

УДК 621.771.014

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВАЛКОВЫХ УЗЛОВ ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Александр Сергеевич Куприянов

Магистр 1 года,

*кафедра «Машины и технологии обработки металлов давлением им. И.А. Норицына»
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)*

Научный руководитель: Юрий Анатольевич Морозов,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением им. И.А. Норицына»

Ключевые слова: *редуцирование (reducing), коэффициент динамичности (dynamic response factor), динамическая нагрузка (dynamical load)*

Аннотация: *Рассматривается механизм возникновения колебательных процессов валковых узлов при прокатке бесшовных горячедеформированных труб, приводятся исследования влияния резонансных явлений в очаге деформации на динамические характеристики работы прокатного валка.*

Согласно стратегии развития Российской трубной промышленности, приоритетными направлениями производственной и технической политики является увеличение доли высокотехнологичной, наукоемкой, конкурентоспособной продукции в общем выпуске трубной продукции.

Важнейшей задачей является коренная реконструкция и модернизация существующего производства позволяющая получить высоко конкурентоспособную продукцию не только на внутреннем, но и на внешнем рынке.

Из трубной продукции, широко используемой в настоящее время в нефтегазовой промышленности, являются, безусловно, бесшовные горячедеформированные трубы, обеспечивающие высокие показатели прочности ввиду однотипности механических свойств металла и отсутствия концентраторов напряжений в виде сварного шва.

Основными технологическими операциями производства бесшовных труб являются:

- прошивка цилиндрической заготовки на косовальковом стане поперечно-винтовой прокатки в полулю гильзу;
- раскатка толстой стенки гильзы и уменьшение ее по диаметру на оправке в пилигримовом стане периодической прокатки или непрерывном стане в черновую трубу;
- калибровка трубы с одновременным редуцированием по диаметру и толщине стенки в редуционно-растяжном стане (PPC).

Таким образом, в потоке трубопрокатного агрегата основным является PPC-стан или аналогичный. И только при точном соблюдении температурного и деформационно-скоростного режима возможно получение продукции с заданными размерами. Так, регулировка частоты вращения валков осуществляется с учетом требуемого коэффициента вытяжки согласно таблице прокатки.

Настройка стана является правильной, если диаметр и толщина стенки правильно нагретой трубы по всей длине находится в пределах допусков и пр. При установившемся процессе проверка наружного диаметра производится периодически через 10...15 труб.

Особенностью редуцирования труб с натяжением является более высокое качество продукции в результате образования меньшей поперечной разностенности, в отличие от

прокатки без натяжения, а также возможность получения труб малых диаметров. Однако при поштучной прокатке наблюдается повышенная продольная разностенность на концах труб. Утолщенные концы при редуцировании с натяжением образуются из-за того, что передний и задний концы трубы при прохождении через межклетевые промежутки стана не подвергаются полному воздействию натяжения.

Тянущие возможности РРС стана обусловлены разницей натяжений между данной и предыдущей клетью, при этом увеличение или поддержание обжатия в определенных пределах обуславливает превышение переднего натяжения над задним.

Максимальная величина натяжения в стане ограничивается двумя факторами: тянущей способностью валков и условиями разрыва трубы в стане.

Соответственно снижение обжатия, ввиду упругой отдачи валков, приведет к уменьшению переднего натяжения относительно заднего, и исключению тянущего усилия данной рабочей клетки. Возможность прокатки в этом случае будет определяться подпором, действующим от предыдущих клеток.

Следует отметить, что основным параметром рабочей клетки прокатного стана является расчет на прочность и деформацию валкового узла. Вместе с тем, на практике всегда могут возникнуть случаи, вызывающие отклонение технологического процесса от расчетного и снижающие качество трубы при редуцировании. Так, повышенный диаметр черновой трубы-заготовки может стать причиной овальности или искривления трубы, а также продольной разностенности.

Если методика расчета валков на статическую прочность и деформацию является отработанной и общепризнанной, то последующие процессы – динамические, колебательные, вибрационные и пр. являются недостаточно изученными, влияющими на формирование высокочастотной составляющей продольной и поперечной разнотолщинности раската [1].

Статическая прочность подразумевает устоявшийся процесс прокатки и постоянное давление металла на валки, в то время как повышенная динамика обусловлена начальным периодом захвата полосы валками и ударным приложением нагрузки, обусловленным скоростью прокатки и величиной обжатия металла.

В качестве допущения принимаем, что колебательный характер среднего давления прокатки изменяется по синусоидальному закону [2, 3]

$$\bar{\sigma}'_{cp} = \frac{\sigma'_{cp}}{\sigma_T} = \bar{\sigma}_{cp} \left[1,0 + A \sin \left(C \frac{t}{t_{np}} + B \right) \right], \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}_{cp}$ – стабильное значение среднего давления прокатки;

A, C, B – коэффициенты, определяемые временными факторами;

t_{np} – время прокатки.

Так, в начальный момент времени $t=0$ из-за отсутствия амплитудного отклонения среднее давление прокатки равно нулю $\bar{\sigma}_{cp}=0$, что определяет временную функцию в зависимости (1)

$$\sin \left(C \frac{t}{t_{np}} + B \right) = 0 \quad \text{и} \quad B = 0.$$

При максимальном амплитудном значении давления и соответствующем времени прокатки t_{np} временная функция

$$\sin \left(C \frac{t}{t_{np}} + B \right) = 1,0 \quad \text{и} \quad C = \frac{\pi}{2} \quad \text{или} \quad \sin \frac{\pi}{2} \frac{t}{t_{np}} = \sin k t.$$

В этих условиях энергосиловые параметры прокатки будут подчиняться зависимости

$$m \frac{d^2 Z_x}{dt^2} + C Z_x = P(1,0 + A \sin k t), \text{ где } C = \frac{C_{\text{кл}} C_{\text{тр}}}{C_{\text{кл}} + C_{\text{тр}}} = \frac{C_{\text{тр}}}{1 + \frac{C_{\text{тр}}}{C_{\text{кл}}}},$$

где m – масса валков; Z_x – вертикальное перемещение вала;

C – жесткость системы «клеть-труба».

Согласно исследованиям Королева А.А., суммарное упругое сжатие валковой системы при прокатке $W = 0,7 \cdot 10^{-5} P/D$ [4].

Данная величина включает в себя упругую деформацию клетки $W_{\text{кл}} = P/C_{\text{кл}}$ и упругое сжатие трубы $W_{\text{тр}} = P/C_{\text{тр}}$, характеризуемые, соответственно, жесткостью клетки и трубы

$$C_{\text{кл}} = (0,5 \dots 0,6) \frac{P}{W} \text{ и } C_{\text{тр}} = \frac{P}{\Delta D} = \frac{P}{D_{i-1} - D_i}. \quad (2)$$

Так как жесткость рабочей клетки намного больше жесткости трубы, можно сделать следующее допущение $C \cong C_{\text{тр}}$. Решение уравнения динамики устанавливает

$$Z_x = k_1 \cos \left(\sqrt{\frac{C_{\text{тр}}}{m}} \frac{t}{t_{\text{пр}}} \right) + k_2 \sin \left(\sqrt{\frac{C_{\text{тр}}}{m}} \frac{t}{t_{\text{пр}}} \right) + P \left(\frac{1}{C_{\text{тр}}} + \frac{A \sin k t}{C_{\text{тр}} - k^2 m} \right).$$

Теоретические расчеты, подтвержденные экспериментальными исследованиями, позволяют утверждать

$$\frac{A}{C_{\text{тр}} - k^2 m} \ll 1,0, \text{ что определяет } Z_x = k_1 \cos \left(\sqrt{\frac{C_{\text{тр}}}{m}} \frac{t}{t_{\text{пр}}} \right) + k_2 \sin \left(\sqrt{\frac{C_{\text{тр}}}{m}} \frac{t}{t_{\text{пр}}} \right).$$

В начальный момент времени прокатки при $t = 0$ и отсутствии очага деформации $Z_x = 0$ коэффициенты $k_1 = -P/C_{\text{тр}}$ и $k_2 = 0$. Тогда, обозначая угловую частоту собственных колебаний $\omega = \sqrt{C_{\text{тр}}/m}$, находим максимальный коэффициент динамичности

$$k_{\text{д max}} = 1,0 + \frac{\sin \omega t_{\text{пр}}}{\omega t_{\text{пр}}}.$$

Оцениваем процесс прокатки по средним вероятностным значениям

$$k_{\text{д}} = \frac{1,0 + k_{\text{д max}}}{2} = \frac{2 + A \frac{\sin \omega t_{\text{пр}}}{\omega t_{\text{пр}}}}{2}.$$

При захвате трубы валками и отсутствии влияния на энергосиловые параметры прочих технологических факторов прокатки (трение, натяжение и пр.) принимаем постоянство среднего давления $A \cong 1,0$. Тогда коэффициент динамичности

$$k_{\text{д}} = \frac{2 + \frac{\sin \omega t_{\text{пр}}}{\omega t_{\text{пр}}}}{2}. \quad (3)$$

Рассмотрим динамику работы валкового узла редукционно-растяжного стана (рис. 1).

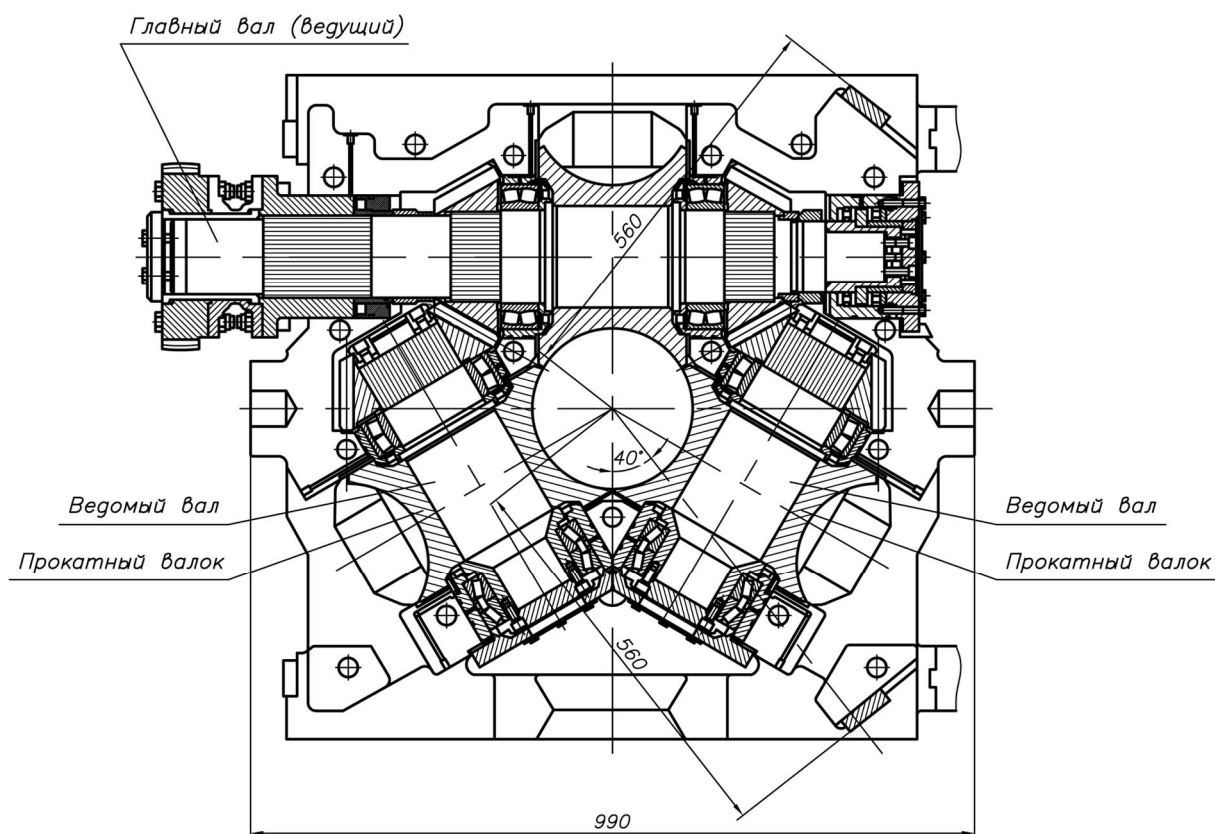


Рис. 1. Рабочая клеть 22-клетевого редукционного стана SRW420118/275114 ПАО «ТАГМЕТ»

В 1-й рабочей клетке трубная заготовка 190×8,4 мм получает обжатие 1,0% по диаметру и редуцируется до 188,1 мм (изменением толщины пренебрегаем).

Горизонтальная составляющая усилия металла на валки, определяется разностью усилий переднего и заднего натяжений с учетом упрочнения металла (в 1-й клетке натяжение отсутствует) [5]

$$P_r = \sigma_{T\text{cp}} \frac{F_0 + F_1}{2} = 70,0 \frac{4792,3 + 4742,2}{2} 10^{-3} = 333,7 \text{ кН},$$

где $\sigma_{T\text{cp}} \approx 70,0$ МПа – среднее сопротивление пластической деформации металла в очаге деформации при температуре задачи трубы в стан не ниже 900°C;

F_0, F_1 – площади поперечного сечения переднего и заднего концов трубы

$$F_1 = \pi (D_1 - S_1) S_1 = \pi (188,1 - 8,4) 8,4 = 4742,2 \text{ мм}^2,$$

$$F_0 = \pi (D_0 - S_0) S_0 = \pi (190,0 - 8,4) 8,4 = 4792,3 \text{ мм}^2.$$

Длина очага деформации по вершине калибра

$$l = \sqrt{\frac{\pi D_i}{4} (D_{i-1} - D_i)} = \sqrt{\frac{\pi 188,1}{4} (190,0 - 188,1)} = 16,75 \text{ мм}.$$

Вертикальная составляющая усилия металла на валки

$$P_b = q F_{\text{пов}} = (14,4 \cdot 53,6) 10^{-3} = 0,77 \text{ кН},$$

где q – базовое давление металла на валок

$$q = \eta \sigma_{T\text{cp}} \frac{2 S_i}{D_i} = 2,31 \cdot 70,0 \frac{2 \cdot 8,4}{188,1} = 14,4 \text{ МПа},$$

η – коэффициент, учитывающий увеличение давления вследствие влияния внеконтактных зон деформации

$$\eta = 1,0 + 0,55 \frac{D_i}{l} \sqrt{\frac{S_{i-1}}{D_i}} = 1,0 + 0,55 \frac{188,1}{16,75} \sqrt{\frac{8,4}{188,1}} = 2,31,$$

F_k – площадь контактной поверхности. С достаточной для практических расчетов точностью можно принять

$$F_k = (0,9 \dots 0,95) l D_i \sin \frac{\pi}{a} = 0,93 \cdot 16,75 \cdot 188,1 \sin \frac{\pi}{3} = 53,6 \text{ мм}^2,$$

D – ширина калибра, приравненная к диаметру прокатываемой трубы;

$a = 3$ – число валков в клет.

Равнодействующее усилие прокатки

$$P = \sqrt{P_b^2 + P_r^2} = \sqrt{0,77^2 + 333,7^2} = 333,7 \text{ кН.}$$

Жесткость системы «клеть-труба» (2)

$$C_{\text{тр}} = \frac{P}{D_{i-1} - D_i} = \frac{333,7}{190,0 - 188,1} = 175,6 \text{ кН/мм.}$$

При ориентировочной массе валкового узла $m \approx 0,35 \text{ т}$ ($\sim 3,5 \text{ кН}$), их угловая частота собственных колебаний и время прокатки при линейной скорости трубы в очаге деформации $v = 1,0 \text{ м/с}$

$$\omega = \sqrt{\frac{C_{\text{од}}}{m}} = \sqrt{\frac{175,6}{3,5}} = 7,1 \text{ с}^{-1}; \quad t_{\text{ю}} = \frac{l}{v} = \frac{16,75}{1,0 \cdot 10^3} = 0,0168 \text{ с.}$$

Коэффициент динамичности (3)

$$k_d = \frac{2 + \frac{\sin \omega t_{\text{пр}}}{\omega t_{\text{пр}}}}{2} = \frac{2 + \frac{\sin 7,1 \cdot 0,0168}{7,1 \cdot 0,0168}}{2} = 1,5.$$

Литература

1. Барышева В.Ю. Роль высокочастотной составляющей при формировании продольной разнотолщинности полос при прокатке на 20-валковых станах и мероприятия по ее снижению // Дисс. канд. техн. наук. М.: НИИ ЧерМет им. И.П. Бардина, 1993. 127 с.
2. Кохан Л.С., Коростелев А.Б., Морозов Ю.А., Алдунин А.В., Белелюбский Б.Ф., Винокуров А.Я. Силовые и кинематические параметры продольной листовой прокатки. М.: МГВМИ, 2012. 432 с.
3. Морозов Ю.А., Белелюбский Б.Ф. Исследование колебательных и динамических процессов продольной листовой прокатки // Современная металлургия нового тысячелетия: сб. науч. тр. Междунар. научн.-практ. конф. 8-11 декабря 2015 г. Часть 1. Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2015. С. 33-40.
4. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных цехов. М.: Металлургиздат, 1960. 495 с.
5. Коликов А.П., Романенко В.П., Самусев С.В. и др. Машины и агрегаты трубного производства. М.: МИСиС, 1998. 536 с.