

УДК 621.774.3

Панюшкин Е.Н., Данченко В.Н., Кондратьев С.В.,
Панюшкин Н.Е, Скоромный С.А.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРЕДВАРИ-
ТЕЛЬНОГО УТОНЕНИЯ КОНЦЕВЫХ УЧАСТКОВ "ЧЕРНОВЫХ"
ТРУБ В НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ ТПА 30-102**

Статья посвящена разработке методики определения параметров работы системы предварительного утонения концевых участков "черновых" труб в непрерывном стане ТПА 30-102, в том числе времени и скорости перемещения валков 6-ой и 7-ой его клетей.

Стаття присвячена розробці методики визначення параметрів роботи системи попереднього стоншення кінцевих ділянок "чорнових" труб у безперервному стані ТПА 30-102, у тому числі часу й швидкості переміщення валків 6-ий і 7-ий його клітей.

The article is devoted development of method by work parameters determination for the system of preliminary wall thickness diminishing on the end areas of "draft" pipes in the continuous mill of TPA 30-102, including time and speed of rolls moving in 6th and 7th his cages.

Введение

Известно [1], что редуцирование труб с натяжением сопровождается утолщением стенки переднего и заднего концов труб, связанного с условиями их прокатки в процессе заполнения и освобождения металлом редуцирующего стана.

Анализ исследований. Уменьшить длину переднего и заднего утолщенных концов после редуцирования можно:

- варьированием скоростного режима работы редуцирующего стана во время заполнения и освобождения стана металлом, при этом следует стремиться к условиям прокатки, когда:

$$S_{УПК}^{top} \approx S_{УПК}^{top} \approx S_{mp} ;$$

- прокаткой в редуцирующем стане "черновых" труб с переменной величиной толщины стенки от $S_{УПК}^{top,н.см}$ и $S_{УЗК}^{top,н.см}$ на их передних и задних концах, увеличивающейся до $S_{н.см}$ на протяженности $L_{УПК}^{н.см}$ и $L_{УЗК}^{н.см}$ соответственно.

Следует обратить внимание, что редуцирующий стан ТПА 30-102 имеет дифференциально-групповой привод, и управление скоростными режимами прокатки труб в процессе заполнения и освобождения стана металлом малоэффективно для уменьшения длин утолщенных концов. Поэтому, на этом агрегате наиболее целесообразно осуществлять подготовку концов труб в непрерывном оправочном стане.

Проблема. Для эффективной подготовки концевых участков “черновых” труб в непрерывном оправочном стане необходимо знать требуемые режимы перемещения верхних валков его 6-ой и 7-ой клетей.

Результаты исследований. Величина концевого утолщения стенки трубы, а также длины концов труб с указанными утолщениями существенно зависят от величины обжатия диаметра труб в редуционном стане, суммарного натяжения по клетям, температуры прокатки, а также величин исходной и конечной разностенностей готовых труб.

Толщина стенки трубы на торце переднего утолщенного конца готовой трубы после редуцирования будет:

$$S_{УПК}^{тор} = S_{mp} \sqrt{\frac{D_{н.см}}{D_{mp}}} . \quad (1)$$

Толщина стенки на торце заднего утолщенного конца готовой трубы:

$$S_{УЗК}^{тор} = 1.03 \cdot S_{mp} \sqrt{\frac{D_{н.см}}{D_{mp}}} . \quad (2)$$

Тогда толщина стенки трубы в месте обрезки переднего утолщенного конца:

$$S_{УПК}^{рез} = S_{mp} , \quad (3)$$

а в месте обрезки заднего утолщенного конца:

$$S_{УЗК}^{рез} = 1.03 \cdot S_{mp} . \quad (4)$$

Средняя по длине переднего утолщенного конца толщина стенки:

$$S_{срУПК} = \frac{S_{УПК}^{тор} + S_{УПК}^{рез}}{2} , \quad (5)$$

а для заднего утолщенного конца:

$$S_{срУЗК} = \frac{S_{УЗК}^{тор} + S_{УЗК}^{рез}}{2} . \quad (6)$$

Объем металла трубной заготовки, соответствующий в утолщенным концам:

$$\text{- переднего: } Q_{УПК} = \pi \cdot (D_{mp} - S_{срУПК}) \cdot S_{срУПК} \cdot L_{УПК} ; \quad (7)$$

$$\text{- заднего: } Q_{УЗК} = \pi \cdot (D_{mp} - S_{срУЗК}) \cdot S_{срУЗК} \cdot L_{УЗК} , \quad (8)$$

где $L_{УПК}$ и $L_{УЗК}$ - длины утолщенных концов готовых труб.

Тогда часть длины заготовки, идущей в отходы с утолщенными концами, будет:

$$L_{загУПК+УЗК} = \frac{4 \cdot (Q_{УПК} + Q_{УЗК})}{\pi \cdot D_{заг}^2} . \quad (9)$$

Расчет режима утонения концевых участков “черновых” труб включает в себя два этапа:

- определение протяженности подготовленных концевых участков и толщины стенки на их торцах после прокатки “черновой” трубы;

- определение величины и скорости перемещения верхнего валка шестой и седьмой клетки непрерывного стана, обеспечивающие получение необходимых геометрических размеров концевых участков “черновых” труб.

Из условий устойчивости контура поперечного сечения на торцах “черновой” трубы следует ввести ограничение минимальной величины толщины стенки на торцах подготовленных концов “черновых” труб после прокатки, например, приняв:

$$S_{\text{минУПК}}^{\text{тор.н.ст.}} = S_{\text{минУЗК}}^{\text{тор.н.ст.}} = 2.5 \text{ мм}.$$

В случае полного исключения образования утолщенных концов, величина перемещения верхних валков 6 и 7 клеток непрерывного оправочного стана должна составлять:

- при прокатке переднего конца “черновой” трубы:

$$H_{\text{УПК}} = 2 \cdot \left(S_{\text{н.ст.}} - \frac{S_{\text{тр}}}{\sqrt{\frac{D_{\text{н.ст.}}}{D_{\text{тр}}}}} \right); \quad (10)$$

- при прокатке заднего конца “черновой” трубы:

$$H_{\text{УЗК}} = 2 \cdot \left(1.03 \cdot S_{\text{н.ст.}} - \frac{1.03 \cdot S_{\text{тр}}}{\sqrt{\frac{D_{\text{н.ст.}}}{D_{\text{тр}}}}} \right). \quad (11)$$

При этом, для переднего утоненного конца “черновой” трубы толщина стенки на торце будет:

$$S_{\text{УПК}}^{\text{тор.н.ст.}} = S_{\text{н.ст.}} - \frac{H_{\text{УПК}}}{2} \geq S_{\text{минУПК}}^{\text{тор.н.ст.}} \geq 2.5 \text{ мм}. \quad (12)$$

Если это условие не выполняется, то принимают: $S_{\text{УПК}}^{\text{тор.н.ст.}} = S_{\text{минУПК}}^{\text{тор.н.ст.}} = 2.5 \text{ мм}$, а величину перемещения верхних валков 6 и 7 клеток непрерывного стана ограничивают величиной:

$$H_{\text{УПК}}^{\text{огр}} = 2 \cdot (S_{\text{н.ст.}} - S_{\text{минУПК}}^{\text{тор.н.ст.}}). \quad (13)$$

Аналогично для заднего утоненного конца “черновой” трубы толщина стенки на заднем его торце будет:

$$S_{\text{УЗК}}^{\text{тор.н.ст.}} = 1.03 \cdot S_{\text{н.ст.}} - \frac{H_{\text{УЗК}}}{2} \geq S_{\text{минУЗК}}^{\text{тор.н.ст.}} \geq 2.5 \text{ мм}. \quad (14)$$

Если это условие не выполняется, то принимают:
 $S_{УЗК}^{тор.н.см.} = S_{минУЗК}^{тор.н.см.} = 2.5\text{мм}$, а величину перемещения верхних валков 6 и 7
 клетей непрерывного стана ограничивают величиной:

$$H_{УЗК}^{озр} = 2 \cdot (1.03 \cdot S_{н.см} = S_{минУЗК}^{тор.н.см.}). \quad (15)$$

Средний коэффициент вытяжки металла в редуционном стане:

- при образовании переднего утолщенного конца:

$$\mu_{срУПК} = \frac{(D_{н.см} - S_{н.см}) \cdot S_{н.см}}{(D_{тр} - S_{срУПК}) \cdot S_{срУПК}}. \quad (16)$$

- при образовании заднего утолщенного конца:

$$\mu_{срУЗК} = \frac{(D_{н.см} - 1.03 \cdot S_{н.см}) \cdot 1.03 \cdot S_{н.см}}{(D_{тр} - S_{срУЗК}) \cdot S_{срУЗК}}. \quad (17)$$

При известных величинах длин переднего $L_{УПК}^{н.см.}$ и заднего $L_{УЗК}^{н.см.}$
 утолщенных концов готовых труб, протяженность подготовленного
 переднего конца "черновой" трубы:

$$L_{УПК}^{н.см.} = \frac{L_{УПК}}{\mu_{срУПК}}, \quad (18)$$

а заднего:

$$L_{УЗК}^{н.см.} = \frac{L_{УЗК}}{\mu_{срУЗК}}. \quad (19)$$

Средняя толщина стенки на переднем подготовленном (утоненном) конце "черновой" трубы будет:

$$S_{срУПК}^{н.см} = \frac{S_{н.см} + S_{УПК}^{тор.н.см.}}{2}. \quad (20)$$

Наружный диаметр, соответствующий средней толщине стенки на
 переднем подготовленном (утоненном) конце "черновой" трубы будет:

$$D_{ср.УПК} = D_o + 2 \cdot S_{срУПК}^{н.см}, \quad (21)$$

где: D_o – диаметр оправки, мм.

Наружный диаметр торца переднего утоненного конца "черновой" трубы будет:

$$D_{мин.УПК}^{тор.н.см} = D_o + 2 \cdot S_{УПК}^{тор.н.см.} \quad (22)$$

Максимальный суммарный коэффициент вытяжки в 6 и 7 клетях при утонении переднего конца "черновой" трубы:

$$\mu_{max.УПК\ 6,7}^{н.см} = \frac{(D_{н.см.5} - S_{н.см.5}) \cdot S_{н.см.5}}{(D_{мин.УПК}^{тор.н.см} - S_{УПК}^{тор.н.см.}) \cdot S_{УПК}^{тор.н.см.}} \quad (23)$$

Средний суммарный в 6 и 7 клетях коэффициент вытяжки при утонении переднего конца "черновой" трубы:

$$\mu_{\text{срУПК } 6,7}^{\text{н.см}} = \frac{(D_{\text{н.см}5} - S_{\text{н.см}5}) \cdot S_{\text{н.см}5}}{(D_{\text{срУПК}} - S_{\text{срУПК}}) \cdot S_{\text{срУПК}}} \quad (24)$$

Для определения скорости перемещения верхнего валка 6 и 7 клетей непрерывного стана необходимо определить время прокатки участка переднего конца “черновой” трубы, подлежащего утонению в этих клетях.

Примем, что максимальный и средний коэффициенты вытяжки $\mu_{\text{maxУПК } 6,7}^{\text{н.см}}$ и $\mu_{\text{срУПК } 6,7}^{\text{н.см}}$ распределяется между 6 и 7 клетями непрерывного стана следующим образом:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{maxУПК } 6}^{\text{н.см}} &= \sqrt[3]{\mu_{\text{maxУПК } 6,7}^{\text{н.см}}{}^2}; \\ \mu_{\text{maxУПК } 7}^{\text{н.см}} &= \sqrt[3]{\mu_{\text{maxУПК } 6,7}^{\text{н.см}}}; \\ \mu_{\text{срУПК } 6}^{\text{н.см}} &= \sqrt[3]{\mu_{\text{срУПК } 6,7}^{\text{н.см}}{}^2}; \\ \mu_{\text{срУПК } 7}^{\text{н.см}} &= \sqrt[3]{\mu_{\text{срУПК } 6,7}^{\text{н.см}}}. \end{aligned} \quad (25)$$

Тогда максимальная скорость выхода металла из 6-ой клетки непрерывного стана:

$$V_{\text{выхУПК } 6}^{\text{max}} = V_{\text{вых}5} \cdot \mu_{\text{maxУПК } 6}^{\text{н.см}}, \quad (26)$$

а максимальная частота вращения её валков должна быть:

$$n_{\text{вУПК } 6}^{\text{max}} = \frac{V_{\text{выхУПК } 6}^{\text{max}} \cdot 60 \cdot 1000}{\pi \cdot (D_{\text{кат}6} - H_{\text{УПК } 6})}. \quad (27)$$

Вытяжка в 6-ой клетки к моменту окончания утонения переднего конца “черновой” трубы в ней:

$$\mu_6^{\text{const}} = \frac{(D_{\text{н.см}5} - S_{\text{н.см}5}) \cdot S_{\text{н.см}5}}{(D_{\text{н.см}6} - S_{\text{н.см}6}) \cdot S_{\text{н.см}6}}. \quad (28)$$

Скорость выхода металла при этом будет $V_{\text{выхУПК } 6}^{\text{const}} = V_{\text{вых}5} \cdot \mu_6^{\text{const}}$, а частоту вращения валков этой клетки необходимо уменьшить до:

$$n_6^{\text{const}} = \frac{V_{\text{вых}6}^{\text{const}} \cdot 60 \cdot 1000}{\pi \cdot D_{\text{кат}6}}. \quad (29)$$

Средняя скорость выхода металла из 6-ой клетки будет:

$$V_{\text{выхУПК } 6}^{\text{ср}} = \frac{V_{\text{выхУПК } 6}^{\text{max}} + V_{\text{вых}6}^{\text{const}}}{2}. \quad (30)$$

Длина переднего утоненного (подготовленного) конца “черновой” трубы после 6-ой клетки будет:

$$L_{\text{УПК } 6}^{\text{н.см}} = \frac{L_{\text{УПК}}^{\text{н.см}}}{\mu_{\text{срУПК } 7}^{\text{н.см}}}. \quad (31)$$

Время перемещения верхнего валка 6-ой клетки при утонении (подготовке) переднего конца “черновой” трубы будет:

$$t_{УПК6} = \frac{L_{УПК6}^{н.см}}{V_{выхУПК6}^{сп}}. \quad (32)$$

В течение этого времени следует линейно снижать частоту вращения валков 6-ой клетки непрерывного стана от частоты вращения $n_{6УПК6}^{max}$ до частоты вращения n_{66}^{const} , соответствующей расчетным для применяемой калибровки валков непрерывного стана.

Искомая скорость перемещения верхнего валка 6-ой клетки при утонении (подготовке) переднего конца “черновой” трубы будет:

$$V_{УПК6} = \frac{H_{УПК}}{t_{УПК6}}. \quad (33)$$

По аналогичным зависимостям можно определить параметры настройки системы подготовки переднего конца черновой трубы в 7-ой клетки непрерывного стана.

Таким образом, для получения переднего конца “черновой” трубы требуемого профиля получили следующие технологические параметры:

- величину предварительного (перед началом прокатки гильзы) сведения валков 6-ой и 7-ой клеток H_6 и $H_7 = H_{УПК}$, мм;

- величину предварительной (перед началом прокатки гильзы) установки частоты вращения валков 6-ой и 7-ой клеток $n_{6УПК6}^{max}$ и $n_{6УПК7}^{max}$, об/мин;

- время с момента начала прокатки, в течение которого следует разводить валки и снижать, до оговоренной калибровкой, частоту вращения валков 6-ой и 7-ой клеток $t_{УПК6}$ и $t_{УПК7}$, с;

- скорость разведения валков 6-ой и 7-ой клеток $V_{УПК6}$ и $V_{УПК7}$, мм/с;

- время $t_{6,7}$, после истечения которого с момента начала прокатки в 6-ой клетки следует начинать перемещение верхнего валка 7-ой клетки.

При подготовке (утонении) толщины стенки на заднем конце “черновых” труб верхние валки 6-ой и 7-ой клеток непрерывного оправочного стана сводят на величину $H_{УЗК}$. Так как при сведении валков начинает увеличиваться вытяжка металла, то снижается скорость входа металла в ту клетку, валки которой сближаются. При подготовке (утонении) толщины стенки на заднем конце “черновых” труб вначале сводят валки 6-ой клетки, а затем валки 7-ой клетки.

Величины толщин стенок и диаметров на торцах утоненных (подготовленных) передних и задних концов “черновых” труб должны быть равны, т.е.:

$$\begin{aligned} S_{\min УЗК}^{пор.н.см} &= S_{\min УПК}^{пор.н.см}, \\ D_{\min УЗК}^{пор.н.см} &= D_{\min УПК}^{пор.н.см}. \end{aligned} \quad (34)$$

Максимальный суммарный коэффициент вытяжки в 6-ой и 7-ой клетях при утонении заднего конца “черновой” трубы:

$$\mu_{\max \text{УЗК } 6,7}^{\text{н.см}} = \frac{(D_{\text{н.см}5} - 1,03 \cdot S_{\text{н.см}5}) \cdot 1,03 \cdot S_{\text{н.см}5}}{(D_{\min \text{УЗК}}^{\text{тор.н.см}} - S_{\min \text{УЗК}}^{\text{тор.н.см}}) \cdot S_{\min \text{УЗК}}^{\text{тор.н.см}}} \quad (35)$$

Средняя толщина стенки на заднем подготовленном (утоленном) конце “черновой” трубы будет:

$$S_{\text{срУЗК}}^{\text{н.см}} = \frac{1,03 \cdot S_{\text{н.см}} + S_{\text{УЗК}}^{\text{тор.н.см}}}{2} \quad (36)$$

Наружный диаметр, соответствующий средней толщине стенки на заднем подготовленном (утоленном) конце “черновой” трубы будет:

$$D_{\text{ср.УЗК}} = D_o + 2 \cdot S_{\text{срУЗК}}^{\text{н.см}} \quad (37)$$

Средний суммарный в 6 и 7 клетях коэффициент вытяжки при утонении заднего конца “черновой” трубы:

$$\mu_{\text{срУЗК } 6,7}^{\text{н.см}} = \frac{(D_{\text{н.см}5} - 1,03 \cdot S_{\text{н.см}5}) \cdot 1,03 \cdot S_{\text{н.см}5}}{(D_{\text{срУЗК}} - S_{\text{срУЗК}}^{\text{н.см}}) \cdot S_{\text{срУЗК}}^{\text{н.см}}} \quad (38)$$

Для определения скорости перемещения верхнего валка 6 и 7 клеток непрерывного стана необходимо определить время прокатки участка заднего конца “черновой” трубы, подлежащего утонению в этих клетях.

Примем, как и для утонения переднего конца “черновой” трубы, что максимальный $\mu_{\max \text{УЗК } 6,7}^{\text{н.см}}$ и средний $\mu_{\text{срУЗК } 6,7}^{\text{н.см}}$ коэффициенты вытяжки распределяется между 6 и 7 клетями непрерывного стана следующим образом:

$$\begin{aligned} \mu_{\max \text{УЗК } 6}^{\text{н.см}} &= \sqrt[3]{\mu_{\max \text{УЗК } 6,7}^{\text{н.см}}{}^2}; \\ \mu_{\max \text{УЗК } 7}^{\text{н.см}} &= \sqrt[3]{\mu_{\max \text{УЗК } 6,7}^{\text{н.см}}}; \\ \mu_{\text{срУЗК } 6}^{\text{н.см}} &= \sqrt[3]{\mu_{\text{срУЗК } 6,7}^{\text{н.см}}{}^2}; \\ \mu_{\text{срУЗК } 7}^{\text{н.см}} &= \sqrt[3]{\mu_{\text{срУЗК } 6,7}^{\text{н.см}}}. \end{aligned} \quad (39)$$

Тогда минимальная скорость входа металла в 6-ую клеть непрерывного стана:

$$V_{\text{вхУЗК } 6}^{\min} = \frac{V_{\text{вых } 6} \cdot \frac{D_{\text{кат}6}}{D_{\text{кат}6} - H_{\text{УЗК}}}}{\mu_{\max \text{УЗК } 6}^{\text{н.см}}} \quad (40)$$

Вытяжка в 6-ой клетки к моменту окончания утонения заднего конца “черновой” трубы в ней:

$$\mu_6^{\text{const}} = \frac{(D_{\text{н.см}5} - 1,03 \cdot S_{\text{н.см}5}) \cdot 1,03 \cdot S_{\text{н.см}5}}{(D_{\text{н.см}6} - 1,03 \cdot S_{\text{н.см}6}) \cdot 1,03 \cdot S_{\text{н.см}6}} \quad (41)$$

Скорость входа металла при этом будет:

$$V_{\text{exVЗК } 6}^{\text{const}} = \frac{V_{\text{вых } 6}}{\mu_6^{\text{const}}} \quad (42)$$

Средняя скорость прокатки заднего утоненного (подготовленного) конца “черновой” трубы будет:

$$V_{\text{exVЗК } 6}^{\text{cp}} = \frac{V_{\text{exVЗК } 6}^{\text{мин}} + V_{\text{exVЗК } 6}^{\text{const}}}{2} \quad (43)$$

Длина заднего утоненного (подготовленного) конца “черновой” трубы после 6-ой клетки будет:

$$L_{\text{VЗК } 6}^{\text{н.см.}} = \frac{L_{\text{VЗК } 6}^{\text{н.см.}}}{\mu_{\text{cpVЗК } 7}^{\text{н.см.}}} \quad (44)$$

Время перемещения (сведения) верхнего валка 6-ой клетки при утонении (подготовке) заднего конца “черновой” трубы будет:

$$t_{\text{VЗК } 6} = \frac{L_{\text{VЗК } 6}^{\text{н.см.}}}{V_{\text{exVЗК } 6}^{\text{cp}}} \quad (45)$$

Искомая скорость перемещения верхнего валка 6-ой клетки непрерывного стана при утонении (подготовке) заднего конца “черновой” трубы будет:

$$V_{\text{VЗК } 6} = \frac{H_{\text{VЗК } 6}}{t_{\text{VЗК } 6}} \quad (46)$$

По аналогичным зависимостям можно определить параметры настройки системы подготовки заднего конца черновой трубы в 7-ой клетки непрерывного стана.

Выводы

Для получения заднего конца “черновой” трубы требуемого профиля получили следующие технологические параметры:

- величину сближения (сведения при прокатке) валков 6-ой и 7-ой клетей $H_6 \text{ VЗК}$ и $H_7 \text{ VЗК} = H_{\text{VЗК}}$, мм;
- время с момента начала подготовки заднего конца “черновой” трубы, в течение которого следует сводить валки 6-ой и 7-ой клетей $t_{\text{VЗК } 6}$ и $t_{\text{VЗК } 7}$, с;
- скорость сведения верхних валков 6-ой и 7-ой клетей $v_{\text{VЗК } 6}$ и $v_{\text{VЗК } 7}$, мм/с.

Корректировать частоту вращения валков 6-ой и 7-ой клетей при утонении стенки на заднем конце “черновой” трубы не требуется, так как этот участок трубы прокатывается при утонении вначале только в 6-ой, а затем только в 7-ой клетки, т.е. не в режиме непрерывной прокатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Редукционные станы / В.П. Анисифоров, Л.С. Зельдович, В.Д. Курганов, и др. – М.: Металлургия, 1971. – 256 с.