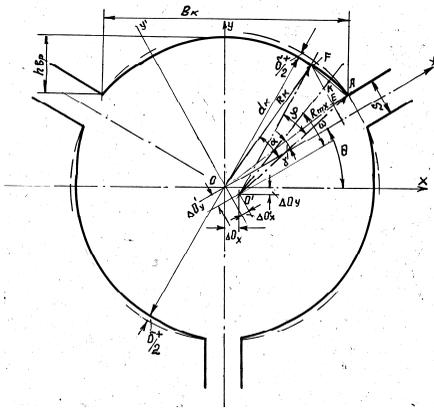


Рис. 6. Трехвалковый калибр с выпуском, образованным радиусом $R_{вып} = R_k$,

Конечные расчеты по определению смещения центра O' производят по выражениям (38) и (39) после подстановки в них заданного угла α и значений углов ω и $\varphi/2$, полученных по выражениям (40) и (41).

Величину отвода резца или алмазного круга от дна готового калибра и последующего смещения инструмента вправо и влево от вертикальной оси OY для выполнения выпуска калибра определим по следующим выражениям:

$$\Delta O_x = \Delta O'_{(x')} \cos \theta - \Delta O'_{(y')} \sin \theta \quad (42)$$

$$\Delta O_y = \Delta O'_{(x')} \sin \theta + \Delta O'_{(y')} \cos \theta \quad (43)$$

здесь θ – угол между осями координат OX и OX' , равный 30°

Принимая во внимание определенную сложность расчетов, в данной работе составлена компьютерная программа расчета всех рассмотренных в данной статье форм калибров в системе Excel.

Выполненные расчеты калибров с различной формой выпусков выявили следующие особенности. В калибрах с прямым выпуском, вследствие неизбежного уменьшения угла наклона касательной α (рис.1, поз.1), резко уменьшается величина выпуска по контуру (рис.1, поз.2) и, еще в большей степени,

уменьшается емкость выпуска, что делает такие калибры неэффективными для проката диаметром 14 мм и более. Для мелких размеров (диаметром 5,5 – 7 мм) большой по протяженности прямолинейный контур выпуска делает профиль граненым.

В калибрах со скругленными выпусками, выполненными радиусами $R_{\text{вып}} > R_k$ и $R_{\text{вып}} = R_k$, вследствие того, что угол раскрытия калибра α назначается относительно большим, преимущественно равным 30° (рис.1, поз.4), величина собственно выпуска ϕ получается стабильно большой, в пределах $20^\circ - 22^\circ$, для всех рассмотренных размеров калибров (рис.1, поз.5). Такая большая величина скругленных выпусков по протяженности контура в сочетании с их выпуклостью значительно увеличивает площадь сечения выпусков и, как следствие, повышает их способность вместить больший объем смещенного металла при увеличении уширения, не выводя профиль за пределы плюсового допуска. Кроме этого применение калибров со скругленными выпусками обеспечивает получение профиля максимально приближенному к правильно-кругу.

Заключение. Разработана универсальная методика расчета круглых двух- и трехвалковых калибров с выпусками различной формы для прокатки круглого проката с учетом диаметра прокатываемого профиля, зазора между валками и допускаемого по стандарту на прокат любого класса точности или назначенного плюсового отклонения.

Прокатка в калибрах, рассчитанных по данной методике, обеспечивает получение качественного профиля по форме и точного по размерам сечения, способствует предотвращению образованию лампасов и «уса», обеспечивает устойчивую работу клетей с круглыми калибрами при изменении в процессе прокатки деформационных и скоростных условий прокатки.

1. *Бахтинов Б.П., Штернов М.М.* Калибровка прокатных валков. – М.: «Металлургия», 1953. – С. 394 – 395. – 783 с.
2. *Прокатное производство / П.И. Полухин, Н.В.Федосов, А.А.Королев, Ю.М.Матвеев.* – М.: «Металлургия», 1982. – С.286 – 287. – 696 с.
3. *Литовченко Н.В., Диамидов Б.Б., Курдюмова В.А.* Калибровка валков прокатных станов. М.: «Металлургия», 1963. – С.215 – 218. – 638 с.
4. *Чекмарев А.П., Мутьев М.С., Машковцев Р.А.* Калибровка прокатных валков М.: «Металлургия», 1971. С.216 – 218. – 508 с.
5. *Ваткин Я.Л., Ваткин Ю.Я.* Трубное производство. М.: «Металлургия», 1970. – 512 с.
6. *Бахтинов В.Б.* Прокатное производство. М.: «Металлургия», 1987. – 416 с.

*Статья рекомендована к печати:
заместитель ответственного редактора
раздела «Прокатное производство»
канд.техн.наук И.Ю.Приходько
рецензент канд.техн.наук Л.Г.Тубольцев*

В.І.Біба, В.А.Олійник

Розробка універсального калібрування валів для прокатування круглих профілів високої точності

Метою роботи є розробка методики калібрування валків, що забезпечує досягнення високої точності розмірів гарячекатаного прокату при прокатуванні в чистових калібрах. Викладено універсальний метод розрахунку і побудови круглих двох- і трьохвалкових калібрів з випусками різної форми з урахуванням допустимих відхилень в діаметрі прокату будь-якого класу точності. Застосування калібрів, розрахованих по даній методиці, забезпечує отримання круглих профілів із заданою точністю, сприяє запобіганню утворенню лампасів і «вуса», забезпечує стабільну роботу клітей.