

УДК 621.774.6

А.А.Погребной, В.В.Бояркин, В.А. Постный

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОЛЫХ ДОРНОВ ПИЛЬГЕРСТАНА

Прокатка труб большого диаметра на пильгерных станах характеризуется большими динамическими нагрузками. Целесообразно применение полых дорнов с целью снижения их массы и более равномерного охлаждения. Представленная методика позволяет определять геометрические размеры поперечного сечения полого дорна.

Прокатка труб великого діаметру на пильгерних станах характеризується великими динамічними навантаженнями. Доцільно використання порожнистих дорнів з метою зменшення їх ваги та більш рівномірного охолодження. Методика, що пропонується, дозволяє визначати геометричні розміри поперечного перерізу порожнистого дорна.

Rolling of big diameter tubes on pilger mills it is characterized by the big dynamic loads. Application hollow mandrels is expedient with the purpose of lowering their mass and more uniform refrigeration. The introduced technique allows to define the geometrical sizes of hollow mandrels cross-section.

### Введение

Оправки пилигримового стана (дорны) работают в очень тяжёлых условиях. Это связано с резко переменными циклическими температурными колебаниями, которые претерпевают дорны при прокатке. Вначале нового типоразмера труб валки и дорн имеют температуру около 20°C и постепенно разогреваются от периферии к центру (рис. 1).

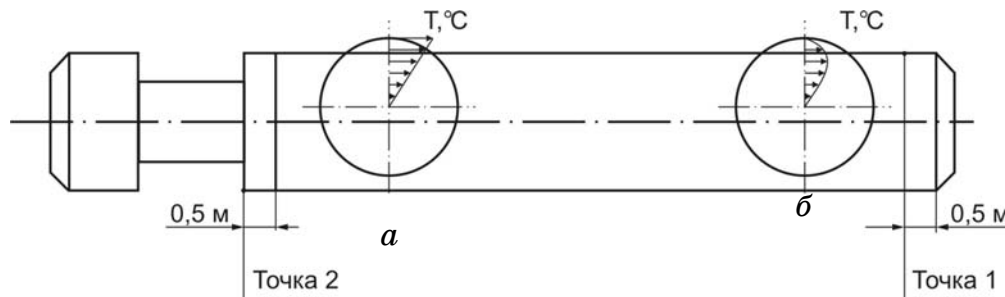


Рисунок 1 – Градиент температуры дорна после прокатки (а) и охлаждения (б)

Поле прокатки дорн возвращается на повторный цикл для охлаждения в ванне с водой и нанесения смазки. При этом дорн охлаждается, но не равномерно, а только на периферии, и температура на поверхности снижается. В дальнейшем снова происходит повышение температуры от тепла горячей гильзы, тепла, полученного в результате деформации и переноса тепла от центра к поверхности (рис. 1б).

Эти колебания температур очень сложно определить количественно практически, т.е. экспериментальным путем, и ещё сложнее теоретическим. Однако можно предположить, что колебания температур в поверхностном слое значительны, причём эти колебания происходят в относительно короткое время (10-15 мин.). Циклическое нагревание и охлаждение приводят к циклическому изменению объёма поверхностного слоя дорна под действием известного явления – теплового расширения материала (металла). Колебания размеров поверхностного слоя, при постоянном объёме внутренних слоев, приводит к появлению наружных и поперечных микротрещин, которые развиваются в глубину. Нарушение поверхностного слоя дорнов приводит к появлению дефектов на внутренней поверхности трубы, что приводит к снижению их качества.

На повышение стойкости поверхности дорнов существенное влияние оказывает применение смазки. Ранее, при горячей прокатке, использовались, как правило, органические смазки, например, графит. В годы второй мировой войны на Урале иногда применяли экзотические смазочные материалы: просоленные животные жиры, например, свиное сало, берёзовые веники и др. при прокатке блюмов и слябов. В настоящее время, при горячей прокатке труб, для смазки длинных оправок (непрерывный стан, пилиргимовый стан) используют минеральные смазки: поваренную соль и триполифосфат натрия. Применение их следующее: соль вбрасывают в гильзу, водный раствор триполифосфата наносят на горячую оправку (свыше 100 °С). Вода при этом испаряется, а в виде тонкой плёнки белого цвета остаётся на поверхности оправки (дорна). Триполифосфат натрия, помимо смазочного эффекта, т.е. уменьшения коэффициента трения, оказывает также теплоизоляционный эффект. Однако, качественное нанесение триполифосфата натрия на дорн, в условиях внастановой зарядки, в цехе №4 имеет существенные недостатки. Технология охлаждения и нанесения смазки следующая: смазка (триполифосфат натрия) наносится на дорн при температуре ~100 °С, т.к. поверхностный слой металла дорна примерно равен температуре кипения воды. Почти 35 летний опыт использования триполифосфата натрия в качестве смазки на ТПА 30-102 на Никопольском трубoproкатном заводе показал, что оптимальная температура нанесения смазки на длинную оправку непрерывного стана находится в интервале 140...180 °С. При этом вода достаточно быстро испаряется, а триполифосфат натрия, в виде белой плёнки, плотно схватывается с металлом оправки.

Кроме того, дорн находится в гильзе в течение 2-3 минут до начала прокатки. Всё это время дорн лежит в гильзе одной стороной, а

смазка частично стекает с дорна, что не способствует нормальному процессу прокатки.

Охлаждение цельных дорнов происходит по диаметру от периферии к центру, что характеризуется высоким градиентом (перепадом) температуры от наружной поверхности к центру и, как говорилось выше, при циклическом прогреве и охлаждении водой в ванне приводит к появлению трещин на поверхности дорна. Уменьшить перепад температур можно благодаря применению полых дорнов. Поэтому возникает задача по определению толщины стенки полого дорна, при которой отсутствует потеря поперечной устойчивости.

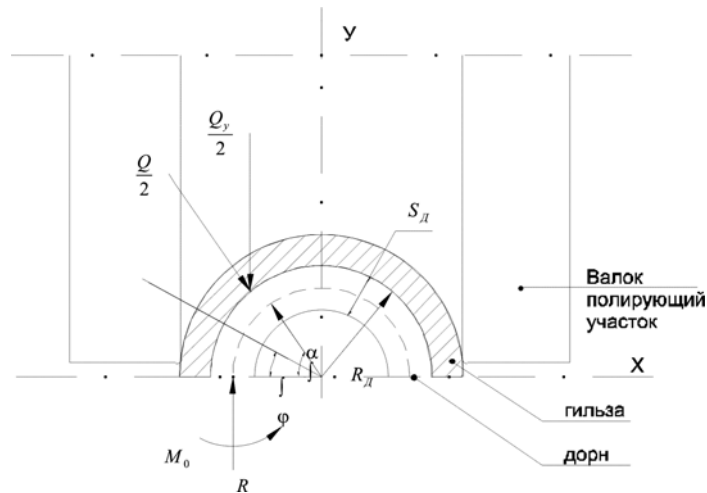


Рисунок 2 – Схема нагружения дорна при прокатке

Для определения толщины стенки полого дорна при известном максимальном усилии давления металла с целью отсутствия потери поперечной устойчивости воспользуемся известной задачей А. Феппла для расчёта трубы на сжатие. В связи с симметричностью сечения дорна и действующих на него сил, достаточно рассмотреть одну четвертую её часть (рис. 2). Действие внутренних сил отброшенной части можно заменить моментом  $M_0$  и силой  $R$ .

Изгибающий момент в любом сечении рассматриваемой части трубы, определяемой углом  $\varphi$ , равен сумме моментов всех действующих на неё внешних сил, лежащих слева от заданного сечения и приложенных к трубе.

Таким образом, уравнение моментов будет иметь вид:

Для  $\varphi < \alpha$

$$M_\varphi = M_0 + M_1, \quad (1)$$

где  $M_1$  – момент от действия силы  $Q$ .

$$R = S Q \cos \alpha \quad (2)$$

и определяется из уравнения равновесия сил на оси  $Y$ .

Уравнение моментов для  $\varphi < \alpha$  запишется в виде:

$$M_{\varphi} = M_0 + Q/2 \cos \alpha (r - r \cos \varphi) \quad (3)$$

А. Феппл [1] доказал, что в случае симметричности рассматриваемого сечения, интеграл упругого приращения элементарного угла

равен 0, т.е.  $\int_0^{\pi/2} \Delta d\varphi = 0$ .

Принимая во внимание, что  $\Delta d\varphi = M_{\varphi} r d\varphi / EI$ :

$$\int_0^{\varphi} \frac{M_0 + \frac{Q}{2} \cdot \cos(\alpha) \cdot (r - r \cdot \cos(\varphi))}{E \cdot I} \cdot d\varphi = 0 \quad (4)$$

Решение полученного уравнения позволит нам найти искомое усилие, в зависимости от величины момента  $M_0$ .

$$Q = \frac{2 \cdot M_0}{r \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin \varphi / \varphi - 1)} \quad (5)$$

Поперечное сечение дорна, испытывающее деформацию, образует четырёхугольник с моментом сопротивления.

$$W = \frac{l_d \cdot S_d^2}{\sigma_t} \quad (6)$$

где  $l_d$  – длина контакта дорна и металла;  $S_d$  – толщина плёнки полого дорна.

Имея в виду, что допускаемое напряжение на изгиб  $[\sigma_{изг}]$  равно отношению изгибающего момента  $M_0$  к моменту сопротивления  $W$ , решая совместно (5) и (6), получим максимальное усилие допустимого давления на дорн. Вследствие симметричности рассматриваемой схемы, считая опасными сечениями соответствующим углам  $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ , необходимо принимать  $\varphi = \pi/4$ .

Значение допустимого напряжения на изгиб можно принять равным  $0,7\sigma_t$ . Влияние внешних зон на величину контактных напряжений учитывается коэффициентом  $n_{\sigma}''$ , определяемым по эмпирической формуле [2]:

$$n_{\sigma}'' = 1 + \sqrt{\frac{S_d \cdot D_d}{l_d}} \quad (7)$$

по аналогии с редуцированием при малых обжатиях.

Учитывая вышеизложенное, максимально допустимые усилия  $Q$ , при котором наступает потеря поперечной устойчивости, выразится уравнением:

$$Q = \frac{3,5 \cdot \sigma_t \cdot n_{\sigma}'' \cdot S_d^2 \cdot l_d}{r} \quad (8)$$

Толщину стенки полого дорна можно определить путём совместного решения (7) и (8) уравнений, принимая во внимание, что

$$r = R_d - \frac{S_d}{2}, \text{ а } l_d = R_i \cdot \sin(\theta_{3x}),$$

где  $R_d$  – радиус наружного диаметра дорна;  $R_i$  – радиус балки по вершине калибра в начале полирующего участка;  $\theta_{3x}$  – угол захвата в начале полирующего участка, равный 14°...20°, в зависимости от толщины стенки прокатываемой трубы.

Из уравнения (8)

$$n_{\sigma}'' = \frac{Q_r}{3,5 \cdot \sigma_t \cdot S_d^2 \cdot l_d}; \quad (9)$$

Приравнивая правые части уравнений (7) и (9), получим:

$$\frac{l_d + \sqrt{2 \cdot l_d \cdot R_d}}{l_d} = \frac{Q \cdot r}{3,5 \cdot \sigma_t \cdot S_d^2 \cdot l_d} \quad (10)$$

Аналитически уравнение (10) решается довольно сложно (наличие радикалов), относительно толщины стенки дорна, однако, легко решается относительно максимального усилия  $Q$ .

$$Q = \frac{(l_d + \sqrt{2 \cdot S_d \cdot R_d}) \cdot 3,5 \cdot \sigma_t \cdot S_d^2}{r} \quad (11)$$

Уравнение (11) легко программируется, т.к. алгоритм уравнения (11) несложен и, учитывая, что параметры кроме  $S_d$  известны, можно использовать метод последовательной подстановки (итерации).

Использование представленной методики позволяет определить рациональные размеры полого дорна для горячей пильгерной прокатки труб больших размеров, что ведет к снижению динамических нагрузок в клетки и увеличению срока службы деталей стана.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фешл А. Теоретическая механика. Том. III. Сопротивление металлов. ОНТИ, НК ТП. – М., 1937.
2. Редукционные станы / В.П. Анисифилов. Л.С. Зельдович и др. – М.: Металлургия, 1971.