

## Глава 12. СТАН ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ С РЕВЕРСИВНОЙ КАЛИБРОВКОЙ

Клубович В.В., Томило В.А., Левкович В.В.  
Физико-технический институт НАН Беларуси  
г. Минск, Беларусь, E-mail: victor.levkovich@gmail.com

### Введение

Трубные детали находят широкое применение в современном машиностроении. Использование в конструкции заготовки трубного сечения позволяет добиться уменьшения расхода металла и облегчения веса. Другое важное свойство полых деталей – они менее чувствительны к концентрации напряжений при циклических нагрузках, в особенности при упрочнении поверхностным пластическим деформированием (ППД), т.к. возникающие в них остаточные напряжения смещаются ближе к поверхности и превосходят по величине остаточные напряжения, возникающие в сплошных деталях того же диаметра. Т. о. наличие в полой детали продольного отверстия изменяет напряженное состояние детали и обеспечивает высокие эксплуатационные качества. Наиболее распространенным типом осевых толстостенных трубных заготовок переменного профиля является трубная заготовка с обжатом концом с одной стороны – цапфа, или с обоих концов – ось. Широта применения в промышленности трубных деталей обуславливает присутствие широкого спектра технологических решений для их получения: обжим в штампах с вертикальным и горизонтальным положением поковки, с применением ротационных и радиально-ковочных машин (РКМ), используя процессы гидроэкструзии и различные методы, основанные на продольной прокатке.

Технология поперечно-винтовой прокатки является эффективным способом получения осевых трубных заготовок переменного профиля с точки зрения автоматизации, производительности и качества. Согласно литературным источникам [1–2] на агрегатах с трехвалковым раскатным станом можно выдерживать наружный диаметр с допуском  $\pm 0,5\%$  от номинального диаметра трубы; получать трубы с разностенностью, не превышающей  $\pm 6\%$  от номинальной толщины стенки (что в 2–3 раза превышает точность размеров труб, получаемых на других агрегатах). Схема деформации близка к схеме всестороннего сжатия, которая обеспечивает максимально возможную пластичность даже труднодеформируемых сплавов. На рисунке 1 заштрихованная область показывает сортамент труб, наиболее часто обрабатываемых на трубопрокатных агрегатах (ТПА) с трехвалковым раскатным станом [3].

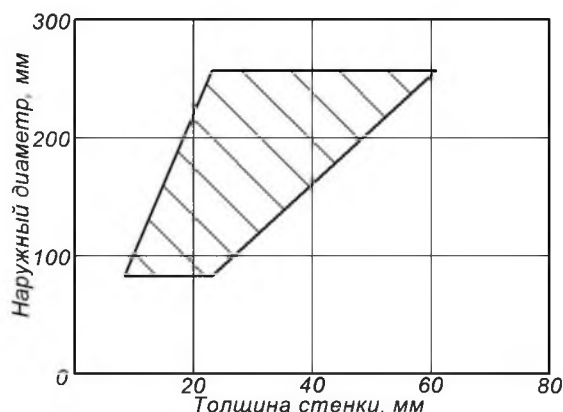


Рисунок 1 – Сортамент труб, обрабатываемых на традиционных ТПА со станом Асселя

### Описание стана и его характеристики

В ФТИ НАН Беларуси создан автоматизированный комплекс для точного формообразования наружных поверхностей переменного профиля поволоков осей и цапф. На рисунке 2 приведено изображение комплекса, введенного в эксплуатацию на ОАО «Бобруйскагромаш».

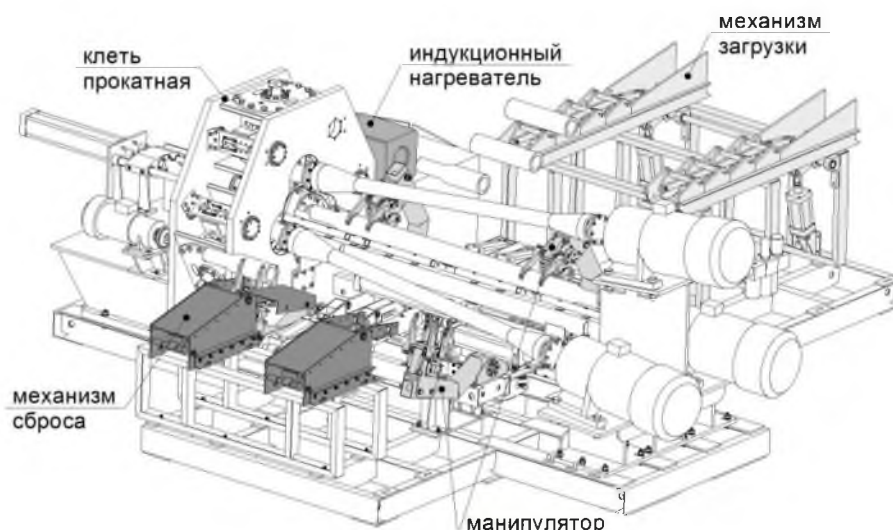


Рисунок 2 – Автоматизированный комплекс поперечно-винтовой прокатки

Комплекс работает следующим образом. Детали укладываются в механизм загрузки, который при работе поштучно выдает заготовки манипулятору, находящемуся в позиции загрузки. Затем заготовку манипулятором перемещают на позицию нагрева и подают в индуктор, где происходит ее нагрев до ковочной температуры от генератора ТВЧ (не показан на рисунке). Длина нагреваемой части заготовки 270–300 мм. Далее заготовку извлекают из индуктора и укладывают манипулятором на направляющую. На направляющей толкатель, установленный согласно длине детали, перемещает заготовку к прокатной клетке. Прокатная клетка представляет собой две плиты, между которыми через  $120^\circ$  располагаются барабаны с установленными в них корпусами валков. Корпуса валков имеют возможность поворота вокруг своей оси для изменения угла подачи. Привод осуществляется от электродвигателя через цепную передачу и механизм винт–гайка. Межвалковый зазор регулируется нажимными винтами с контргайками. Вращающиеся валки за счет отличного от нуля угла подачи производят захват заготовки и производят обжим, в процессе которого заготовка вращается и перемещается вдоль своей оси. При достижении обжатой частью заготовки необходимой длины происходит автоматическое изменение угла подачи в область отрицательных значений, что позволяет вывести поковку из межвалкового зазора и получить калиброванный переходный конусный участок между обжатой и необжатой частями поковки. После обжима заготовку выводят из клетки выталкивателем, установленным на выходной стороне клетки, и манипулятором перемещают к механизму сброса.

В таблице 1 приведены основные технические характеристики комплекса.

Таблица 1 – Технические характеристики комплекса

Наименование показателя	Значение
Габаритные размеры комплекса, мм, не более (без шкафов электрооборудования и генератора ТВЧ)	
- длина	5500
- ширина	5200
- высота	1600
Масса комплекса, кг, не более	10820
Питающая сеть	3~220/380 В, 50 Гц
Номинальная мощность установленных двигателей, кВт	3×11
Номинальная мощность генератора ТВЧ, кВт	320
Максимальный диаметра заготовки, мм, не более	360
Минимальный диаметр заготовки, мм, не менее	50
Максимальная длина прокатываемой части заготовки, мм, не более	350

Наименование показателя	Значение
Количество валков	3
Диаметр валка в точке пережима, мм	300
Угол подачи валков ( $\alpha$ ), град.	$\pm 12$
Угол раскатки ( $\beta$ ), град.	6
Угол раствора входного участка валка, град.	18
Частота вращения прокатных валков, мин <sup>-1</sup>	20
Давление подводимого сжатого воздуха, МПа, не менее	0,4
Давление подводимой технической воды, МПа	0,3 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,15</sub>
Температура подводимой технической воды, °С	10-30
Количество мех. примесей в технической воде, мг/л	$\leq 20$
Жесткость технической воды, мг. экв/л	$\leq 7$
рН	5-7,5
Расход подводимой технической воды, м <sup>3</sup> /ч	2,4

### Геометрия поковок

При прокатке наблюдается увеличение толщины стенки поковок, что видно на рисунке 3 (продольное сечение поковки, прокатанной на стане поперечно-винтовой прокатки, и результаты моделирования методом конечных элементов). Данное явление вызвано неравномерностью деформации, оценивать которую можно по величине накопленной деформации.

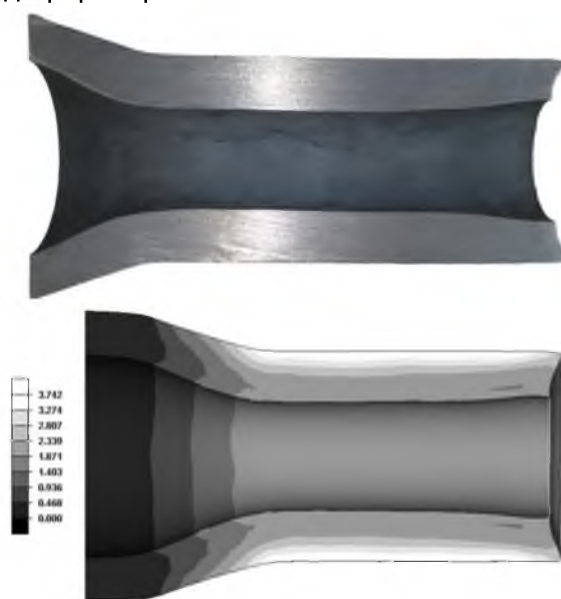


Рисунок 3 – Продольное сечение поковки

На рисунке 3 показана интенсивность пластических деформаций, иллюстрирующая разницу в количестве накопленной деформации во внешних и внутренних слоях, которая достигает 225%.

На рисунках 4-5 представлены изменение толщины стенки по длине заготовки при различных значениях вытяжки и зависимость относительного увеличения толщины стенки поковки от степени деформации соответственно.

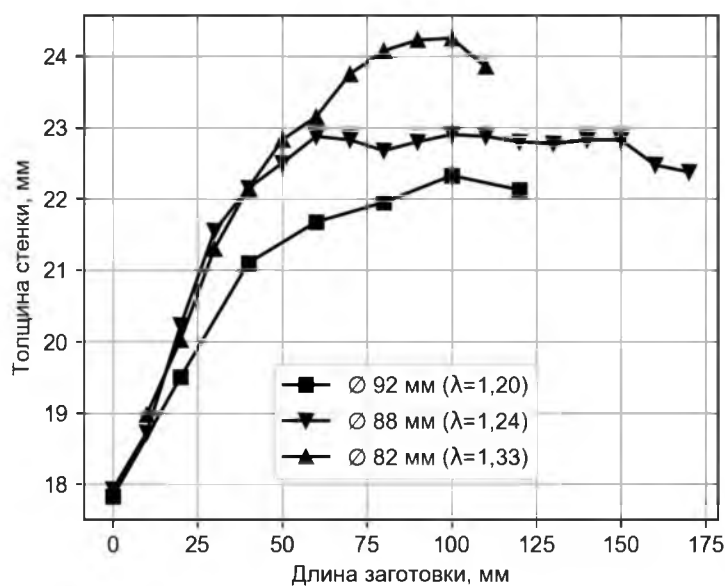


Рисунок 4 – Изменение толщины стенки поковки при различных вытяжках

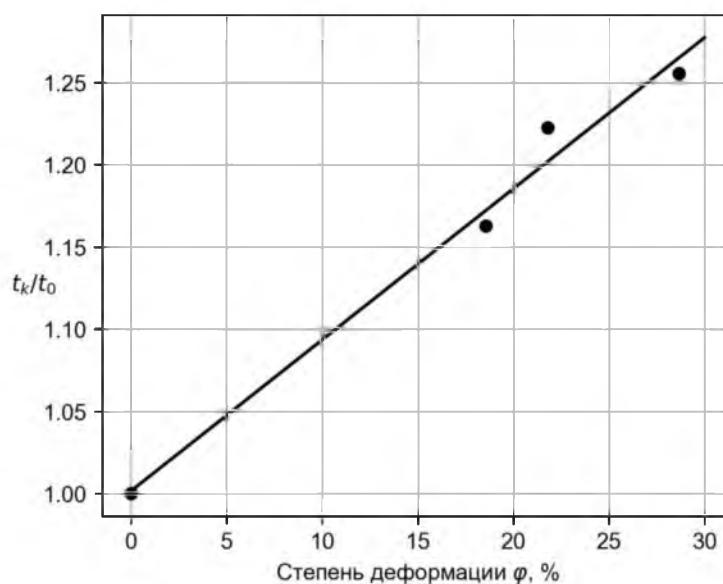


Рисунок 5 – Зависимость относительного изменения толщины стенки поковки от степени деформации

При проведении экспериментов применялась заготовка  $\varnothing 121 \times 18$  мм, обжимаемая до следующих диаметров: 82, 88, 92 мм. Соответствующие данным размерам показатели деформации приведены в таблице 2.

Среди факторов, оказывающих влияние на неравномерность деформации, стоит упомянуть наличие трения на контактной поверхности и напряженно-деформированное состояние (НДС). Зависимость неравномерности деформации от данных факторов объясняется их влиянием на сопротивление деформации.

Таблица 2 – Вытяжка, обжатие и степень деформации

Внешний диаметр поковки, мм	Средняя вытяжка $\lambda$	Среднее обжатие $\varepsilon$ , %	Степень деформации $\varphi$
92	1,20	16,94	0,19
88	1,24	19,59	0,22
82	1,33	24,92	0,29

### Компоненты скоростей и сил при поперечно-винтовой прокатке

На рисунке 6 приведена схема поперечного сечения очага деформации.

Введена система прямоугольных координат  $oxyz$  с началом в любой рассматриваемой точке  $O$  контактной поверхности. Ось  $ox$  совпадает с направлением оси прокатки, ось  $oy$  – с направлением вращения и  $oz$  – с направлением радиуса обрабатываемого тела.

Углы  $\omega$  и  $\psi$  представляют собой углы меридионального сечения валка и заготовки соответственно. Максимальное значение угла  $\omega$  составляет  $14^\circ$ , угла  $\psi$  –  $37,39^\circ$ .

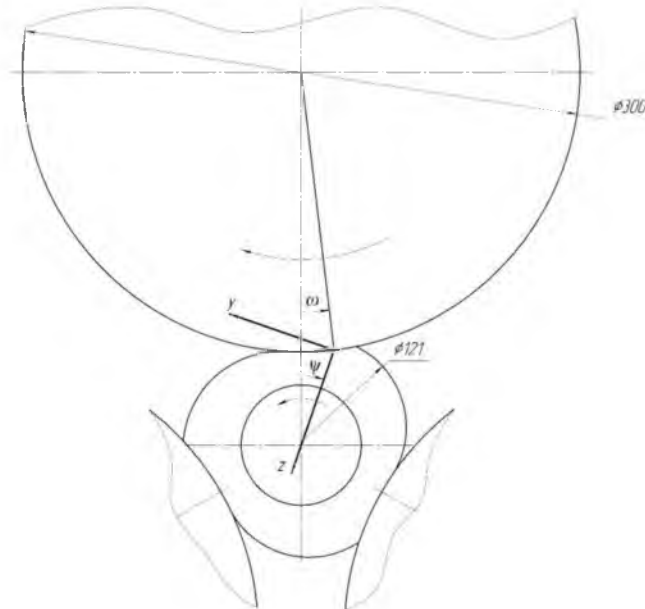


Рисунок 6 – Схема поперечного сечения

Компоненты окружной скорости и нормального давления на контактной поверхности металла с валками определены по уравнениям, приведенным ниже.

Направляющие косинусы окружной скорости валка  $u$  и ее компоненты вычислены по уравнениям (1–2).

$$\begin{aligned} l_u &= \sin \alpha \cos \omega - \cos \alpha \sin \beta \sin \omega; \\ m_u &= (\cos \alpha \cos \omega + \sin \alpha \sin \beta \sin \omega) \cos \psi - \cos \beta \sin \omega \sin \psi; \\ n_u &= (\cos \alpha \cos \omega + \sin \alpha \sin \beta \sin \omega) \sin \psi + \cos \beta \sin \omega \cos \psi. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} u_x &= l_u u; \\ u_y &= m_u u; \\ u_z &= n_u u. \end{aligned} \quad (2)$$

Компонент  $u_x$  представляет собой скорость подачи (перемещения) и называется компонентом осевой подачи или скоростью подачи,  $u_y$  – скорость вращения и называется компонентом вращения или скоростью вращения,  $u_z$  – скорость деформирования и называется компонентом скорости деформации.

$$u = \frac{\pi n}{30} R = 314,16 \text{ мм/с.}$$

Окружная скорость на бочке валка

На основе вычисленных данных построены зависимости компонентов окружной скорости валка от угла  $\omega$ , приведенные на рисунке 7.

Анализ данных показывает, что скорость подачи остается постоянной на всей длине дуги контакта, скорость вращения возрастает по мере перехода от входа в очаг деформации до выхода, скорость деформирования является максимальной при входе в очаг деформации и падает до нуля в основной меридиональной плоскости валка.

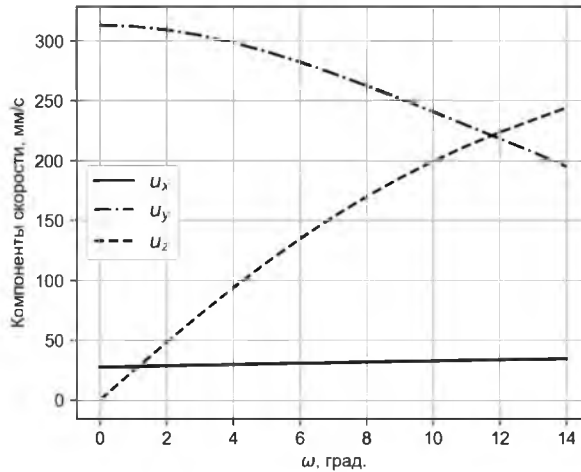


Рисунок 7 – Компоненты окружной скорости валка

Направляющие косинусы нормального давления  $N$  и его компоненты определены по уравнениям (3–4).

$$l_N = (-\cos \alpha \sin \beta \cos \omega - \sin \alpha \sin \omega) \cos \varphi + \cos \alpha \cos \beta \sin \varphi;$$

$$m_N = (-\sin \alpha \cos \beta \cos \psi - \sin \beta \sin \psi) \sin \varphi -$$

$$- (-\sin \alpha \sin \beta \cos \omega \cos \psi + \cos \alpha \sin \omega \cos \psi + \cos \beta \cos \omega \sin \psi) \cos \varphi;$$

$$n_N = (-\sin \alpha \cos \beta \sin \psi + \sin \beta \cos \psi) \sin \varphi +$$

$$+ (\cos \beta \cos \omega \cos \psi + \sin \alpha \sin \beta \cos \omega \sin \psi - \cos \alpha \sin \omega \sin \psi) \cos \varphi.$$

$$N_x = l_N N;$$

$$N_y = m_N N;$$

$$N_z = n_N N.$$

Усилие, действующее на валок, при обжиме трубы  $\varnothing 121 \times 18$  мм вычислено в работах [4–5] и составляет 82,2 кН.

Компоненты или проекции вектора нормального давления на ось прокатки или на ось  $ox$  обозначены через  $N_x$ , на направление вращения обрабатываемого тела или на ось  $oy$  – через  $N_y$ , на радиальное направление обрабатываемого тела или на ось  $oz$  – через  $N_z$ .

На рисунке 8 построены зависимости компонентов нормального давления  $N$  от угла  $\omega$ .

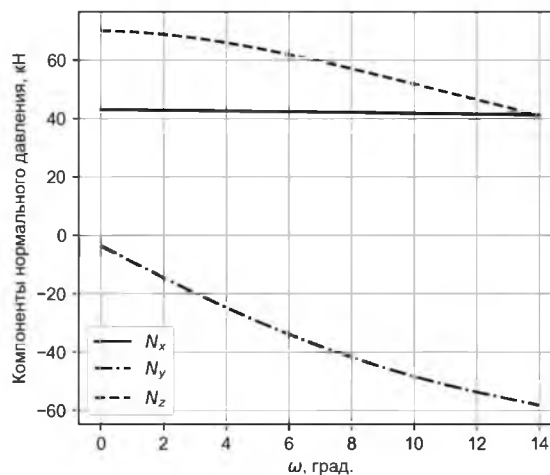


Рисунок 8 – Компоненты нормального давления валка

Компонент нормального давления, связанный с осевым направлением оси прокатки, представляет собой силу, с которой обрабатываемое тело под действием нормального давления выталкивается из валков. По всей дуге очага деформации  $N_x$  остается постоянным. Если компонент нормального давления, действующий в тангенциальном направлении, умножить на радиус обрабатываемого тела, то получим момент нормального давления, приложенный к обрабатываемому телу. В основной меридиональной плоскости валка  $N_y$  близок нулю, у входа в очаг деформации  $N_y$  имеет минимальное значение, т.е., являясь отрицательным, данный компонент нормального давления создает момент сопротивления вращению заготовки. Компонент нормального давления, действующий в радиальном направлении, представляет собой кующую силу нормального давления и максимальное значение имеет в основной меридиональной плоскости.

Направляющие косинусы силы трения  $T$  и ее компоненты вычислены по уравнениям (5–6).

$$\begin{aligned}
 l_T &= \frac{(1-\eta_x)l_u}{\sqrt{(1-\eta_x)^2 l_u^2 + (1-\eta_y)^2 m_u^2 + \left[ (1-\eta_x)l_u \frac{l_N}{n_N} + (1-\eta_y)m_u \frac{m_N}{n_N} \right]^2}}; \\
 m_T &= \frac{(1-\eta_y)m_u}{\sqrt{(1-\eta_x)^2 l_u^2 + (1-\eta_y)^2 m_u^2 + \left[ (1-\eta_x)l_u \frac{l_N}{n_N} + (1-\eta_y)m_u \frac{m_N}{n_N} \right]^2}}; \\
 n_T &= \frac{(1-\eta_x)l_u \frac{l_N}{n_N} + (1-\eta_y)m_u \frac{m_N}{n_N}}{\sqrt{(1-\eta_x)^2 l_u^2 + (1-\eta_y)^2 m_u^2 + \left[ (1-\eta_x)l_u \frac{l_N}{n_N} + (1-\eta_y)m_u \frac{m_N}{n_N} \right]^2}};
 \end{aligned} \tag{5}$$

где  $\eta_x$ ,  $\eta_y$  – коэффициент скорости металла относительно валков в направлении оси прокатки  $ox$  (коэффициент осевой скорости) и вращения обрабатываемого тела  $ou$  (коэффициент тангенциальной скорости) соответственно.

$$\begin{aligned}
 T_x &= l_T T; \\
 T_y &= m_T T; \\
 T_z &= n_T T.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Исходя из рекомендаций, описанных в литературных источниках [6], учитывающих угол раствора, угол подачи, окружную скорость валков и их размеры, принято следующее среднее значение коэффициента осевой скорости в очаге деформации:  $\eta_x=0,77$ .

Коэффициент тангенциальной скорости  $\eta_y$  принят переменным и вычислен следующим образом. Коэффициент  $\eta_y$  входит в уравнение (5) и таким образом влияет на направление силы трения. На рисунке 9 приведена схема, изображающая направление компонентов силы трения  $T_y$  и  $T_z$ , а также их результирующей силы  $T$ , направленной по касательной к валку.

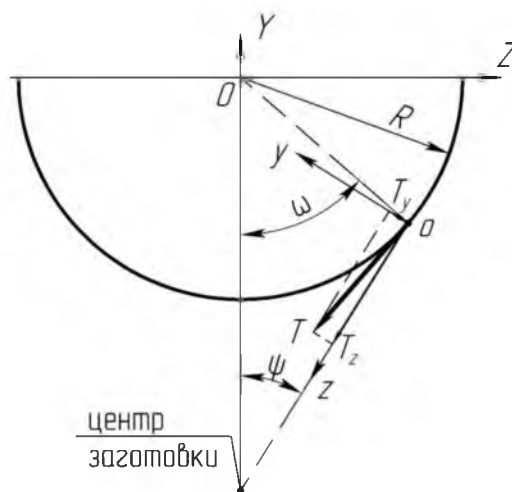


Рисунок 9 – Схема контакта поверхности валка и заготовки

Уравнение, определяющее окружность радиусом  $R$  с центром в точке  $(0,0)$  в системе координат  $ZOY$  имеет вид:

$$Z^2 + Y^2 = R^2. \quad (7)$$

Касательная к поверхности валка в системе координат  $ZOY$  имеет следующий наклон по отношению к положительному направлению оси  $OZ$  (производная  $dY/dZ$  уравнения (7)):

$$\frac{d}{dZ} Y = \frac{-Z}{Y} = \frac{-Z}{\sqrt{R^2 - Z^2}}. \quad (8)$$

Значения компонентов  $T_y$  и  $T_z$ , вычисленные по уравнениям (6) в системе координат  $zoу$ , определяют наклон силы трения  $T$  по отношению к положительному направлению оси  $OZ$ . В системе координат  $ZOY$  вектор результирующей силы  $T$  с учетом преобразования координат будет иметь наклон с положительным направлением оси  $OZ$ , выраженный следующим уравнением:

$$k = \frac{-T_z \cdot \sin(90 - \psi) + T_y \cdot \cos(90 - \psi)}{-T_z \cdot \cos(90 - \psi) - T_y \cdot \sin(90 - \psi)}. \quad (9)$$

Для обеспечения верного направления силы трения  $T$  необходимо равенство наклонов касательной к поверхности валка и силы трения:

$$\frac{dY}{dZ} = k; \quad (10)$$

$$\frac{-Z}{\sqrt{R^2 - Z^2}} = \frac{-T_z \cdot \sin(90 - \psi) + T_y \cdot \cos(90 - \psi)}{-T_z \cdot \cos(90 - \psi) - T_y \cdot \sin(90 - \psi)}.$$

Из уравнения (10) вычислены значения  $\eta_y$  по длине дуги контакта металла с валком и показаны на рисунке 10.



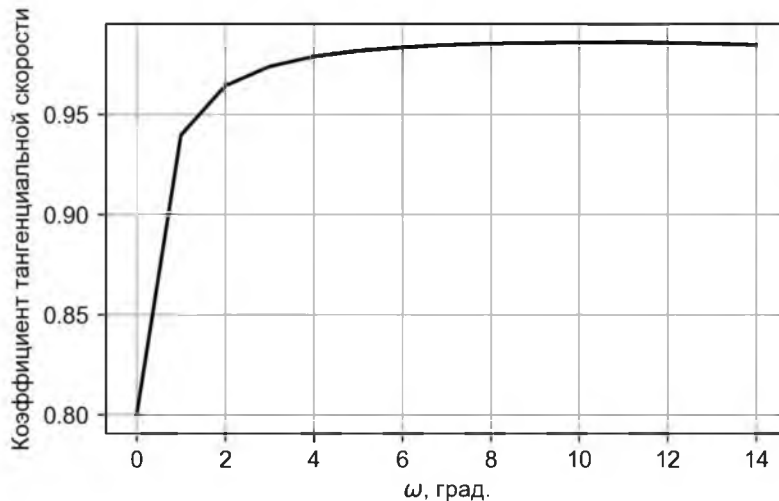


Рисунок 10 – Распределение коэффициента тангенциальной скорости в плоскости, нормальной оси прокатки в точке пережима валков

Компоненты сил трения оказывают влияние на напряженное состояние и сопротивление деформации, качество продукции и износ инструмента, условия захвата металла, условия равновесия и движения обрабатываемого тела, расход энергии и т.п.

Сила трения перпендикулярна нормальному давлению и лежит в плоскости, касательной к поверхности валка в данной точке. Направление силы трения должно в этой плоскости быть противоположным вектору скорости относительного перемещения или вектору скольжения поверхности валка на поверхности металла.

Зависимости компонентов силы трения  $T$  от угла  $\omega$  приведены на рисунке 11.

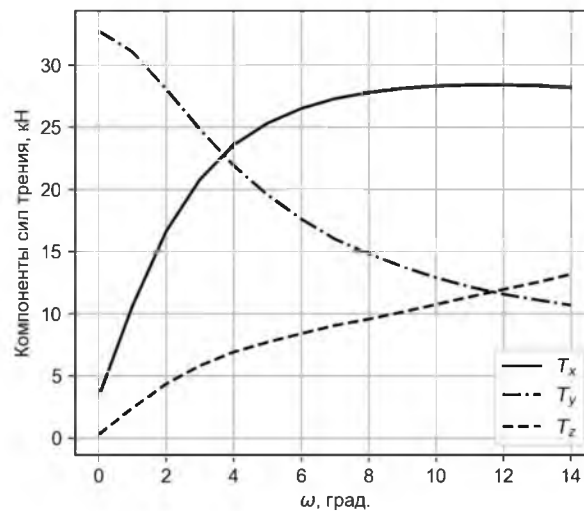


Рисунок 11 – Компоненты силы трения

Под действием составляющих  $T_x$  осуществляется движение обрабатываемого тела в направлении его оси, под действием составляющих  $T_y$  обрабатываемое тело вращается (данный компонент является положительным по всей длине дуги контакта и создает момент вращения заготовки) и под действием составляющих  $T_z$  обрабатываемое тело подвергается в радиальном направлении обжатю.

На основе полученных данных (компоненты окружной скорости, нормального давления и силы трения) создана картина распределения сил нормального давления, сил трения и их результирующих в поперечном сечении очага деформации в области пережима валков (приведена на рис.12).

Согласно теоретическим данным, проекции векторов сил трения на ось прокатки во всех точках очага деформации имеют направление, противоположное направлению перемещения металла. Следовательно, в осевом направлении по всему очагу деформации наблюдается только отставание металла. Проекция векторов сил трения на плоскость, перпендикулярную оси прокатки, направлены против вращения заготовки по всей длине очага деформации, за исключением небольшого участка в его начале [7]. Следовательно, в тангенциальном направлении на данном участке присутствуют зоны отставания и опережения, на оставшейся длине очага деформации наблюдается только отставание металла (коэффициент тангенциальной скорости  $\eta_t$  меньше 1).

Как видно из рисунка 12, он на качественном уровне соответствует теоретическим представлениям о направлениях сил, действующих на контакте заготовка–валок.

Как следует из рисунка 12, проекция вектора силы трения в поперечном сечении возрастает при приближении к основной меридиональной плоскости валка, что является одной из причин неравномерности деформации. Момент результирующего усилия создает моменты вращения и сопротивления в зависимости от угла  $\omega$ . При  $\omega > 10^\circ$  результирующая сила создает момент сопротивления вращению заготовки при прокатке.

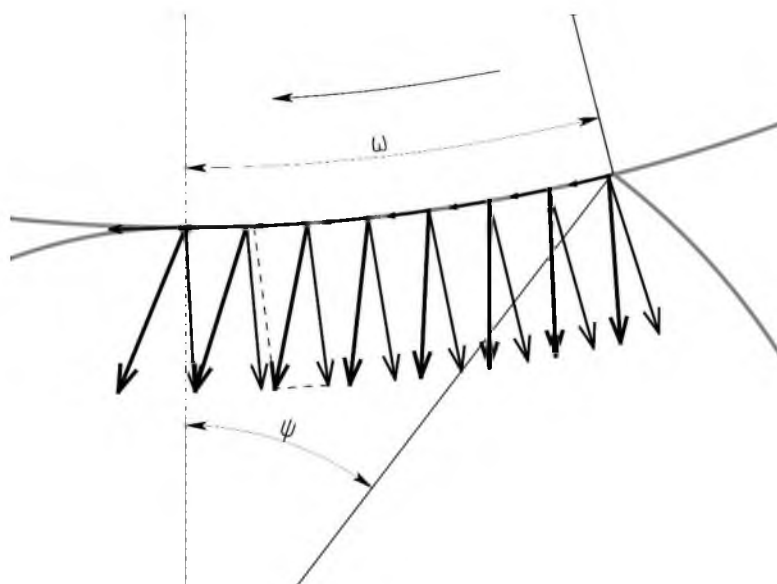


Рисунок 12 – Силы трения, нормального давления и их результирующие в сечении, нормальном оси прокатки

В работе [8] исследовано НДС заготовок в процессе прокатки. В местах контакта валков с заготовкой (угол  $\omega$  стремится к нулю) наблюдается ярко выраженная схема всестороннего сжатия и возрастание напряжений сжатия до 120-130 МПа.

На рисунках 11-12 можно определить направление вектора силы трения: на рисунке 12 проекция вектора силы трения в поперечном сечении возрастает по мере приближения к основной меридиональной плоскости валка, на рисунке 11 составляющая  $T_x$  падает при уменьшении угла  $\omega$ , т.е. вектор силы трения отклоняется в направлении вращения.

### Заключение

Неравномерность деформации определяет окончательные геометрические параметры поковок. В исследованном интервале степеней деформации (19-29%) толщина стенки поковок увеличивалась в 1,16-1,26 раза.

**Список литературы:**

1. Барабашкин, В.П. Производство труб на агрегатах с трехвалковым раскатным станом / В.П. Барабашкин, И.К. Тартаковский. – М.: Металлургия, 1981. – 148 с.
2. Машины и агрегаты трубного производства: учебное пособие для вузов / А.П. Коликов [и др.]; под ред. А.П. Коликова. – М.: МИСИС, 1998. – 536 с.
3. Романцев Б.А. Мини-трубопрокатный агрегат 40-80 с трехвалковым раскатным станом винтовой прокатки / Б.А. Романцев, А.С. Алещенко, А.В. Гончарук, С.П. Галкин // *Металлург.* – 2011. – № 12. – С. 69–73.
4. Томило, В.А. Технология валкового обжима концевых участков толстостенных труб / В.А. Томило, В.В. Левкович, А.И. Михлюк, И.И. Вегера // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 3. Обработка металлов давлением / редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]*. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2013. – С. 116–123.
5. Томило, В.А. Определение энергосиловых параметров при валковом обжиме толстостенных труб / В.А. Томило, В.В. Левкович, В.А. Францкевич // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 3. Обработка металлов давлением / редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]*. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. – С. 129–135.
6. Тетерин, П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки / П.К. Тетерин. – М.: Металлургия, 1971. – 368 с.
7. Потапов, И.Н. Технология винтовой прокатки / И.Н. Потапов, П.И. Полухин. – Изд. 2-е – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
8. Томило, В.А. Напряженно-деформированное состояние при валковом обжиме участков труб / В.А. Томило, В.В. Левкович // *Весці НАН Беларусі. Сер. фіз-тэхн. навук.* – 2014. – № 4. – С. 24–30.