

9. РАСЧЕТ ТАБЛИЦ ПРОКАТКИ ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА С АВТОМАТИЧЕСКИМ СТАНОМ

Данные по режимам прокатки труб, основным размерам прокатного инструмента, а также настройке станом указываются в таблицах прокатки. Таким образом, установление закономерностей деформации в основных агрегатах линии производства горячедеформированных труб является основой технологического проектирования трубных цехов. Распределение деформации между операциями внутри трубопрокатного агрегата, а также размеры заготовки, промежуточного продукта и готового изделия на всех стадиях определяют производительность линии и существенным образом влияют на качество труб (точность геометрии, состояние наружной и внутренней поверхности, однородность свойств и пр.) [7].

На рис. 52 изображены основные этапы получения горячекатаной трубы на агрегатах с автоматическим станом, а также представление их в виде блок-схему с указанием ключевых параметров, оказывающих существенное влияние на процесс производства.

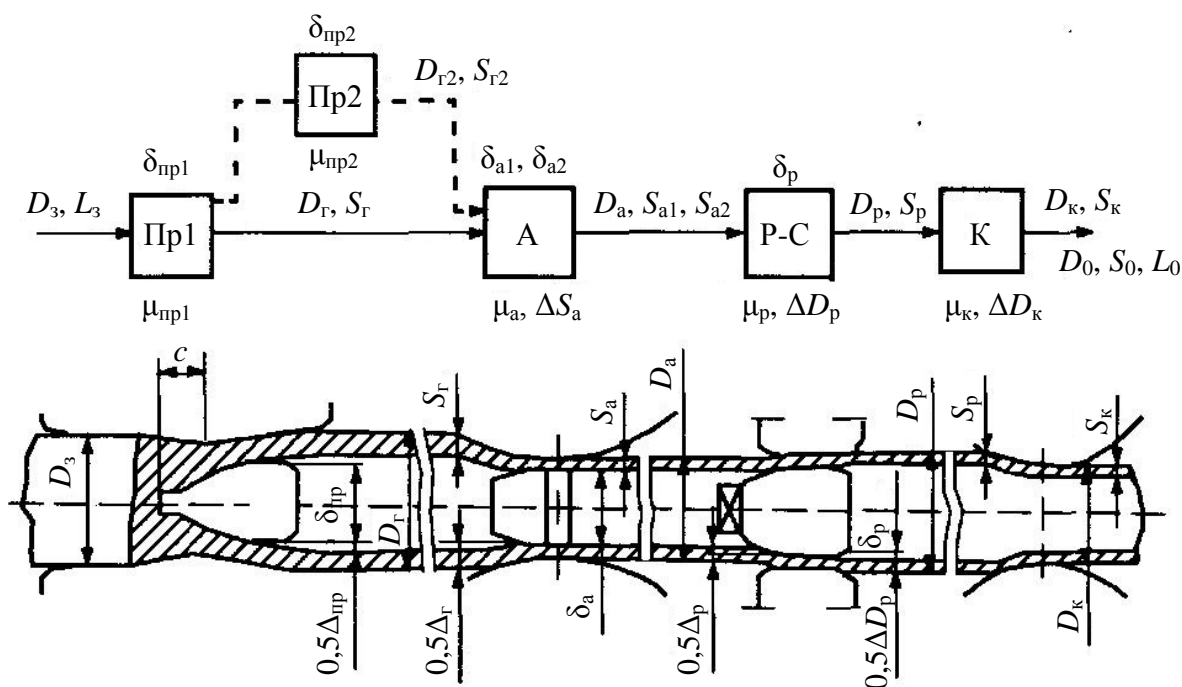


Рис. 52. Схема измерения геометрических размеров заготовки при прокатке на ТПА с автоматическим станом

Существуют два метода расчета таблиц прокатки: прямой (от трубной заготовки до готовой трубы) и обратный (от готовой трубы до трубной заготовки). Наиболее удобным и распространенным считается второй способ, позволяющий подстраивать режим прокатки под конкретный типоразмер трубы [9]. Таблицы прокатки в этом случае рассчитывают против хода технологического процесса, начиная с заданных размеров трубы, что позволяет определить размеры необходимой для осуществления согласованности линии исходной заготовки (слитка). Учитывая возможности оборудования, калибровку технологического инструмента, сортамент труб, химический состав деформируемых сталей, температура прокатки и т.д., устанавливают режимы деформирования на каждом из станов агрегата и определяют размеры изделия на каждой стадии технологического процесса. Полученный размер заготовки округляют до ближайшего стандартного значения и вносят соответствующие корректировки в настройку прошивного стана и при необходимости последующих станов.

Размеры трубы в холодном состоянии

При расчете таблицы прокатки рекомендуется учитывать допускаемые отклонения размеров труб с целью получения готовой продукции более точных размеров. При несимметричных допусках размеры готовой трубы принимают, исходя из условий равновероятности отклонений (при симметричном – равны номинальным):

$$D_0 = \left\{ 1 + \frac{0,5[(+ \Delta D\%) + (- \Delta D\%)]}{100} \right\} D$$

$$S_0 = S + 0,5[(+ \Delta S) + (- \Delta S)]$$

где D , S – номинальные размеры готовой трубы в холодном состоянии;

D_0 , S_0 – наружный диаметр и толщина стенки трубы в холодном состоянии с учетом отклонений их по допускам (согласно ГОСТ и ТУ на данный вид трубной продукции).

Размеры трубы в горячем состоянии

Наружный диаметр трубы при выходе из калибровочного (редукционно-го) стана рассчитывается по формуле:

$$D_k = D_0(1 + \alpha t)$$

где α – коэффициент линейного расширения металла трубы: для стали в диапазоне температур от 0° до 1050° С $\alpha = (13,5 \div 17,5) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [7];

t – температура трубы после калибровочного стана, °С.

Температура прокатки в конце технологической линии принимается для калиброванных труб без подогрева 700-750 °С; для редуцированных и калиброванных труб с предварительным подогревом 850-950 °С [7]. В обоих случаях температура зависит от показателя тонкостенности труб D_0/S_0 : например, с увеличением этого отношения температура заготовки в конце прокатки в результате меньшей теплоемкости заготовки снижается. Температура предварительного подогрева определяется химическим составом стали. Нагрев до более высоких температур снижает усилие прокатки за счет разупрочнения материала, повышает степень редуцирования и производительность агрегата за счет более высоких скоростей прокатки, но при этом приводит к повышенному окалинообразованию, что ухудшает качество поверхности труб. На практике рекомендуется следовать приблизительному расчету:

$$D_k = (1,010 \div 1,013)D_0 \tag{7}$$

Толщина стенки обычно равно толщине стенки готовой трубы:

$$S_k = S_0$$

Исключением является прокатка толстостенных труб $S_0 > 25$ мм: тогда следует учитывать термическое расширение поправочным слагаемым:

$$S_k = S_0 + 0,5 \text{ мм.}$$

Размеры трубы в калибровочном стане

Наружный диаметр тонкостенных труб после риллинг-стана (обкатной машины) должны учитывать обжатие, которому подвергнется труба на этапе калибровки:

$$D_p = D_k + \Delta D_k$$

где ΔD_k – обжатие диаметра трубы в калибровочном (редукционном) стане:

$$\Delta D_k = 2(m - 1)$$

где m – количество клетей калибровочного (редукционного) стана.

Согласно рекомендациям при калибровании обжатие ΔD_k составляет в трехклетевом стане 2-5 мм, в пятиклетевом 8-15 мм, в семиклетевом 14-20 мм.

Величина редуцирования ΔD_{ki} в каждой клетке и размер калибра можно определить по формулам (максимальная степень редуцирования в каждой клетке не более 4-4,5%) [7]:

$$\Delta D_{km} = (0,005 \div 0,015) D_k$$

$$\Delta D_{k(m-1)} = (0,001 \div 0,03) D_{k(m-1)}$$

$$\Delta D_{ki} = (0,01 \div 0,03) D_{k(i+1)}$$

$$D_{k(m-1)} = D_{km} + \Delta D_{km}$$

$$D_{ki} = D_{k(i+1)} + \Delta D_{ki}$$

где $\Delta D_{k(m-1)}$, ΔD_{km} – величина редуцирования диаметра в предпоследней и последней клетях калибровочного (редукционного) стана;

ΔD_{ki} – обжатие диаметра трубы в i ой клетке;

D_{ki} , $D_{k(i+1)}$ – диаметр калибра в i ой и $(i+1)$ ой клетях;

$D_{k(m-1)}$ – диаметр калибра в предпоследней клетке.

Размеры трубы при обкатке (риллинговании)

Обкатку применяют для устранения рисок, овальности и уменьшения разностенности труб. При этом происходит поперечная раскатка стенки трубы, ее утонение на 5-15%, устранение овальности, что сопровождается увеличением («подъемом») диаметра трубы на величину ΔD_p [7]. Рекомендованные значения для данной величины в зависимости от прокатываемого сортамента приведены в таблице 3.

Диаметр оправки δ_p определяют с учетом значения «подъема» диаметра ΔD_p . Он должен быть больше внутреннего диаметра трубы d_a после автоматического стана на величину Δ_p :

$$\delta_p = (D_a - 2S_{a2}) + \Delta_p$$

где D_a – диаметр трубы после раскатки в автоматическом стане (диаметр калибра автомастана):

$$D_a = D_p - \Delta D_p$$

S_{a2} – толщина стенки трубы после раскатки на автоматическом стане:

$$S_{a2} = S_0 + \Delta S_p \pm \Delta S_k \approx S_p + (0,05 \div 0,15)S_0$$

где ΔS_p – утонение стенки в риллинг-стане, $\pm \Delta S_k$ – утонение или утолщение стенки в редуционно-растяжном стане; S_p – толщина стенки трубы после обкатки (риллингования).

Таблица 3. Величина подъема диаметра трубы при риллинговании

Толщина стенки S , мм	Суммарная величина ΔD_p при наружном диаметре трубы D , мм			
	<114	121 ÷ 146	152 ÷ 219	245 ÷ 325
<8	7 ÷ 4	8 ÷ 5	9 ÷ 6	-
8 ÷ 15	5 ÷ 3	6 ÷ 4	7 ÷ 5	13 ÷ 10
15 ÷ 25	3 ÷ 1	4 ÷ 2	5 ÷ 3	11 ÷ 8
>25	-	2 ÷ 0	3 ÷ 0	6 ÷ 3

Принимают:

$$\Delta_p = (0,3 \div 0,5)\Delta D_p \approx 2 \div 4 \text{ мм}$$

Так как в риллинг-станах и редуционно-растяжных станах старой конструкции изменение толщины стенки незначительно, то им можно пренебречь (или принять, что утонение стенки в обкатной машине компенсируется утолщением в калибровочном):

$$\text{при } S_0 < 25 \text{ мм: } S_{a2} = S_p = S_k = S_0;$$

$$\text{при } S_0 > 25 \text{ мм: } S_{a2} = S_p = S_k = S_0 + 0,5.$$

В современных трубопрокатных агрегатах, оборудованных автомат станом, существует технологическая возможность перераспределить часть деформации стенки трубы с автоматического стана на обкатные машины за счет монтажа верхней линейки. Относительно тонкостенные трубы $D/S \geq 25$ можно обкатывать с обжатием по стенке 10-15%, с увеличением толщины стенки трубы

обжата при риллинговании можно увеличить до 20-25% без снижения качества поверхности и точности труб:

$$S_{a2} = S_p + (0,1 \div 0,25)S_0$$

Размеры трубы в автоматическом стане

Прокатка на автоматическом стане осуществляется в два прохода независимо от толщины стенки трубы. Диаметр оправки для второго прохода в автоматическом стане δ_{a2} равен внутреннему диаметру трубы d_a :

$$\delta_{a2} = D_a - 2S_{a2}$$

Иногда прокатку на автоматическом стане ведут в три прохода:

$$\delta_{a2} = \delta_{a3}$$

Диаметры оправок автоматического стана в первом и втором проходах отличаются на 1-2 мм:

$$\delta_{a1} = \delta_{a2} - (1 \dots 2) \text{ мм}$$

Поперечная разностенность труб может быть уменьшена, если использовать калибровку валков со скругленными выпусками при небольшой относительной ширине калибров. Ширина калибров автоматических станов [9]:

- для труб из углеродистых и низколегированных сталей:

$$B_a = (1,03 \div 1,05)D_a$$

- для труб из легированных и жаропрочных сталей:

$$B_a = (1,06 \div 1,08)D_a$$

Для осуществления нормального захвата необходимо, чтобы наружный диаметр гильзы отличался от ширины калибра автоматического стана не более 1-5 мм:

$$D_r = B_a - (1 \dots 5) \text{ мм} \quad (8)$$

Диаметр гильзы может быть также найден из условия обжата стенки в валках автоматического стана:

$$D_r = D_a + 2\Delta S_a + \Delta_r - (1 \dots 2) \text{ мм}$$

где ΔS_a – обжатие стенки в автоматическом стане.

Возможности обжатия стенки гильзы ΔS_a ограничены и, в зависимости от конечной толщины стенки трубы $\Delta S_a = 3 \div 6,5$ мм, причем большие значения относятся к раскатке толстостенной гильзы (рис. 53).

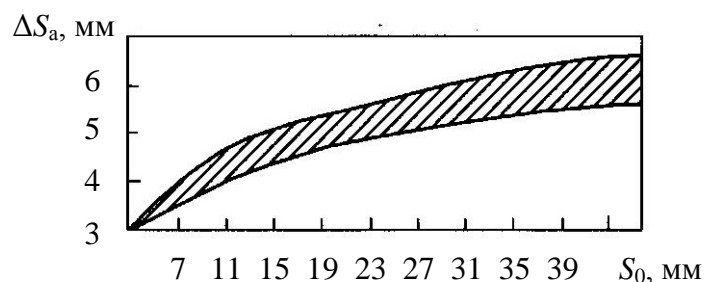


Рис. 53. График для определения обжатия в автоматическом стане

Величина Δ_r учитывает обжатие в автоматическом стане для сглаживания неровностей поверхности гильзы в зависимости от толщины трубы. Ориентировочные значения приведены в таблице 4.

Таблица 4. Дополнительное обжатие в автоматическом стане

Диаметр трубы D , мм	Толщина стенки S , мм			
	<10	10 ÷ 15	15 ÷ 25	>25
<150	2 ÷ 3	3 ÷ 4	3 ÷ 4	1 ÷ 5
>150	2 ÷ 4	3 ÷ 4	4 ÷ 5	4 ÷ 6

Для повышения стабильности захвата валками автоматического стана внутренний диаметр гильзы должен быть больше диаметра калибрующего пояска оправки автоматического стана при первом проходе:

$$d_r = \delta_{a1} + \Delta_r$$

Таким образом, толщина стенки гильзу будет равна:

$$S_r = 0,5(D_r - d_r)$$

Диаметр оправки прошивного стана:

$$\delta_{пр} = D_r - 2S_r - \Delta_{пр}$$

где $\Delta_{пр} = (0,075 - 0,000135S_r)D_r$

Размеры заготовки

Диаметр гильзы не должен существенно отличаться от диаметра заготовки. Процесс прошивки в станах винтовой прокатки, характерных для трубопрокатных установок с автоматическим раскатным станом, в зависимости от схемы прошивки (величины и знака угла раскатки), а также соотношения D_3/S_3 может осуществляться как на «подъем» ($D_3/D_Г < 1$), так и на «посад» ($D_3/D_Г > 1$). Прошивка относительно тонкостенных гильз осуществляется на «подъем», а толстостенных – на «посад» [10].

Диаметр заготовки должен соответствовать стандартному и принимается из условия:

$$D_3 = D_Г \pm (0,03 \div 0,1)D_Г$$

Обычно рекомендуют величину «подъема» гильзы в пределах 3-6%, а величину «посада» – 2-4% [7]. Для агрегатов с двумя прошивными станами допускается подъем гильзы до 10% в первом и до 15% во втором прошивном стане. При наличии двух прошивных станом вытяжка распределяется таким образом, чтобы добиться минимального рассогласования в пропускной способности.

Для определения длины заготовки необходимо знать коэффициент суммарной вытяжки на агрегате (без учета вытяжки на калибровочном и редуционном станах):

$$\mu_{\Sigma 0} = \frac{D_3^2}{4S_p(D_p - S_p)}$$

Для труб длиной 12 м требуется заготовка длиной (с учетом обрезки 250 мм с каждого конца):

$$L_3 = \frac{L_0}{\mu_{\Sigma}}$$

Коэффициент вытяжки на станах технологической линии определяется соответственно:

$$\mu_{\Sigma} = \mu_{пр} \mu_{a1} \mu_{a2} \mu_p \mu_k$$

$$\mu_{\text{пр}} = \frac{D_3^2}{4S_{\text{г}}(D_{\text{г}} - S_{\text{г}})}$$

В зависимости от марки стали и размеров труб применяют следующие коэффициенты вытяжки [9]:

- углеродистые и низколегированные стали $\mu_{\text{пр}} = 1,3 \div 5,3$;
- высоколегированные стали $\mu_{\text{пр}} = 1,5 \div 3,5$.

Максимальный коэффициент вытяжки при прошивки на агрегатах с одним прошивным станом лучше ограничивать в пределах: $(\mu_{\text{пр}})_{\text{max}} = 4,5 \div 4,7$.

При использовании двух прошивных станов [9]:

$$\mu_{\text{пр1}} = 1,25 \div 2,0$$

$$\mu_{\text{пр2}} = 1,25 \div 3,0$$

Суммарный коэффициент вытяжки в автоматическом стане за два прохода $\mu_{\text{а}} = 1,25 \div 2,1$. При вытяжке $\mu_{\text{а}} \leq 1,25$ обжатие стенки должно быть $\Delta S_{\text{а}} < 3$ мм, при $\mu_{\text{а}} > 1,25$ следует прошивать более тонкостенные гильзы и осуществлять раскатку в три прохода.

$$\mu_{\text{а1}} = \frac{S_{\text{г}}(D_{\text{г}} - S_{\text{г}})}{S_{\text{а1}}(D_{\text{а1}} - S_{\text{а1}})}$$

$$\mu_{\text{а2}} = \frac{S_{\text{а1}}(D_{\text{а1}} - S_{\text{а1}})}{S_{\text{а2}}(D_{\text{а2}} - S_{\text{а2}})}$$

$$\mu_{\text{р}} = \frac{S_{\text{а2}}(D_{\text{а2}} - S_{\text{а2}})}{S_{\text{р}}(D_{\text{р}} - S_{\text{р}})}$$

$$\mu_{\text{к}} = \frac{S_{\text{р}}(D_{\text{р}} - S_{\text{р}})}{S_{\text{к}}(D_{\text{к}} - S_{\text{к}})}$$

Рассчитанные величины должны быть сведены в таблицу с указанием диаметров калибра валков для каждого стана, толщиной стенки, диаметром оправки (при прокатке на оправке) и толщины стенки, а также коэффициента вытяжки.

Пример

Выполнить расчет таблицы прокатки для трубы $\varnothing 273 \times 36$ мм повышенной точности из материала сталь 30ХГСА на ТПА 400 из непрерывнолитой заготовки. Заложить в расчете обжатие стенки в обкатном стане. Температура задачи черновой трубы в калибровочный стан 750°C . Количество клеток калибровочного стана 5.

Решение. Согласно рис. 37 ТПА 400 состоит из нагревательных печей, двух прошивных станов (первого прошивного и второго-элонгатора), подогревательной печи, автоматического стана, двух риллинг-станов и калибровочного стана (без возможности изменения толщины стенки), охлаждающий стол и правильные машины.

Трубы $\varnothing 273 \times 36$ мм ($D_0/S_0 = 7,58$) относятся к толстостенным. Сталь 30ХГСА: конструкционная легированная (хромокремнемарганцовая). Для удобства сведем все исходные данные в таблицу 5 в расчетных обозначениях.

Таблица 5. Исходные данные для расчета

Наружный диаметр D , мм	Толщина стенки S , мм	Температура t , $^\circ\text{C}$	Количество клеток m
273	36	750	5

Согласно ГОСТ 8732-78 трубы повышенной точности имеют допустимые отклонения по диаметру $\Delta D\% = \pm 1\%$ и по толщине стенки $\Delta S = \begin{smallmatrix} +10\% \\ -12,5\% \end{smallmatrix}$. Имея в виду только несимметричный интервал допуска по стенке, рассчитаем значение стенки трубы в холодном состоянии:

$$S_0 = 36 + 0,5(0,1 - 0,125) = 35,984 \approx 36,0 \text{ мм}$$

Применяя обратный метод расчета, вычислим размеры трубы после калибровочного стана в горячем состоянии с учетом, для стали 30ХГСА $\alpha = 12,9 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ [8]:

$$D_k = 273(1 + 12,9 \cdot 10^{-6} \cdot 750) = 275,6 \text{ мм}$$

Выполним также ориентировочные расчеты для размеров трубы по границам допускаемых от номинальных размеров отклонений и по приближенной формуле (7):

$$D_k = 273 \left(\frac{1 - 0,01}{1 + 0,01} \right) \left(1 + 12,9 \cdot 10^{-6} \cdot 750 \right) = \left(\frac{272,9}{278,4} \right) \text{ мм}$$

$$D_k = (1,01 \div 1,013) 273 = 275,7 \dots 276,5 \text{ мм}$$

Как видно из полученных интервалов значений размер трубы, выходящий из калибровочного стана, допускает округление диаметра в меньшую сторону, в то же время принимаем следующее значения для последней (пятой) клетки калибровочного стана:

$$D_k = D_{k5} = 276 \text{ мм}$$

Рассчитаем термическое расширение стенки трубы на границах интервала допускаемых от номинального размера значений:

$$S_k = 36 \left(\frac{1 - 0,125}{1 + 0,1} \right) \left(1 + 12,9 \cdot 10^{-6} \cdot 750 \right) = \left(\frac{31,8}{40,0} \right) \text{ мм}$$

Используя упрощенную формулу, получим: $S_k = 36 + 0,5 = 36,5 \text{ мм}$, что говорит о том, что полученное значение превышает среднее, получаемое с учетом допуска.

Так как труба не является тонкостенной, то вычислим размеры трубы после обкатки в риллинг-стане, используя приближенные зависимости для вычисления редуцирования диаметра трубы в каждой клетки:

$$\Delta D_{k5} = (0,005 \div 0,015) D_{k5} = (0,005 \div 0,015) \cdot 276 = 1,4 \dots 4,1 \text{ мм}$$

$$D_{k4} = D_{k5} + \Delta D_{k5} = 276 + (1,4 \dots 4,1) = 277,4 \dots 280,1 \text{ мм}$$

$$\text{Принимаем, } D_{k4} = 278 \text{ мм}$$

$$\Delta D_{k4} = (0,001 \div 0,03) D_{k4} = (0,001 \div 0,03) \cdot 278 = 0,3 \dots 8,3 \text{ мм}$$

$$D_{k3} = D_{k4} + \Delta D_{k4} = 278 + (0,3 \dots 8,3) = 278,3 \dots 286,3 \text{ мм}$$

$$\text{Принимаем, } D_{k3} = 279 \text{ мм}$$

$$\Delta D_{k3} = (0,01 \div 0,03) D_{k3} = (0,01 \div 0,03) \cdot 279 = 2,8 \dots 8,4 \text{ мм}$$

$$D_{k2} = D_{k3} + \Delta D_{k3} = 279 + (2,8 \dots 8,4) = 282,0 \dots 287,4 \text{ мм}$$

$$\text{Принимаем, } D_{k2} = 282 \text{ мм}$$

$$\Delta D_{k2} = (0,01 \div 0,03)D_{k2} = (0,01 \div 0,03) \cdot 282 = 2,8 \dots 8,5 \text{ мм}$$

$$D_{k1} = D_{k2} + \Delta D_{k2} = 282 + (2,8 \dots 8,5) = 284,8 \dots 290,4 \text{ мм}$$

Принимаем, $D_{k1} = 285 \text{ мм}$

$$\Delta D_{k1} = (0,01 \div 0,03)D_{k1} = (0,01 \div 0,03) \cdot 285 = 2,9 \dots 8,6 \text{ мм}$$

$$D_p = D_{k1} + \Delta D_{k1} = 285 + (2,9 \dots 8,6) = 287,9 \dots 293,6 \text{ мм}$$

Принимаем с учетом, что толщина стенки при калибровке не изменяется:

$D_p = 288 \text{ мм}$, $S_p = S_k = 36,5 \text{ мм}$. Для удобства сведем результаты расчетов в таблицу 6.

Таблица 6. Расчет обжатий в калибровочном стане ТПА-400

Номер клетки	Диаметр после клетки D_{ki} , мм	Фактическое обжатие ΔD_{ki} , мм
1	285	3
2	282	3
3	279	3
4	278	1
5	276	2

Вычислим размеры трубы после автоматического стана с учетом увеличения диаметра в обкатном стане. Согласно таблице 3: $\Delta D_p = 3 \dots 6 \text{ мм}$, тогда $\Delta_p = 1,2 \dots 2,4 \text{ мм}$:

$$D_a = D_p - \Delta D_p = 288 - (3 \dots 6) = 282 \dots 285 \text{ мм}$$

Принимаем, $D_a = 283 \text{ мм}$

Так как труба является толстенной, по заданию можно установить величину обжатия стенки при обкатке до 20-25%:

$$S_{a2} = S_p + (0,2 \div 0,25)S_0 = 36,5 + (0,2 \div 0,25) \cdot 36,5 = 43,7 \dots 45,5 \text{ мм}$$

Принимаем, $S_{a2} = 44 \text{ мм}$

Откуда диаметр оправки обкатного стана будет равен:

$$\delta_p = (D_a - 2S_{a2}) + \Delta_p = (283 - 2 \cdot 44) + (1,2 \dots 2,4) = 196,2 \dots 197,4 \text{ мм}$$

Принимаем, $\delta_p = 197 \text{ мм}$

Рассчитаем диаметры оправок для автоматического стана в первом и втором проходах:

$$\delta_{a2} = D_a - 2S_{a2} = 283 - 2 \cdot 44 = 195 \text{ мм}$$

$$\delta_{a1} = \delta_{a2} - (1 \dots 2) = 195 - 2 = 193 \text{ мм}$$

Толщина стенки трубы в первом проходе:

$$S_{a1} = 0,5(D_a - \delta_{a1}) = 0,5(283 - 193) = 45 \text{ мм}$$

Ширина калибра при прокатке труб из легированных сталей:

$$B_a = (1,06 \div 1,08)D_a = (1,06 \div 1,08) \cdot 283 = 300,0 \dots 305,6 \text{ мм}$$

Так как прошивка осуществляется за две операции, необходимо рассчитать промежуточные размеры гильзы между прошивкой и элонгированием. Согласно графику, изображенному на рис. 53, $\Delta S_{a2} = 5 \dots 6,5$ мм, а дополнительное обжатие составляет $\Delta_r = 4 \dots 6$ мм.

Внутренний диаметр гильзы после элонгирования равен:

$$d_{r2} = \delta_{a1} + \Delta_r = 193 + (4 \dots 6) = 197 \dots 199 \text{ мм}$$

Толщина стенки гильзы (принимая во внимание обжатие стенки в автоматическом стане):

$$S_{r2} = S_{a2} + \Delta S_{a2} = 44 + (5 \dots 6,5) = 49 \dots 50,5 \text{ мм}$$

Откуда наружный диаметр гильзы перед задачей в автоматстан [7]:

$$D_{r2} = d_{r2} + 2S_{r2} = (197 \dots 199) + 2(49 \dots 50,5) = 295 \dots 300 \text{ мм}$$

Учитывая условие (8), принимаем:

$$B_a = 302 \text{ мм}$$

$$D_{r2} = 298 \text{ мм}$$

$$S_{r2} = 49,5 \text{ мм}$$

$$d_{r2} = 199 \text{ мм}$$

Диаметр оправки второго прошивного стана рассчитывается по величине раскатки гильзы по диаметру согласно таблице 7:

$$\delta_{пр2} = d_{r2} - \Delta_{r2} \cdot D_{r2}$$

где Δ_{r2} – величина раскатки гильзы по диаметру [7], % (согласно таблице 7).

Таблица 7. Примерные значения величины раскатки гильзы по диаметру

S_{r2} , мм	10 ÷ 12	13 ÷ 15	16 ÷ 20	21 ÷ 25	26 ÷ 30	>30
Δ_{r2} , %	9 ÷ 12	8 ÷ 12	7 ÷ 10	6 ÷ 10	5 ÷ 8	4 ÷ 6

Таким образом, $\delta_{\text{пр}2} = 199 - (0,04 \div 0,06) \cdot 299 = 179,1 \dots 185,0$ мм

Окончательно принимаем, $\delta_{\text{пр}2} = 183$ мм

Примем, что при элонгировании на втором прошивном стане происходит подъем диаметра гильзы до 15%:

$$D_{\text{r}1} = \frac{D_{\text{r}2}}{1 + 0,01\Delta_{\text{r}2}} = \frac{298}{1 + 0,01(4 \div 6)} = 259,1 \dots 298 \text{ мм}$$

Принимаем, $D_{\text{r}1} = 280$ мм

Рассчитаем диаметр заготовки, учитывая, что толстостенные трубы обычно прошивают на «посад», т.е. с редуцированием диаметра:

$$D_3 = D_{\text{r}1} + (0,03 \div 0,1)D_{\text{r}1} = 280 + (0,03 \div 0,1)280 = 288,4 \dots 308 \text{ мм}$$

Согласно ГОСТ 34636-2020 для сортамента непрерывнолитых заготовок принимаем диаметр заготовки $D_3 = 290$ мм. Чтобы рассчитать толщину стенки гильзы после первого прошивного стана и диаметр оправки, необходимо оценить вытяжку после прошивных:

$$\mu_{\text{пр}} = \frac{D_3^2}{4S_{\text{r}2}(D_{\text{r}2} - S_{\text{r}2})} = \frac{290^2}{4 \cdot 49,5 \cdot (298 - 49,5)} = 1,709$$

В практике принято для прошивки толстостенных труб смещать деформацию на первый прошивной стан в пропорции 60/40%. Таким образом, имеем:

$$\mu_{\text{пр}1} = \frac{D_3^2}{4S_{\text{r}1}(D_{\text{r}1} - S_{\text{r}1})}$$

Откуда, решая квадратное уравнение, получаем (второй корень не имеет «физического» смысла):

$$S_{\text{r}1} = \frac{D_{\text{r}1}}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_{\text{r}1}}{2}\right)^2 - \frac{D_3^2}{4\mu_{\text{пр}1}}}$$

Подставляем и вычисляем:

$$S_{\text{r}1} = \frac{280}{2} - \sqrt{\left(\frac{280}{2}\right)^2 - \frac{290^2}{4\left(\sqrt{\frac{60}{40}} \cdot 1,709\right)}} = 59,5 \text{ мм}$$

Диаметр оправки в первом прошивном стане находится при расчете:

$$\Delta_{\text{пр}} = (0,075 - 0,000135 \cdot 59,5)280 = 18,8 \text{ мм}$$

и равна

$$\delta_{\text{пр1}} = D_{\text{г}} - 2S_{\text{г}} - \Delta_{\text{пр}} = 280 - 2 \cdot 59,5 - 18,8 = 142,2 \text{ мм}$$

Принимаем, $\delta_{\text{пр1}} = 142 \text{ мм}$

Рассчитаем длину заготовки для выпуска черновой трубы длиной 12,5 м.

Для этого необходимо определить суммарную вытяжку по сечению трубы после обкатного стана:

$$\mu_{\Sigma 0} = \frac{D_3^2}{4S_{\text{п}}(D_{\text{п}} - S_{\text{п}})} = \frac{290^2}{4 \cdot 36,5 \cdot (288 - 36,5)} = 2,29$$

Длина заготовки для выполнения всего комплекса операций должна быть не менее:

$$L_3 = \frac{L_0}{\mu_{\Sigma}} = \frac{12,5}{2,29} = 5,46 \text{ м}$$

Согласно ГОСТ 34636-2020 заготовки такого типоразмера выпускаются немерной длины от 3,6 до 12 м включительно.

Рассчитаем коэффициенты вытяжки для каждой операции:

$$\mu_{\text{пр1}} = \frac{D_3^2}{4S_{\text{р1}}(D_{\text{р1}} - S_{\text{р1}})} = \frac{290^2}{4 \cdot 59,5 \cdot (280 - 59,5)} = 1,60$$

$$\mu_{\text{пр2}} = \frac{S_{\text{р1}}(D_{\text{р1}} - S_{\text{р1}})}{S_{\text{р2}}(D_{\text{р2}} - S_{\text{р2}})} = \frac{59,5 \cdot (280 - 59,5)}{49,5 \cdot (298 - 49,5)} = 1,07$$

$$\mu_{\text{а1}} = \frac{S_{\text{г}}(D_{\text{г}} - S_{\text{г}})}{S_{\text{а1}}(D_{\text{а1}} - S_{\text{а1}})} = \frac{49,5 \cdot (298 - 49,5)}{45 \cdot (283 - 45)} = 1,15$$

$$\mu_{\text{а2}} = \frac{S_{\text{а1}}(D_{\text{а1}} - S_{\text{а1}})}{S_{\text{а2}}(D_{\text{а2}} - S_{\text{а2}})} = \frac{45 \cdot (283 - 45)}{44 \cdot (283 - 44)} = 1,02$$

$$\mu_{\text{п}} = \frac{S_{\text{а2}}(D_{\text{а2}} - S_{\text{а2}})}{S_{\text{п}}(D_{\text{п}} - S_{\text{п}})} = \frac{44 \cdot (283 - 44)}{36,5 \cdot (288 - 36,5)} = 1,15$$

$$\mu_{\text{к}} = \frac{S_{\text{п}}(D_{\text{п}} - S_{\text{п}})}{S_{\text{к}}(D_{\text{к}} - S_{\text{к}})} = \frac{36,5 \cdot (288 - 36,5)}{36,5 \cdot (276 - 36,5)} = 1,05$$

Суммарный коэффициент вытяжки:

$$\mu_{\Sigma} = \mu_{\text{пр}}\mu_{a1}\mu_{a2}\mu_{\text{р}}\mu_{\text{к}} = 1,71 \cdot 1,15 \cdot 1,02 \cdot 1,15 \cdot 1,05 = 2,41$$

Внесем все полученные результаты в таблицу 8.

Таблица 8. Таблица прокатки трубы Ø273×36 мм ТПА-400

Заготовка		Прошивной стан					Второй прошивной стан (элонгатор)			
D_3 , мм	L_3 , мм	D_{r1} , мм	S_{r1} , мм	$\delta_{пр1}$, мм	$\mu_{пр1}$	D_{r2} , мм	S_{r2} , мм	$\delta_{пр2}$, мм	$\mu_{пр2}$	
290	5460	280	59,5	142	1,60	298	49,5	183	1,07	
Автоматический стан						Обкатной стан				
D_a , мм	S_{a1} , мм	S_{a2} , мм	δ_{a1} , мм	δ_{a2} , мм	μ_{a1}	μ_{a2}	D_p , мм	S_p , мм	δ_p , мм	μ_p
283	45	44	193	195	1,15	1,02	288	36,5	197	1,15
Калибровочный стан				Готовая труба						
D_k , мм	S_k , мм		μ_k	D , мм		S , мм		μ_{Σ}		
276	36,5		1,05	273		36,0		2,41		

Таблица прокатки является основой технологического проектирования для участка производства горячедеформированных труб перед отделкой. В дальнейшем правильно выбранные режимы деформации трубной заготовки играют важную роль для оценки производительности линии и выбора скоростных характеристик прокатки, а также нахождения нагрузок, возникающих в каждом стане с учетом физико-механических свойств прокатываемых сплавов. Производительность технологической линии учитывается как определяющий фактор при экономическом проектировании цеха, в то время как нагрузки помогают при технической проработке машин и механизмов с точки зрения оценки мощности проектируемого оборудования и прочности силовых элементов станов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миронов, Г. В. Проектирование цехов и инвестиционно-строительный менеджмент в металлургии: учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломир. специалистов 651300-Металлургия / Г. В. Миронов, С. П. Буркин, В. В. Шимов; науч. ред. С. С. Набойченко; М-во образования и науки Рос. Федерации, ГОУ ВПО "Урал. гос. техн. ун-т-УПИ". - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004 (Ризография НИЧ УГТУ-УПИ). - 512 с.; ISBN 5-321-00357-2.
2. Шимов, Г. В. Основы технологических процессов обработки металлов давлением: учебное пособие / Г. В. Шимов, С. П. Буркин; под общ. ред. С. П. Буркина; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. - Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2014. - 158 с.; ISBN 978-5-7996-1221-4.
3. Авдеев, В. А. Основы проектирования металлургических заводов: Справочник / В.А. Авдеев, В.М. Друян, Б.И. Кудрин. - Москва: Интермет Инжиниринг, 2002. - 462 с.; ISBN 5-89594-071-4.
4. Якушев, А. М. Проектирование сталеплавильных и доменных цехов: учебник для вузов по спец. «Металлургия черных металлов». - Москва: Металлургия, 1984. - 215 с.
5. Современные трубные цехи / Я.Е. Осада, А.С. Зинченко, Ю.Г. Крупман и др. - Москва: Металлургия, 1977. - 367 с.
6. Машины и агрегаты трубного производства: Учеб. пособие для вузов по специальностям «Обраб. металлов давлением», «Машины и технология обраб. металлов давлением» / А. П. Коликов и др.]; Под ред. А. П. Коликова. - Москва: МИСИС, 1998. - 536 с.; ISBN 5-87623-025-1.
7. Технология трубного производства: учебник для студентов вузов, обучающихся по спец. «Обработка металлов давлением» / В. Н. Данченко [и др.]. - Москва: Интермет Инжиниринг, 2002. - 640 с.: ил., табл. - Библиогр.: с.

637-638. - ISBN 5-89594-083-8.

8. Орлов, Г. А. Технологические процессы обработки металлов давлением: учебное пособие для студентов, обучающихся по программе бакалавриата по направлению подготовки 150400 «Металлургия» / Г. А. Орлов; М-во образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Ин-т материаловедения и металлургии. - Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2013. - 196 с.; ISBN 978-5-7996-0887-3.

9. Технология производства труб: Учеб. для вузов по спец. «Обраб. металлов давлением» / И. Н. Потапов, А. П. Коликов, В. Н. Данченко и др. - Москва: Металлургия, 1994. - 528 с.; ISBN 5-229-00991-8.

10. Технология и оборудование трубного производства: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Обработка металлов давлением», «Металлургические машины и оборудование», и для бакалавров, обучающихся по направлению «Металлургия» / В. Я. Осадчий [и др.]; под ред. В. Я. Осадчего. - Москва: Интернет Инжиниринг, 2007. - 560 с.; ISBN 978-5-89594-144-7.