

КИНЕМАТИКА КРУЧЕНИЯ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ В МНОГОВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ КОНИЧЕСКИХ ВАЛКОВ

SCREWING PHORONOMY OF BAR WHEN ROLLING IN MULTIROLLED CALIBERS

Р.Ф. Исхаков^{1,2}, С.П. Буркин²

1 - ЗАО НПП «МАШПРОМ», 2 - ФГАО УрФУ имени первого президента России Б.Н. Ельцина

Abstract

Rolling of sticks and pipes in multirolled calibers is very perspective owing to the profitable state of stress scheme and possibility of large stretches obtaining. While slight widening large stretches contribute to longitudinal texture creation in sticks and pipes, which are succeeded to recrystallization texture after hot deformation. Texture of metalwares, made of complex alloyed steel and alloys, creates mechanical anisotropy. Substitution of longitudinal sharp-texture for screw texture enhances impact resistance and long-term strength of sticks and pipes made of refractory steel and alloys. The present article describes and analyses means of torsion and numerically estimate torsion size of stripes, rolled in 4-rolls calibers of tapered rolls. This new rolling method in section and reducing mills allows to create screw texture and enhance strength characteristics of sticks and pipes in tangential direction and totally dispose split of metalwares at heat treatment. Owing to 4-rolls calibers of tapered rolls, rolling according to circle-circle system is realized without overfill at relatively large reduction. At pipe rolling in round calibers without eccentricity nonuniform pipe wall thickness reduced without fixture is totally removed.

Текстура металла в значительной степени влияет на конечные механические, физические и эксплуатационные свойства металлоизделий. Известно, что текстура интенсивной горячей деформации наследуется при последующей рекристаллизации. Прутки, полученные горячей сортовой прокаткой в традиционной технологической схеме, имеют пониженные характеристики ударной вязкости и длительной прочности из-за острой осевой текстуры, как деформации, так и рекристаллизации. Винтовая (спиральная) текстура, получаемая при осевом скручивании прутка, улучшает эти свойства металла. Если осевое скручивание прутков осуществляется в ходе непрерывной сортовой прокатки, то пластическое кручение повышает степени деформации в каждом проходе. Это, в свою очередь, повышает скорости динамической полигонизации и динамической рекристаллизации. При традиционной горячей прокатке степени деформации в проходах не достаточны для того, чтобы динамическая полигонизация начиналась еще в очаге деформации. Рекристаллизация же при современных скоростях прокатки начинается уже после завершения прокатки, и острая текстура деформации полностью наследуется в новой структуре. Увеличение степени деформации за счет кручения позволяет добиться, при рационально подобранных температурно-скоростных условиях, развития динамических полигонизации и рекристаллизации еще в процессе прокатки. Это модифицирует структуру, уменьшает остроту текстуры и порождает тангенциальную составляющую вектора анизотропии. Возможность формирования винтовой (спиральной) текстуры показана на примере сортовой прокатки круглых в сечении прутков по схеме круг-квадрат-круг в четырехвалковых калибрах грибовидных конических валков. Квадратный калибр формируется коническими поверхностями, а круглый – также нарезается на конических валках пред-

варительно сведенных с образованием квадратного просвета [1].

Вследствие ограниченного промышленного применения полно приводных четырехвалковых клетей процесс обжатия в четырехвалковых калибрах по схемам круг-квадрат, квадрат-квадрат и квадрат-круг остается малоизученным. Еще меньше сведений в современной литературе о прокатке в многовалковых калибрах, образованных коническими валками. Главной особенностью этой прокатки следует считать осевое скручивание полос, проявляющееся в первую очередь в схеме круг-квадрат. Круглая в сечении заготовка скручивается интенсивно даже при непрерывной прокатке, но в меньшей степени, чем при последовательной [2]. Целью данной работы является изучение кинематики кручения полосы в четырех валковом калибре, образованном коническими валками.

Схемы замыкания четырех валков при формировании квадратного и круглого калибров показаны на рис.1. Все валки установлены консольно в индивидуальных подушках и могут смещаться в осевом направлении (рис.1а), изменяя размеры квадратного калибра, который при этом остается замкнутым. Раскрытие торцевых зазоров в том случае определяется лишь упругой деформацией подушек и корпуса клетки. Несомненным достоинством калибров, образованных бочками конических валков, является уменьшение поперечной составляющей полного давления металла на валки. При прокатке, кроме поперечной, возникает продольная составляющая равная $P/\sqrt{2}$, где P - сила полного давления металла на валок, и дополнительный изгибающий момент от силы параллельной оси валка. Эти дополнительные воздействия воспринимаются упорными подшипниками валкового узла. При рациональном конструировании подушек удастся несколько поднять жесткость клетки в сравнении с аналогичными клетями, в которых многовалковый калибр образован цилиндрическими валками.

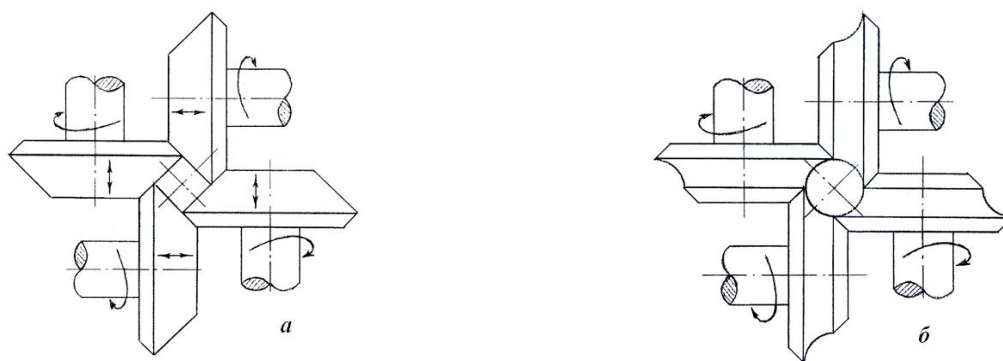


Рис.1. Схемы формирования квадратного (а) и круглого (б) калибров коническими валками

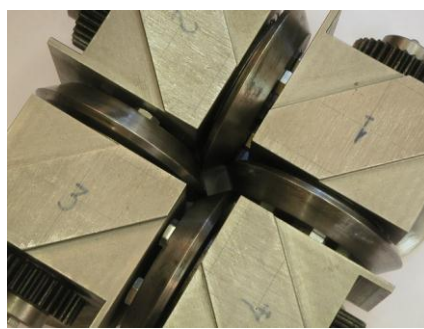
С целью сбора и анализа априорной информации о кинематике течения металла при многовалковой прокатке на конических валках спроектирована и изготовлена в условиях лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением» УГТУ-УПИ экспериментальная четырехвалковая прокатная установка, монтируемая и приводимая в действие на универсальной испытательной машине УИМ-30 усилием 0,3 МН. Внешний вид установки показан на рис.2.

Конструктивные особенности прокатной установки иллюстрируются объемной схемой на рис.3. Корпус установки представляет собой две опорные плиты 1 и 2, соединенных четырьмя стойками 3. На внутренних поверхностях плит выполнены диагональные пазы, в которые помещаются с возможностью смещения направляющие выступы (см. рис.2б) подушек 4. Прокатные конические валки 5 закреплены на осях с подшипниковыми опорами в расточках подушек. На противоположном от вала конце оси закреплена приводимая шестер-

ня 6, находящаяся в постоянном зацеплении с рейкой 7. Четыре зубчатые рейки верхними торцами с подпятниками закреплены на поперечине 8, которая монтируется неподвижно на верхнем бойке испытательной машины. Подпятники реек выполнены с возможностью смещения относительно корпуса поперечины 8. В поперечных резьбовых расточках стоек 3 установлены мессдозы 9 для замера полного давления металла на валки при прокатке. Мессдозы 9 снабжены установленными в осевых каналах толкателями 10, опирающимися одним концом в дно стакана мессдозы, вторым – в корпус подушки. Оси мессдоз перпендикулярны коническим бочкам валков и параллельны направляющим пазам, по которым возможно смещение подушек. При установке клетки на испытательную машину нижняя плита 1 опирается на полую опору подвижной поперечины машины. Для вывода прокатанных заготовок из клетки используется осевой канал подвижной гидроприводной поперечины УИМ-30.



а



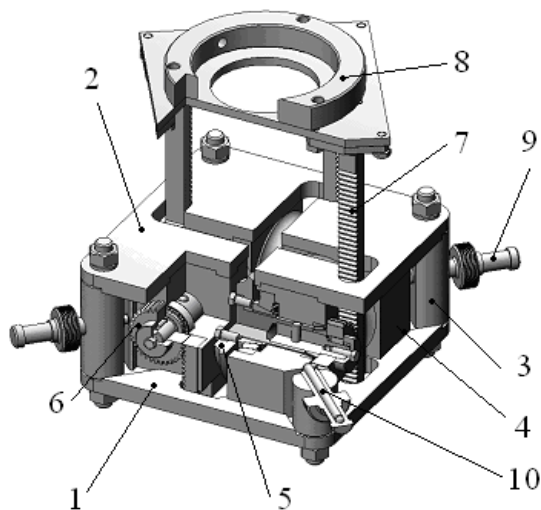
б



в

а – установка, смонтированная на УИМ-30; б – валковый узел с четырехвалковым квадратным калибром; в – валковая подушка

Рис.2. Экспериментальная прокатная установка



1,2 – плиты корпуса установки; 3 – стойка; 4 – под-
душка вала; 5 – валок;
6 – шестерня привода вала; 7 – зубчатая рейка; 8 –
поперечина; 9 – мессдоза;
10 – толкатель

Рис.3. Конструктивная схема экспериментальной
прокатной установки

Внешний и, следовательно, максимальный диаметр валков в калибрах $D = 130\text{ мм}$. Сторона квадрата калибра $a = 18\text{ мм}$, диаметр круглого - $d = 25\text{ мм}$. Максимальные диаметры валков в обоих калибрах $D_1 = 104,5\text{ мм}$, а относительные диаметры валков составляли: для квадратного $A = (D + D_1)/(2 \cdot a) = 6,5$; для круглого $A = (D + D_1)/(2 \cdot d) = 4,7$. Средний диаметр валков в калибрах $\bar{D} = 117,25\text{ мм}$.

При прокатке круглой заготовки в квадратном калибре полоса выходит из валков с небольшим углом относительного скручивания. Входящий же свободный конец полосы интенсивно вращается и все пластическое скручивание локализуется в зоне обжатия. Остаточный угол скручивания определяется упругим последствием и, следовательно, зависит только от жесткости материала полосы и вытяжки при прокатке. На рис.4 показана зависимость удельного (на 1 мм длины зоны обжатия) остаточного угла скручивания квадратной полосы после прокатки по схеме круг-квадрат. При вытяжках более 1,25 остаточный угол скручивания остается практически неизменным. Контактные условия трения не оказывают влияния на остаточный относительный угол скручивания, что установлено сопоставлением прокатки на обезмасленных и смазанных валках.

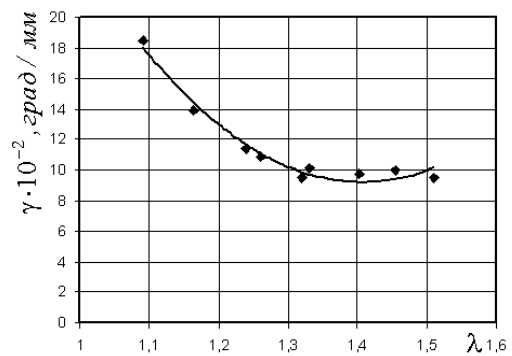


Рис.4. Удельные остаточные углы скручивания по-
лосы после прокатки
в квадратном калибре конических валков по схеме
круг-квадрат

Интенсивное скручивание полосы в зоне обжатия в случае, когда к выходящему концу полосы не приложен крутящий момент, препятствующий скручиванию, позволяет говорить о возможности формирования спиральной текстуры металла. Удельные углы скручивания растут с вытяжкой и стабилизируются при $\lambda > 1,4$ (рис.5).

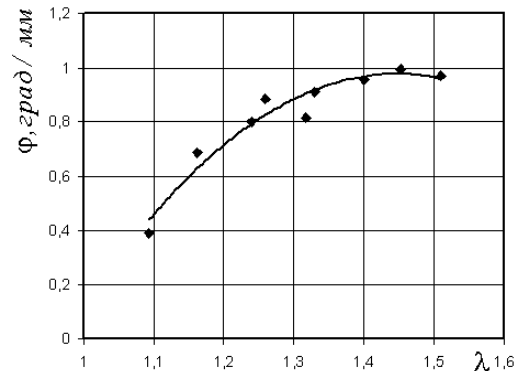


Рис.5. Удельные (на 1 мм длины очага деформации) углы скручивания полосы в зоне обжатия при прокатке по схеме круг-квадрат

Экспериментально углы скручивания определяли просто и достаточно точно методом торцевых рисок, нанесенных на образцы заданной длины. Этим методом определяется удельный угол скручивания полосы в зоне обжатия ϕ , а по развороту граней прокатанной полосы замеряется остаточный угол скручивания γ , также приводимый к единице длины зоны обжатия. Остаточное скручивание появляется всегда при отсутствии заневоливания выходящего конца полосы. Момент заневоливания переднего конца полосы определяется выражением: $M = 0,2 \cdot \tau_{s1} \cdot a^3$, где τ_{s1} - сопротивление сдвиговой деформации металла на выходе из валков.

В случае заневоливания переднего конца полосы угол скручивания в зоне обжатия представляет сумму $\phi = \phi + \gamma$. Рост γ при уменьшении обжатия объясняется смятием контактной зоны при ее малой ширине $b = \sqrt{d_1^2 - a^2}$ под действием возникающего в очаге деформации крутящего мо-

мента M_{ϵ} . Хотя угол остаточного скручивания сравнительно мал, особенно в диапазоне практически приемлемых вытяжек, его следует учитывать при установке проводковых устройств последующих клеток непрерывной группы. В случае применения квадратного калибра в качестве чистового выводные проводки должны быть рассчитаны на возможность раскручивания профиля с учетом упругого последствия, величина которого зависит от расстояния между плоскостями осей валков клетки и роликов раскручивающей проводки.

В случае прокатки по схеме квадрат-круг вращение входящего конца полосы недопустимо, и скручивание полосы в зоне обжатия приводит к вращению выходящего конца полосы при отсутствии его заневоливания. Установлено, что существует определенное угловое положение квадратного сечения полосы относительно калибра, при котором вращение входящего конца отсутствует и, следовательно, не требуется установка специального проводкового устройства.

Максимальная вытяжка при прокатке по схеме квадрат-круг достигается именно при этом угловом положении полосы по отношению к продольным плоскостям, проходящим через точки соприкосновения валков. На рис.6 схематично показано угловое положение квадратной полосы $a \times a$, входящей в круглый калибр диаметром $d_{\text{вб}}$. Угол задачи полосы α определяет асимметрию тангенциального течения металла полосы по поверхности ручья каждого валка. Оптимальный угол характеризует симметрию этого течения и определяет максимально возможную вытяжку при прокатке без переполнения калибра.

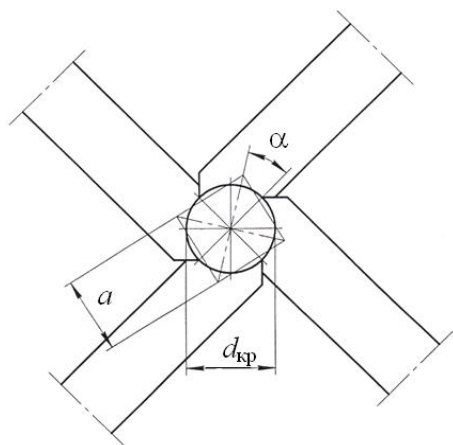


Рис.8. Схема входа квадратной полосы в круглый калибр конических валков

При прокатке полос с различными вытяжками и контактными условиями трения установлено, что угол $\alpha = 35...38^\circ$ обеспечивает прокатку без риска формирования заусенцев.

Аналогичная ситуация возникает при прокатке по схеме квадрат-квадрат. На схеме (рис.7) показано угловое положение сечения входящей в калибр полосы. Угол разворота около 20° обеспечивает отсутствие вращения свободного входящего конца квадратной полосы и позволяет катать с максимальными вытяжками.

Представляет интерес влияние крутящего момента, прикладываемого к входящей в валки полосе для устранения ее кручения и скручивания при прокатке на конических валках, на силовые параметры прокатки. Дополнительные сдвиговые напряжения в сечениях полосы, возникающие под действием приложенного внешнего крутящего момента, способствуют снижению нормальных контактных давлений и полного давления металла на валки. Такое влияние крутящего момента на величину P можно пронаблюдать на диаграмме записи усилия прокатки. Такая диаграмма для прокатки свинцовой полосы по схеме круг-квадрат с вытяжкой $\lambda = 1,52$ представлена на рис.8.

На первом этапе прокатки в течение 40с прокатка проводилась со свободным входящим концом полосы. Далее с помощью рычажного устройства к полосе приложен плавно возрастающий крутящий момент до начала видимого упруго-пластического кручения. Внешний момент, приводящий к пластическому скручиванию полосы на

входе в зону обжатия и равный $M = \frac{\pi \tau_s d_0^3}{16}$, следует считать предельно допустимым при прокатке.

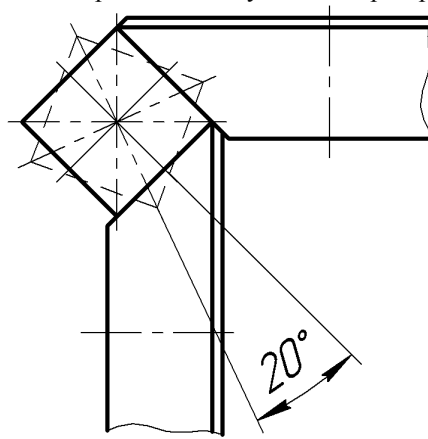


Рис.9. Схема ввода квадратной полосы в квадратный калибр конических валков

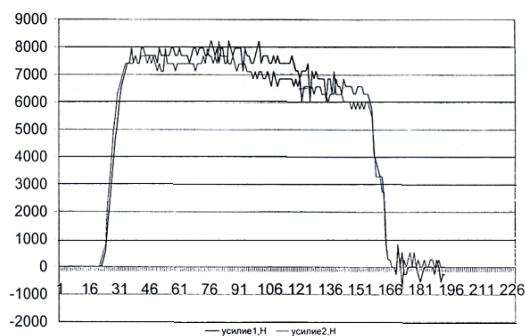


Рис. 8. Диаграмма записи во времени давления металла на валки при прокатке по схеме круг-квадрат с вытяжкой $\lambda = 1,52$ с приложением к полосе внешнего крутящего момента

Опыты показали, что при приложении крутящего момента к заднему концу полосы, препятствующего скручиванию полосы в зоны обжатия, возможно снижение усилия прокатки на 20% и момента прокатки на 10...12%. Если прокатку в многовалковых калибрах на конических валках осуществлять в непрерывной группе клетей, то каждая предыдущая клеть, воспринимая крутящий момент, будет препятствовать скручиванию полосы в последующей клетке. Это позволит снизить давление металла на валки во всех клетях и в итоге повысить точность проката без специальных мер по повышению жесткости клетей. Снижение момента прокатки не столь значительно как усилие, но, тем не менее, при многопроходной прокатке может положительно сказаться на энергосбережении.

При входе квадратной полосы в квадратный или круглый калибр ее легко удержать от кручения с помощью предыдущего квадратного калибра и проводкового устройства. Кручение входящего конца квадратной полосы не допустимо из-за периодического совмещения ребер полосы с зазорами и образования заусенцев даже при использовании замкнутых калибров. Последовательная прокатка в последовательности пар калибров квадрат-круг обеспечивает значительное скручивание, при котором уже проявляется влияние на свойства проката винтовой (спиральной) текстуры.

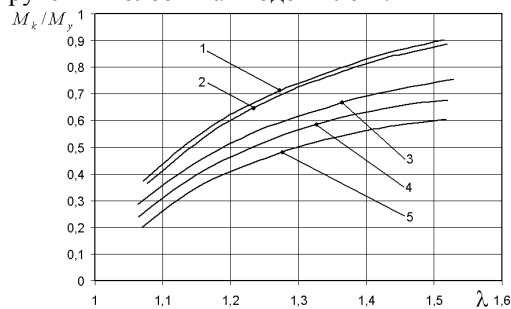
Кинематика процесса прокатки в конических валках до настоящего времени не изучалась. В этом плане можно сослаться на работу [3], где приводится вывод формулы для расчета крутящего момента, возникающего из осевой асимметрии трения в круглом двухвалковом калибре, нарезанной на конических бочках валков. Исходя из полученных формул, нельзя объяснить возникновение упруго-пластического кручения только за счет момента сил трения. Известно, что для осуществления предельного упругого закручивания круглого в сечении прутка необходим крутящий момент не менее

$$M_y = \frac{\pi}{2} \tau_s \cdot r_0^3 = \frac{\pi \tau_s d_0^3}{16}, \text{ где } d_0 = 2r_0 - \text{диаметр}$$

сечения прутка; τ_s - сопротивление материала прутка сдвиговой деформации.

Пластическое кручение, при котором тангенциальное напряжение сдвига $\tau = \tau_s$ достигается при $M_T = \pi \tau_s d_0^3 / 12$.

Чтобы не допустить упругопластического кручения полосы на входе в валки, необходимо создать условия прокатки, при которых $M_{\hat{\epsilon}} < M_y$. На рис.9 возникающий крутящий момент представлен в безразмерном виде отношением $M_{\hat{\epsilon}} / M_y$. Из приведенных графиков следует, что в диапазоне изменения коэффициента трения ψ (по Зибелю) от 0,4 до 0,8 и относительного диаметра валков A от 4,8 до 10,4 возникающий в результате действия поперечной составляющей контактных сил трения крутящий момент не вызывает упругопластического кручения полосы на входе в клеть.



1 – $A=6,5$, $\psi=0,8$; 2 – $A=10,4$, $\psi=0,6$; 3 – $A=6,5$, $\psi=0,6$; 4 – $A=4,8$, $\psi=0,6$; 5 – $A=6,5$, $\psi=0,4$

Рис.9. Относительный крутящий момент при прокатке

на конических валках по схеме круг-квадрат Упругопластическое, или даже почти пластическое кручение входящей полосы за счет момента сил трения возможно при больших вытяжках ($\lambda > 1,7$), больших значениях относительного диаметра валков ($A > 15$) и высоких коэффициентах трения. Таким образом, в реальных условиях прокатки только за счет трения даже при достаточно большом значении коэффициента трения невозможно обеспечить достаточный уровень крутящего момента. Следовательно, переход металла в пластическое состояние при скручивании происходит не только за счет трения, а также благодаря самой форме очага деформации, то есть благодаря изменению диаметра каждого валка по ширине калибра.

Расчет угла скручивания круглого в сечении профиля, прокатываемого в четырехвалковом калибре, образованном коническими валками, проводится в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис.10. Рабочая поверхность валка представляет часть боковой поверхности прямого корпуса, опирающегося на основание радиусом R , принимаемым за расчетный. Наименьший радиус конического валка в зоне обжатия определен плоскостью, перпендикулярной оси валка и отстоящей от основания на расстоянии H . Если образующая конической поверхности наклонена под углом 45° к

оси, то $H = a/\sqrt{2}$, где a , - ширина калибра. Высота конуса C в этом случае равна расчетному радиусу вала, т.е. $C = R$. Коническая поверхность условно разрезана двумя плоскостями: диаметральной осевой и ей параллельной, отстоящей на расстоянии l , которое принимается равным длине зоны обжатия. Линиями пересечения этих плоскостей с поверхностью рабочей части вала являются отрезки 1-2 и 3-4. Считается, что отрезок 1-2 прямой и лежит в плоскости выхода полосы из калибра. Отрезок, определяющий положение входного сечения, при большой величине l приобретает существенную кривизну. Поскольку при реальной прокатке l значительно меньше R , то отрезок 3-4 рассматривается как прямой, проведенный через точки пересечения смещенной на длину l плоскости с окружностями оснований усеченного конуса вала. Положение отрезков 1-2 и 3-4 задано координатами (x, y, z) и углами наклона α_1 и α_2 , разность которых и определяет угол скручивания прутка на длине зоны обжатия l .

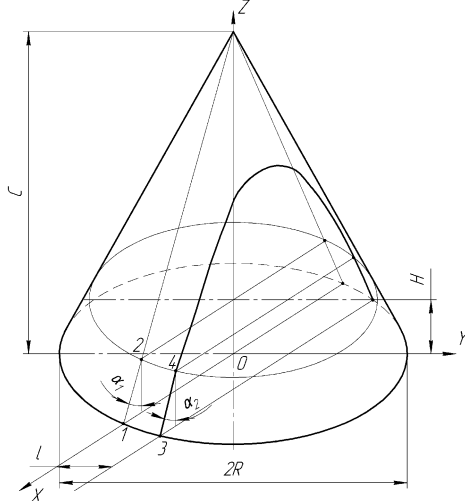


Рис.10. Расчетная схема угла скручивания полосы

В общем случае координаты точки 1 равны: $x=R$; $y=0$; $z=0$; точки 2: $x = R(1 - H/c)$; $y=0$; $z=H$. Отсюда $\tan \alpha_1 = R/c$; при $R=c$ $\alpha_1 = 45^\circ$.

Координаты точки 3: $y=l$; $z=0$. Координата x точки 3 определяется из выражения $(l^2 + x^2)/R^2 = 1$. Отсюда $x = \sqrt{R^2 - l^2}$.

Для точки 4: $y=l$, $z=H$,
 $x = \sqrt{R^2(1 - 2\frac{H}{c} + \frac{H^2}{c^2}) - l^2}$. Координата x определена из уравнения конуса.

Отсюда
 $\alpha_2 = \arctg \left[\frac{\sqrt{R^2 - l^2} - \sqrt{R^2(1 - 2\frac{H}{c} + \frac{H^2}{c^2}) - l^2}}{H} \right]$.

При $c=R$

$$\alpha_2 = \arctg \left[\frac{(\sqrt{R^2 - l^2} - \sqrt{(R-H)^2 - l^2})}{H} \right].$$

Если проводится прокатка квадратного профиля со стороной a из круглой заготовки диаметром d_0 , то абсолютное обжатие $\Delta h = d_0 - a$, а длина очага деформации (максимальная) $l = \sqrt{\Delta h \cdot \bar{R}}$, где $\bar{R} = R - a/\sqrt{2}$ - средний радиус конического вала в зоне обжатия.

Угол скручивания полосы на длине очага деформации $\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ в наибольшей степени зависит от относительного диаметра вала $A = 2\bar{R}/a$ и в существенно меньшей от вытяжки за проход $\lambda = S_0/S_1$, где S_0 и S_1 - площади сечения полосы соответственно на входе и выходе из зоны обжатия. В качестве примера на рис.11 приведена зависимость $\Delta \alpha$, град от A при вытяжке $\lambda = 1,5$.

Средняя в зоне обжатия сдвиговая деформация может быть без больших погрешностей определена выражением $\bar{\gamma} = \frac{\pi}{360} \cdot \frac{\Delta \alpha \cdot d_{\bar{\gamma}}}{l}$, где $d_{\bar{\gamma}} = 2\sqrt{\bar{S}}/\pi \approx 1,31\sqrt{\bar{S}}$ - средний эквивалентный диаметр полосы; $\bar{S} = (S_0 + S_1)/2$.

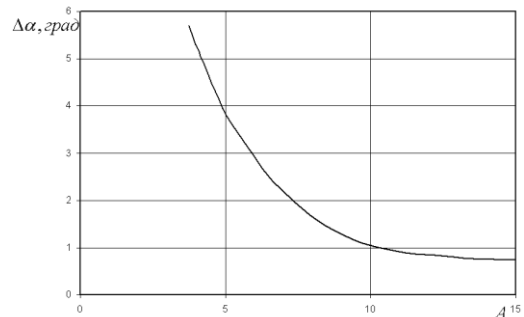


Рис.11. Характер влияния относительного диаметра валков на угол скручивания полосы в зоне обжатия при прокатке по схеме круг-квадрат с вытяжкой $\lambda = 1,5$

Если деформация кручения остается упругой в сечении заготовки радиусом $r_0 = d_0/2$, то сдвиговая деформация $\bar{\gamma}$ порождает тангенциальные касательные напряжения $\tau = \frac{\bar{\gamma} \cdot E}{2(1+\nu)}$, где E - модуль упругости первого рода; ν - коэффициент Пуассона.

На входе в очаг деформации сдвиговая деформация $\gamma_0 = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\Delta \alpha \cdot r_0}{l}$.

Если $\frac{\gamma_0 \cdot E}{2(1+\nu)} > \tau_s$, где τ_s - сопротивление сдвиговой деформации прокатываемого материала,

то реализуется упруго-пластическая деформация при кручении.

Сдвиговая деформация на границе упругой и пластической зон в этом слу-

чае $\gamma_0 = \frac{2\tau_s(1+\nu)}{E} = \frac{\Delta\alpha \cdot r_0}{l}$, где r_0 - радиус

кольцевой границы упругой и пластической зон. В упругой зоне касательное напряжение распределено линейно по радиусу сечения $\tau = \tau_s \cdot r/r_0$, а в пластической $\tau = \tau_s$. Крутящий момент при упру-

го-пластическом кручении $M = \frac{2}{3} \pi \tau_s \left(r_0^3 - \frac{1}{4} r_0^3 \right)$.

Этот крутящий момент, возникающий при скручивании входящей полосы уравновешен контактными давлениями в зоне обжатия.

В случае последовательной прокатки и, следовательно, без заневоливания входящего конца полосы, возникает скручивание, существенно превышающее величину $\Delta\alpha$, связанную с кручением за счет формы очага деформации, образованного коническими валками. Интенсивное кручение свободно входящего конца полосы наблюдается даже при малых обжатиях, когда крутящий момент от поперечных сил контактного трения явно не достаточен для упругопластического скручивания полос. Поскольку кинематическое, независимое от трения, упругопластическое кручение переводит, по крайней мере, периферийную часть металла сечения заготовки в пластическое состояние, дополнительно приложенный крутящий момент от сил трения значительно увеличивает общий угол скручивания полосы. Свободное кручение полосы на входе меняет кинематику течения металла и, очевидно, влияет на величину катающего диаметра, а также на положение, а возможно и форму критической линии на контактной поверхности.

Упрощенная описанная аналитическая модель очага деформации при прокатке на конических валках по схеме круг-квадрат не позволяет определить реальные углы скручивания полосы в зоне обжатия.

В случае заневоливания переднего конца полосы угол скручивания в зоне обжатия представляет сумму $\phi = \varphi + \gamma$, где φ - угол скручивания полосы в зоне обжатия при свободном переднем конце раската; γ - остаточный угол скручивания. Рост γ при уменьшении обжатия объясняется смятием контактной зоны при ее малой ширине

$b = \sqrt{d_1^2 - a^2}$ под действием возникающего в

очаге деформации крутящего момента M_ϕ . Хотя угол остаточного скручивания сравнительно мал, особенно в диапазоне практически приемлемых вытяжек, его следует учитывать при установке проводковых устройств последующих клеток непрерывной группы. В случае применения квадратного калибра в качестве чистового выводные проводки должны быть рассчитаны на возможность

раскручивания профиля с учетом упругого последующего действия, величина которого зависит от расстояния между плоскостями осей валков клетки и роликов раскручивающей проводки.

Аналитически удалось удовлетворительно описать функцию ϕ полного угла скручивания полосы в зоне обжатия и добиться приемлемого для практики совпадения с опытными данными с помощью достаточно искусственного приема условного разворота и смещения критической линии контактной поверхности до обнуления крутящего момента, то есть для удовлетворения равенству

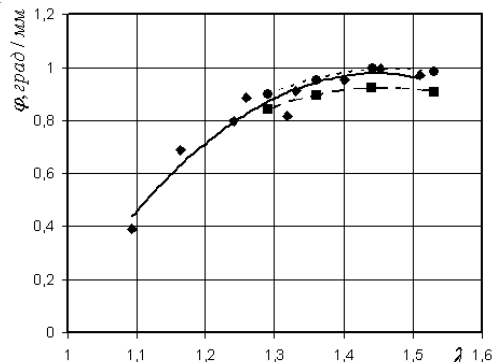
$$\int_0^{x_1} \int_{y_\phi}^{y_0} h_x dy dx + \int_{x_1}^l \int_{y_f}^{y_0} h_x dy dx = \int_{x_1}^l \int_{y_\phi}^{y_f} h_x dy dx$$

Результаты расчета удельного угла скручивания ϕ в зависимости от вытяжки и относительного диаметра валков представлены на рис.15.

Располагая данными по величине удельного угла скручивания, легко определить угол скручивания профиля длиной L после прокатного прохода с вытяжкой λ : $\phi_i = \phi \cdot L \cdot \lambda$, град; L, мм.

При этом случае деформация сдвига составит величину $\gamma_i = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\phi_i d_{ie}}{L}$, где d_{ie} - диаметр окружности, вписанной в контур поперечного сечения профиля.

При расчете достигнуто полное совпадение с опытными значениями удельных углов скручивания заготовки в зоне обжатия, по крайней мере, в диапазоне изменения коэффициентов вытяжки от 1,25 до 1,53 (рис.12) при $\psi = 0,8$. С уменьшением ψ , в частности до 0,6, уменьшается угол скручивания, что также наблюдалось при проведении экспериментов. В опытах удельное скручивание всегда возрастало после протирки образцов ацетоном и применения мела в качестве абразивного покрытия.



♦ - опытные данные; ■ - расчетные данные при $\psi = 0,6$; ● - расчетные данные при $\psi = 0,8$

Рис.12. Удельные (на 1 мм длины очага деформации) углы скручивания полосы в зоне обжатия при прокатке по схеме круг-квадрат

Что касается расчетного определения остаточных углов скручивания полос, то, как следует из

рис.13, совпадение с опытными значениями γ значительно хуже. Можно лишь наблюдать качественный характер зависимости γ от λ . Опытное определение γ затруднено из-за изгиба полос на выходе из валков, что может провоцировать экспериментальные ошибки.

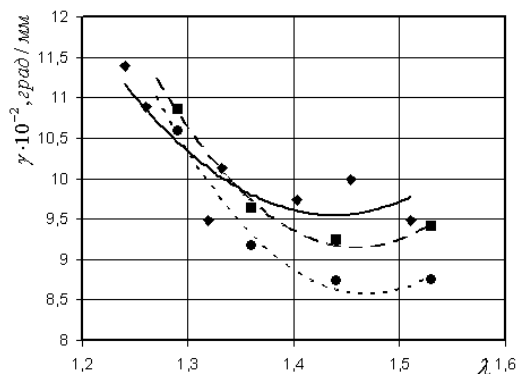


Рис.13. Удельные остаточные углы скручивания полосы после прокатки в квадратном калибре конических валков по схеме круг-квадрат:

◆ - опытные данные; ■ – расчетные данные при $\psi = 0,6$; ● – расчетные данные при $\psi = 0,8$

Анализ полученных опытных и расчетных данных говорит о том, что получение винтовой текстуры проката возможно в многовалковых калибрах. Однако существует ряд проблем при использовании клетей с многовалковыми калибрами, так как во всех известных конструкциях сортопрокатных и редуционных клетей используется электромеханический привод с длинными и сложными кинематическими цепями, с тиристорным и частотным управлением скоростью прокатки и уровнем межклетевых натяжений. При электромеханическом приводе увеличение количества валков усложняет конструкцию клетей и вынуждает применять либо привод не всех валков, либо вводить сложные трансмиссии. Редукторы, шпиндели, дополнительные зубчатые зацепления при любом качестве изготовления порождают люфты, увеличивающиеся по мере износа элементов привода. В момент выхода полосы из-за люфтов возникает асимметрия очага деформации и непредсказуемый изгиб выходящего из клетки конца полосы. Устранение концевых изгибов полос также является проблемой, решение которой позволяет снизить металлоемкость и упростить конструкции клетей и прокатных блоков.

Перечисленные проблемы эффективно решаются за счет установки индивидуального гидропривода валков клетки с многовалковыми калибрами [4]. Установка прямого без редукторного гидравлического привода, предлагаемого ЗАО НПП «МАШПРОМ», так же, дополнительно решает проблему уменьшения металлоемкости прокатных клетей и достижения простоты скоростного согла-

сование валков и клетей всего прокатного стана. Применение гидравлического безредукторного привода валков клетей позволяет повысить энерго-сбережение. Эффективность и принципиальная возможность использования гидравлического привода валков прокатных клетей уже обсуждались на втором и четвертом Конгрессах прокатчиков [5, 6].

Выводы

Сортовая прокатка по схеме круг-квадрат-круг в четырехвалковых калибрах конических валков – принципиально новый способ деформации с кручением, при котором возможно формирование спиральной текстуры проката, либо снижение контактных давлений благодаря дополнительным тангенциальным касательным напряжениям в очаге деформации.

Предложена упрощенная методика расчета удельных и общих углов скручивания проката, представлено сравнение с экспериментальными данными. Объем статьи не позволяет в полной мере провести сопоставление опытных и расчетных данных и вынуждает ограничиться декларацией не только качественной, но и количественной близости закономерностей, установленных с помощью показанной модели и при экспериментальном исследовании горячей прокатки.

Список литературы

1. Буркин С.П., Исхаков Р.Ф., Андрюкова Е.А. Особенности прокатки с кручением в многовалковых калибрах / Производство проката. - №9, 2008. – с. 34 – 36.
2. Буркин С.П., Исхаков Р.Ф., Андрюкова Е.А. Кинематические и силовые параметры прокатки в четырех валковых калибрах / Изв. вузов. Черная металлургия. - №10, 2008, - с.34-40.
3. Узел валков прокатного стана: а.с. 1202645 СССР / Ю.В. Полторапавло, В.А. Феник, В.Г. Гром / Заявит. ДонНИИЧермет. Заявл.02.07.84. Оpubл. в Б.И., №1, 1986. - с.12.
4. Буркин С.П., Шимов В.В., Исхаков Р.Ф., Андрюкова Е.А. Совершенствование техники и технологии прокатки в многовалковых калибрах: учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. 362 с
5. Буркин С.П., Логинов Ю.Н., Шимов В.В. Технологические особенности применения гидропривода рабочих валков чистовых и калибровочных прокатных блоков // Труды второго Конгресса прокатчиков. - М.: Черметинформация, 1998. - с.321-331.
6. Буркин С.П., Шимов В.В., Волков С.М. Перспективы применения гидропривода валков непрерывных прокатных станов // Труды четвертого конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 16-19 октября 2001. - М.: Черметинформация, 2002. – с. 288-294