



Force parameters of drifting cylindrical stock materials process by a mandrel plugging sections of cylindrical, conic, spherical and paraboloidal surfaces are certain.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Президиум НАН Беларуси,
В. В. КЛУБОВИЧ, Г. М. ЖДАНОВИЧ, ИТА НАН Беларуси,
Л. А. ИСАЕВИЧ, БНТУ,
В. А. ТОМИЛО, ИТА НАН Беларуси

УДК 621.771

РАСЧЕТ УСИЛИЯ ПРОШИВКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРУБ

Прошивка заготовок в прошивных прокатных станах осуществляется с помощью двух или трех рабочих валков, расположенных под определенным углом друг к другу и вращающихся синхронно в одну сторону, за счет чего сплошная заготовка и формообразуемая из нее труба вращаются и одновременно смещаются по оправке-прошивню. Любая точка на поверхности заготовки в процессе прошивки-прокатки описывает винтовую линию. Благодаря этому прошивка-прокатка сплошных заготовок в полое изделие (трубу или гильзу) в прошивных прокатных станах называется косой, винтовой, поперечно-винтовой или геликоидальной прокаткой [1–3]. Прокатные валки в прошивных прокатных станах могут быть разной формы, но при неперемном условии, что они должны образовывать очаг деформации, ограниченный двумя косинусами. В основном применяют бочкообразные, дисковые и грибовидные валки.

На участках заготовки, контактирующих входными конусами валков, вследствие их силового воздействия, в металле возникают радиальные напряжения сжатия, достигающие максимальной величины на поверхности контакта с валками. При переходе от поверхности контакта валков к оси заготовки радиальные сжимающие напряжения уменьшаются, поскольку распределяются по большей площадке. В частях заготовки, не подвергающихся в рассматриваемый момент непосредственному силовому воздействию валков, возникают дополнительные радиальные напряжения, которые могут быть растягивающими или сжимающими в зависимости от расположения этих частей по отношению к рабочим валкам. В процессе обжатия вращающейся заготовки радиальные растягивающие напряжения, возникающие в зонах, переставших контактировать с валками, не успевают уменьшиться при последующем кратковременном контакте с валками. В результате сумма радиальных растягивающих и дополнитель-

ных от неравномерной деформации напряжений вызывает разрыхление центральной части заготовки, что способствует ее прошивке.

Для технологических расчетов энергосиловых параметров процесса прокатки-прошивки трубных заготовок при ковочной температуре целесообразно сначала теоретически определить усилие прошивки, а затем использовать полученные уравнения для расчета крутящих моментов на валках и углов их установки, необходимых для обеспечения гарантированной прошивки. Прошивка при винтовой прокатке по схеме деформирования близка к открытой прошивке, поскольку боковая поверхность деформируемой части заготовки вне контакта с валками является свободной, а силовое воздействие валков носит локальный характер.

Рассмотрим случай прошивки заготовки конической оправкой-прошивнем (рис. 1).

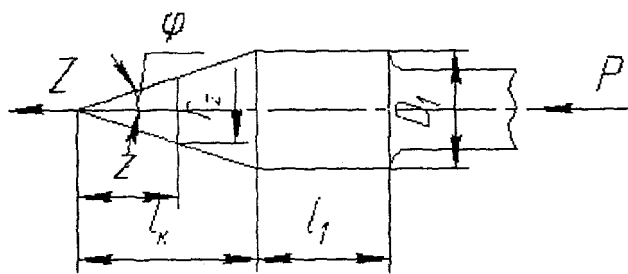


Рис. 1. Оправка-прошивень конической формы

Для решения поставленной задачи воспользуемся известным [4] уравнением для расчета средних значений нормальных контактных напряжений при внедрении плоского пуансона в полупространство без контактного трения:

$$P = 2k(1 + \omega), \quad (1)$$

где k – пластическая постоянная; ω – величина угла поворота линий скольжения.

Приведенная формула справедлива для случая плоского деформированного состояния, когда

$$K = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_T,$$

где σ_T — предел текучести материала заготовки. С учетом этого уравнение (1) можно записать в виде

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T (1 + \omega) = \beta \sigma_T (1 + \omega).$$

Здесь параметр Лодэ β принимает свое максимальное значение.

В то же время известно [4], что он изменяется в пределах $1,0 \leq \beta \leq 1,15$ и при равенстве двух главных напряжений осесимметричное напряженное состояние принимает минимальное значение $\beta = 1$. В данном случае будем полагать, что $2k \approx \sigma_T$.

Уравнение (1), относящееся к случаю плоской деформации, когда пуансон имеет форму клина неограниченной длины, очевидно, с достаточным приближением можно использовать и при внедрении в полупространство осесимметричный пуансон цилиндрической или конической формы.

В случае внедрения пуансона конической формы величина угла поворота линий скольжения определяется как:

$$\omega = \frac{\pi}{2} + \varphi. \quad (2)$$

С учетом этого уравнение (1) примет вид

$$P = \sigma_T (1 + \frac{\pi}{2} + \varphi). \quad (3)$$

Анализируя (3), нетрудно заметить, что в случае $\varphi = \frac{\pi}{2}$

$$P = \sigma_T (1 + \pi),$$

что и характерно для задачи прошивки цилиндрической заготовки цилиндрическим прошивнем с плоским торцом [4].

Не вызывает сомнений то обстоятельство, что усилие прошивки прокатки непосредственно зависит от геометрии оправки-прошивня. Усилие прошивки и условия теплоотвода в конечном итоге определяют надежность и долговечность инструмента. В практике трубопрокатного производства оптимальная форма прошивня определяется экспериментально и состоит из участков цилиндрической, конической, сферической и параболоидной поверхностей.

Используя принцип независимости силовых факторов, общую величину усилия прошивки-прокатки для рассматриваемой формы инструмента можно записать в виде суммы семи слагаемых:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7, \quad (4)$$

где P_1, P_2, P_3 — соответственно усилие прошивки-прокатки на сферическом коническом и параболоидном участках инструмента; P_4, P_5, P_6, P_7 — соответственно усилие контактного трения на сферическом, коническом, параболоидном и цилиндрическом участках прошивня.

Элементарную величину усилия dP_1 (рис. 2), а также уравнение (3) запишем в следующем виде:

$$dP_1 = \sigma_T (1 + \frac{\pi}{2} + \varphi) 2\pi r_\varphi r d\varphi \sin \varphi. \quad (5)$$

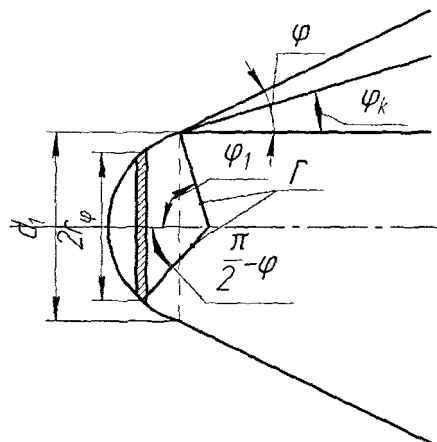


Рис. 2. Схема сферической части оправки-прошивня с притыкающимся коническим участком

Из рис. 2 следует, что

$$\varphi_k \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, \quad \varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \varphi_k, \quad (6)$$

где φ — угол наклона касательной к элементарному сферическому слою; r — радиус сферы; φ_k — угол наклона образующей конуса; r_φ — радиус сферического слоя в сечении, причем

$$r_\varphi = r \sin(\frac{\pi}{2} - \varphi), \quad 0 \leq r_\varphi \leq \frac{d_1}{2}, \quad r_\varphi = r \cos \varphi. \quad (7)$$

С учетом последних соотношений выражение (5) запишем в следующем виде:

$$dP_1 = \sigma_T (1 + \frac{\pi}{2} + \varphi) 2\pi r^2 \sin \varphi \cos \varphi d\varphi. \quad (8)$$

После интегрирования и соответствующих преобразований получим

$$P_1 = \sigma_T (1 + \frac{\pi}{2}) \frac{\pi d_1^2}{8} \times \left[(1 + \frac{\pi}{2}) + (1 + \varphi_k) \cos 2\varphi_k - \frac{1}{2} \sin 2\varphi_k \right]. \quad (9)$$

Величину усилия прошивки на коническом участке прошивня P_2 определяем, используя уравнение (3), в котором следует принять $\varphi = \varphi_k$:

$$P_2 = \sigma_T (1 + \frac{\pi}{2} + \varphi_k) \frac{\pi}{4} (D_1^2 - d_1^2). \quad (10)$$

Элементарную величину усилия контактного трения на сферическом участке прошивня dP_4 запишем в следующем виде:

$$dP_4 = \tau_k 2\pi r_\varphi r d\varphi \cos \varphi. \quad (11)$$

Из рис. 2 видно, что величина радиуса

$$r_\varphi = r \sin(\frac{\pi}{2} - \varphi) = r \cos \varphi. \quad (12)$$

Подставив значение радиуса r_ϕ (12) в уравнение (11), получим

$$dP_4 = \tau_k 2\pi r^2 \cos^2 \phi d\phi. \quad (13)$$

С учетом соотношения интенсивности контактных сил трения τ_k и предела текучести обрабатываемого материала $\sigma_T = 2\tau_k$, выражение (13) запишем в следующем виде:

$$dP_4 = \sigma_T \pi r^2 \cos^2 \phi d\phi. \quad (14)$$

После интегрирования и соответствующих преобразований (14) имеем

$$P_4 = \sigma_T \frac{\pi d_1^2}{16 \cos^2 \phi_k} (\pi - 2\phi_k - \sin 2\phi_k). \quad (15)$$

Элементарную величину усилия контактного трения на коническом участке прошивки dP_5 определим на основе рассмотрения рис. 3:

$$dP_5 = 2\pi r_z \frac{dz}{\cos \phi_k} \tau_k \cos \phi_k. \quad (16)$$

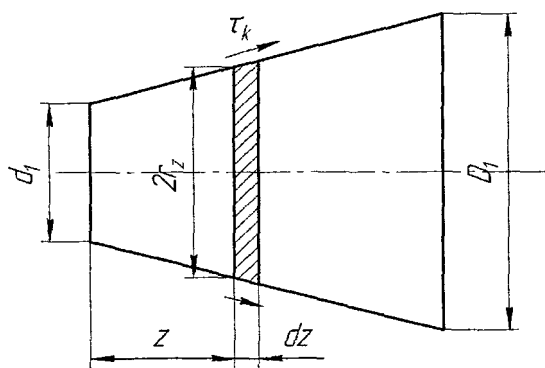


Рис. 3. Сечение конической части оправки-прошивки

Рассчитаем величину текущего радиуса r_z (рис. 3):

$$r_z = \frac{d_1}{2} + z \operatorname{tg} \phi_k. \quad (17)$$

С учетом выражения (17) и равенства $\sigma_T = 2\tau_k$ уравнение (16) принимает вид

$$dP_5 = \sigma_T \pi \left(\frac{d_1}{2} + z \operatorname{tg} \phi_k \right) dz. \quad (18)$$

В итоге получим

$$P_5 = \frac{1}{8} \sigma_T \pi (D_1^2 - d_1^2) \operatorname{ctg} \phi_k. \quad (19)$$

Усилие контактного трения на цилиндрическом участке прошивки P_7 запишем в следующем виде:

$$P_7 = \tau_k \pi D_1 l_1 = \frac{1}{2} \sigma_T \pi D_1 l_1, \quad (20)$$

где D_1 , l_1 — соответственно диаметр и длина цилиндрического участка прошивки.

Рассмотрим случай применения оправки-прошивки параболической формы.

Элементарную величину усилия dP_3 (рис. 4) по аналогии с уравнением (3) представим в виде:

$$dP_3 = \sigma_T \left(1 + \frac{\pi}{2} + \phi_z \right) 2\pi r_z \sin \phi_z \frac{dz}{\cos \phi_z}, \quad (21)$$

где ϕ_z — угол наклона касательной к элементарному параболическому слою инструмента; r_z — наружный радиус элементарного параболического слоя в рассматриваемом сечении.

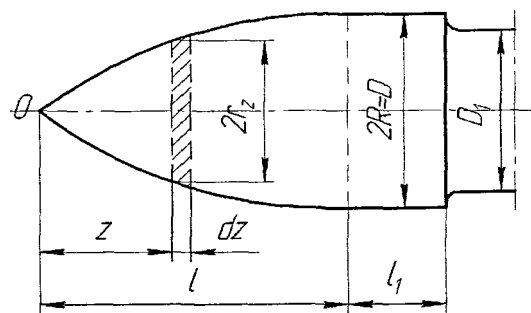


Рис. 4. Схема оправки-прошивки параболической формы: l — длина параболического участка; l_1 — длина цилиндрического участка; R — наружный радиус цилиндрического участка; r_z — наружный радиус элементарного параболического слоя в рассматриваемом сечении; D_1 — диаметр оправки-прошивки

Выражение (21) запишем в виде

$$dP_3 = 2\pi \sigma_T \left(1 + \frac{\pi}{2} + \phi_z \right) r_z \operatorname{tg} \phi_z dz. \quad (22)$$

Очевидно, что величины ϕ_z и r_z являются определенными функциями координаты z .

После преобразований получим

$$dP_3 = 2\pi \sigma_T \left[1 + \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} 2 \frac{R}{l} \left(1 - \frac{z}{l} \right) \right] \times \\ \times 2 \frac{R}{l} \left(1 - \frac{z}{l} \right) R \left(2 \frac{z}{l} - \frac{z^2}{l^2} \right) dz. \quad (23)$$

Интегрируя последнее уравнение в указанных пределах, находим

$$P_3 = \pi^2 \sigma_T \times \\ \times \left[1 + \frac{\pi}{2} - \frac{1}{3} \frac{l}{R} - \frac{1}{2} \frac{l^3}{R^3} + \left(1 + \frac{1}{2} \frac{l^2}{R^2} + \frac{1}{4} \frac{l^4}{R^4} \right) \operatorname{arctg} 2 \frac{R}{l} \right]. \quad (24)$$

Элементарную величину проекции силы контактного трения на параболическом участке оправки-прошивки dP_6 можно записать в следующем виде:

$$dP_6 = 2\pi r_z \tau_k \frac{dz}{\cos \phi_z} \cos \phi_z = \pi \sigma_T r_z dz. \quad (25)$$

После преобразований имеем

$$P_6 = \frac{2}{3} \pi R l \sigma_T. \quad (26)$$

Полученные уравнения позволяют определять усилие прошивки при прошивке-прокатке труб-

ных заготовок прошивнем, включающем участки сферической, конической, цилиндрической и параболоидной формы, т.е. практически любым из применяемых в практике трубопрокатного производства.

Литература

1. Смирнов В.С. Поперечная прокатка. М.: Машгиз, 1948.
2. Прокатные станы и технология прокатки / Под ред. А.И.Шеликова. М.: Металлургиздат, 1955.
3. Чекмарев А.П. и др. Прошивка в косовальных станах. М.: Металлургия, 1967.
4. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М.: Высш. шк., 1963.
5. Клубович В.В., Тимошпольский В.И. и др. Особенности технологии изготовления бесшовных трубных заготовок // Металлургия: Республ. межведомств. сб. науч. тр. Мн.: Белорусская наука, 2006. Вып. 30. С. 140–146.
6. Клубович В.В., Тимошпольский В.И., Жданович Г.М. и др. Определение силовых параметров процесса прошивки-прокатки цилиндрических заготовок // Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. 2007. № 1. С. 7–9.
7. Клубович В.В., Тимошпольский В.И., Жданович Г.М. и др. Расчет усилия деформирования цилиндрических заготовок при прошивке коническим прошивнем со сферическим закруглением при вершине // Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. 2007. № 2. С. 4–7.