

УДК 621.77

Чуев А. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ТРУБ

Точность прокатываемых труб оказывает большое влияние на их конкурентоспособность. Одним из основных параметров, характеризующих точность труб, является уровень поперечной разностенности. Он зависит от способа производства и условий ведения процесса прокатки.

Для труб, производимых на ТПА-140 с двухклетевым станом продольной прокатки, характерен высокий уровень симметричной компоненты поперечной разностенности, составляющей значительную ее часть [1].

Главными причинами наведения симметричной разностенности при продольной прокатке на оправке являются применение калибров с выпусками и их овализация из-за изменения расстояния между валками в качестве способа регулирования толщины стенки труб и суммарной вытяжки для получения заданной длины труб [2].

Дополнительными факторами, повышающими уровень симметричной разностенности, являются нестабильность выполнения кантовки трубы перед чистовым проходом, износ калибров, неудовлетворительная раскатка симметричных утолщений в трехвалковых обкатных станах, утолщение стенки в выпусках при калибровании (редуцировании) [3].

Учитывая возможность индивидуальной настройки первого и второго станов продольной прокатки (СПП-1 и СПП-2), наиболее эффективным способом снижения уровня симметричной разностенности и существенного повышения точности труб является оптимизация выбора размеров оправок и распределения обжатий по стенке между станами ТПА-140.

Целью работы является разработка графической модели процесса продольной прокатки на оправке, встраиваемой в программу расчета таблиц прокатки, для расчета коэффициентов вытяжки, обеспечивающих оптимальную настройку станов, и, за счет этого, минимизацию симметричной разностенности прокатываемых труб.

В модели процесса прокатки выполняются расчеты профиля калибров, контуров сечений металла после каждой ступени деформации, их площадей. Координаты контуров прокатного инструмента и металла представлены в виде рядов данных электронных таблиц. Графическое представление выполнено в виде круговых диаграмм параметров поперечных сечений калибров, металла и оправок с наложением ступеней технологического процесса прокатки друг на друга.

Поскольку модель технологического процесса должна решать проблему оптимизации настройки станов ТПА, в ее задачу входит:

- выбор оптимальных размеров оправок;
- автоматический подбор зазора между валками СПП-1 и СПП-2;
- корректировка толщины стенки гильзы (при необходимости) для получения оптимальных параметров поперечного сечения труб после чистового прохода в СПП-2;
- определение коэффициентов вытяжки, обеспечивающих наряду с оптимальной настройкой станов устойчивый захват трубы валками.

Для учета степени износа калибров, его влияния на окончательную форму труб в программе предусмотрен модуль учета экспериментальных данных «по влиянию объема прокатанных труб [4] на изменение площади калибра и распределение износа по периметру калибра» для всех применяемых групп калибров. При вводе информации об объеме прокатанных ранее труб программа формирует ряды данных для корректировки профиля калибров с учетом закономерностей износа. При вводе параметров настройки станов (диаметров применяемых оправок, зазоров между валками под нагрузкой и фактически получаемых вытяжек) программа рассчитывает износ по отклонению фактической площади калибра от расчетной.

Для решения перечисленных задач требуется определение площадей сечений калибров и труб с учетом искажений, вносимых износом инструмента и изменением положения валков относительно оси прокатки при их сведении и разведении для получения заданной настройки.

Площадь идеального калибра с проектным зазором между валками составляет:

$$F_{ки} = r_k^2 \cdot (\pi - 2 \cdot \alpha_g) + 2 \cdot \rho^2 \left\{ \alpha_g - \arcsin \left(\frac{(\rho - r_k) \sin \alpha_g}{\rho} \right) \right\} - 2 \cdot \rho \cdot (\rho - r_k) \cdot \sin \left\{ \alpha_g - \arcsin \left(\frac{(\rho - r_k) \sin \alpha_g}{\rho} \right) \right\}, \quad (1)$$

где r_k – радиус круглой части; α_g – угол выпуска; ρ – радиус выпуска.

Так как особенностью технологии прокатки на СПП является изменение высоты калибров СПП для получения заданных величин средней толщины стенки труб и заданных длин труб, то при сведении – разведении валков центры построения верхней и нижней половин калибра постоянно смещаются от оси прокатки на величину $\frac{\Delta_z}{2}$, где Δ_z – величина изменения стандартного зазора между валками.

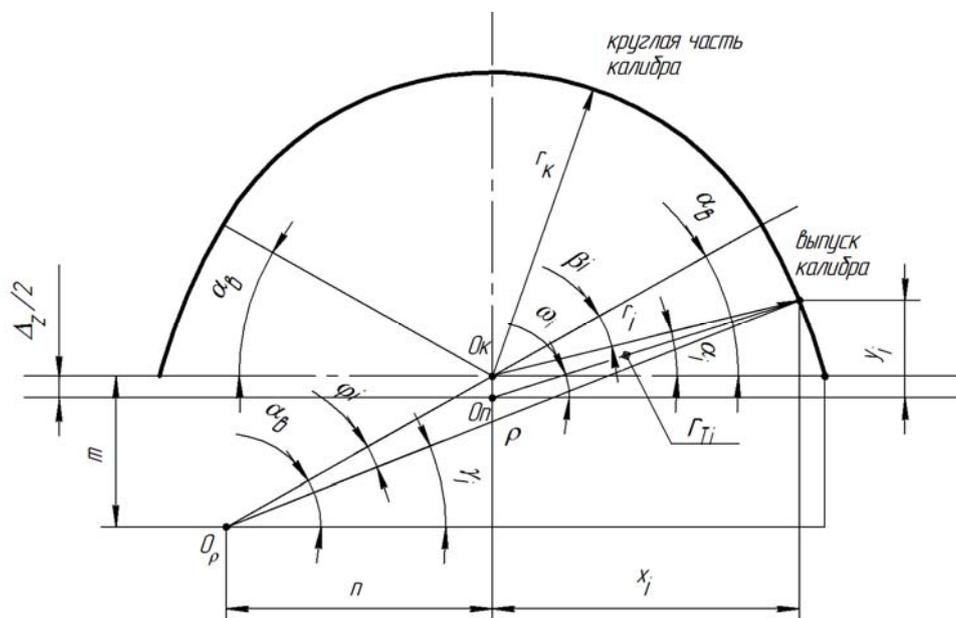


Рис. 1. Схема к расчету координат контура калибра с учетом изменения зазора между валками

Из схемы (рис. 1):

$$\Delta_z = Z - Z_0, \quad (2)$$

где Z – фактический зазор между валками; Z_0 – проектный зазор.

Изменение зазора между валками приводит к изменению площади калибра на величину, равную произведению этого изменения зазора на ширину калибра, износ калибров искажает их форму и увеличивает площадь верхней и нижней половин калибров.

Поэтому для моделирования прокатки в калибрах с любой степенью износа целесообразным является находить площади калибров, сечений оправок и прокатываемых труб путем разбиения всего сечения на N элементарных секторов, определения текущего радиуса идеального контура, введения поправки на износ и изменение зазора, определения площадей отдельных секторов по образующему сектор углу $\Delta\omega_i$ и среднему фактическому $r_{\phi(i)}$ радиусу сектора, а затем сложения площадей всех секторов:

$$F_k = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\Delta\omega_i}{2} \cdot r_{\text{фср}}^2, \quad (3)$$

где $r_{\text{фср}} = \frac{(r_{\phi(i-1)} + r_{\phi(i)})}{2}$.

Координаты контура не изношенного калибра с учетом изменения зазора между валками определяются в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.

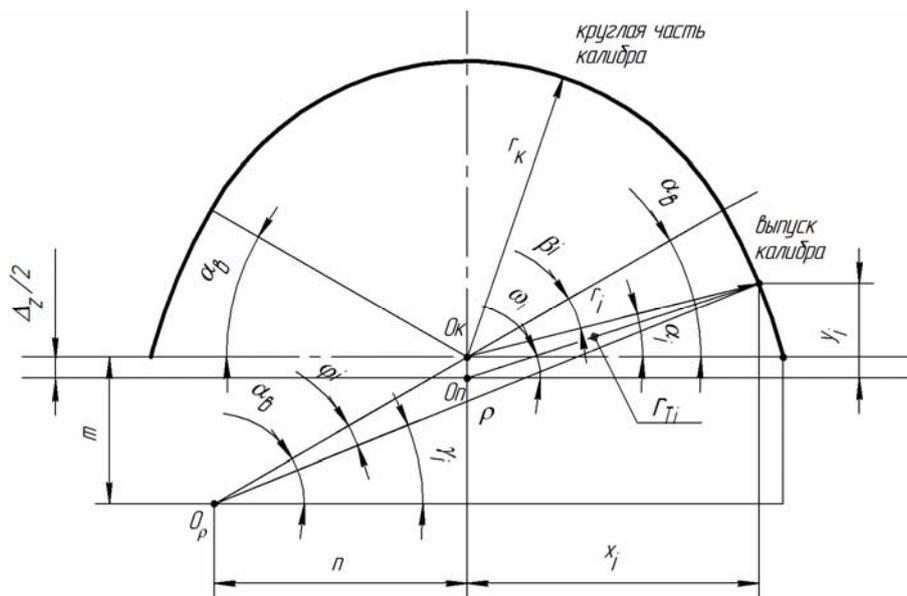


Рис. 2. Схема к определению координат калибра СПП

На участках круглой части калибра при $\pi - \alpha_\epsilon \geq \alpha_i \geq \alpha_\epsilon$ и $2\pi - \alpha_\epsilon \geq \alpha_i \geq \pi + \alpha_\epsilon$ координаты контура определяются зависимостями:

$$x_i = r_k \cdot \cos \alpha_i; \quad (6)$$

$$y_i = r_k \cdot \sin \alpha_i + \frac{\Delta_z}{2}. \quad (7)$$

На участках выпусков при $\alpha_\epsilon \geq \alpha_i \geq 2\pi - \alpha_\epsilon$ и $\pi + \alpha_\epsilon \geq \alpha_i \geq \pi - \alpha_\epsilon$

контур калибра описывается радиусом выпуска ρ .

Для этого участка координаты калибра определяются выражениями:

$$x_i = \rho \cdot \cos \gamma_i - n; \quad (8)$$

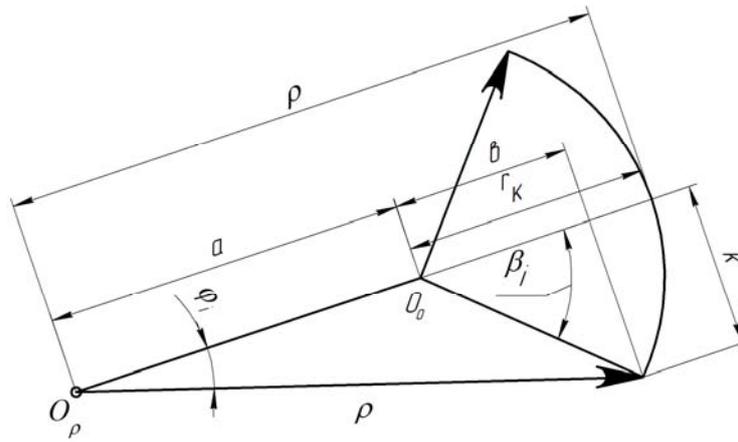
$$y_i = \rho \cdot \sin \gamma_i - m + \frac{\Delta_z}{2}, \quad (9)$$

где $m = (\rho - r_k) \cdot \sin \alpha_\epsilon$; $n = (\rho - r_k) \cdot \cos \alpha_\epsilon$; при этом угол $\gamma_i = \alpha_\epsilon - \phi_i$.

Угол ϕ_i определяется в соответствии со схемой рис. 3.

$$a = \rho - r_k; \quad k = \epsilon \cdot \text{tg} \beta_i; \quad \beta_i = \alpha_\epsilon - \alpha_i; \quad k = (a + \epsilon) \cdot \text{tg} \phi_i; \quad \epsilon \cdot \text{tg} \beta_i = (a + \epsilon) \cdot \text{tg} \phi_i; \quad \frac{\text{tg} \beta_i}{\text{tg} \phi_i} = \frac{a + \epsilon}{\epsilon}, \quad (10)$$

но $\epsilon = \rho \cdot \cos \phi - a$. (11)

Рис. 3. Схема к определению величины угла φ_i

После подстановки (11) в (10) и преобразований получили:

$$\varphi_i = \arcsin \left(\frac{-\frac{2a}{\operatorname{tg} \beta_i \cdot \rho} + \sqrt{\left(\frac{2a}{\operatorname{tg} \beta_i \cdot \rho}\right)^2 - 4 \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta_i} + 1\right) \cdot \left(\frac{a^2}{\rho^2} - 1\right)}}{2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta_i}\right)} \right). \quad (12)$$

Текущий радиус с учетом изменения зазора и износа: $r_{T(i)} = \sqrt{x_{(i)}^2 + y_{(i)}^2}$.

Фактический радиус с учетом износа: $r_{\phi(i)} = r_{T(i)} + \Delta r_{u(i)}$,

где $\Delta r_{u(i)}$ – величина износа в i -ой точке калибра.

Угол $\omega_i = \operatorname{arctg} \left(\frac{x_i}{y_i} \right)$, $\Delta \omega_i = \omega_i - \Delta \omega_{(i-1)}$; $\Delta \omega_{(0)} = 0$.

Отрицательные значения $\Delta \omega_i$ также приравниваются к нулю.

Координаты калибра с учетом изменения зазора и износа определяются зависимостями:

$$x_{\phi(i)} = r_{\phi(i)} \cdot \cos \omega_i; \quad y_{\phi(i)} = r_{\phi(i)} \cdot \sin \omega_i.$$

Толщина стенки трубы при этом определяется выражением:

$$S_i = \sqrt{\left(x_{\phi(i)} - x_{o(i)}\right)^2 + \left(y_{\phi(i)} - y_{o(i)}\right)^2}, \quad (13)$$

где $x_{o(i)}$ и $y_{o(i)}$ – координаты поверхности оправки:

$$x_{o(i)} = \frac{d_0}{2} \cdot \cos \omega_i; \quad y_{o(i)} = \frac{d_0}{2} \cdot \sin \omega_i;$$

d_0 – диаметр оправки.

Толщина стенки (зазора между оправкой и калибром) определяется по координатам точек контура калибра и оправки, лежащих на одном луче, направленном от оси прокатки под углом ω_i к горизонтали.

Так как в калибрах с выпусками в зоне выпусков имеет место не полное заполнение металлом зазора между оправкой и калибром, то осуществляется проверка соответствия толщины стенки входящих сечений и зазора. На участке поперечного сечения, где зазор

превышает толщину стенки предыдущего прохода в соответствующем месте поперечного сечения, получаемую толщину стенки принимают равной входящей толщине стенки, но скорректированной на коэффициент изменения толщины стенки в выпусках K_e . Коэффициент K_e является сложной функцией, зависящей от формы калибра, номера прохода, вытяжки, соотношения диаметра гильзы, трубы и размеров калибров СПП, положения оправки в очаге СПП, расстояния между валками СПП, Δ_z и других параметров. На основании экспериментальных данных установлено, что в диапазоне применяемых режимов деформации коэффициент K_e незначительно отличается от 1,0, поэтому до получения уточненных данных для расчетов принимаем $K_e = 1$.

Для построения диаграмм формоизменения металла при продольной прокатке в программе моделирования принимается, что наружный контур трубы совпадает с контуром калибра. На участках, где толщина стенки входящей гильзы (трубы) больше зазора между калибром и оправкой, т. е. имеет место обжатие стенки, внутренний контур трубы принимается по контуру оправки.

В местах, где толщина стенки входящей гильзы (трубы) меньше толщины зазора, координаты неконтактной части внутренней поверхности трубы определяются путем вычитания толщины стенки от координат калибра вдоль луча, проходящего от оси прокатки к поверхности калибра под углом ω_i к горизонтали (рис. 4).

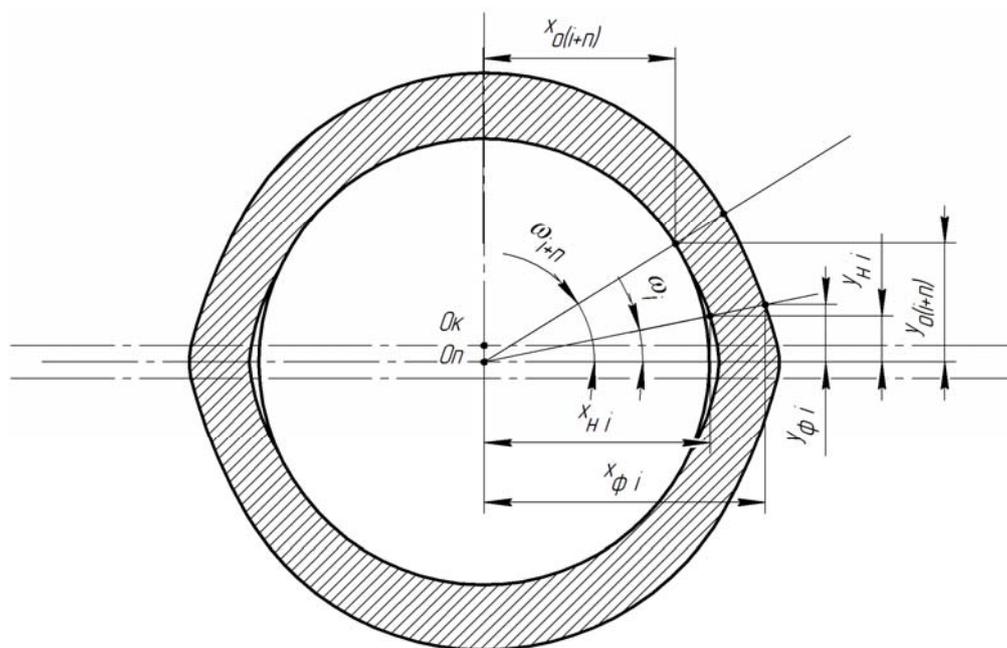


Рис. 4. Схема к определению толщины стенки трубы во внеконтактных зонах

$$y_{ni} = y_{\phi i} - S_i \cdot \sin \omega_i; \quad x_{ni} = x_{\phi i} - S_i \cdot \cos \omega_i,$$

где S_i – толщина входящей трубы, скорректированная на коэффициент изменения толщины стенки K_e .

Формирование в виде рядов данных:

- значений аргумента $\alpha_{(i)}$, изменяющегося от 0 до 2π радиан с шагом $2\pi / N$;
- значений угловых размеров элементарных секторов ω_i и $\Delta\omega_i$;
- текущих радиусов контура калибров;
- текущих радиусов контура калибров, скорректированных на величину износа;
- рассчитанных зазоров между поверхностью оправок и калибров;
- толщин стенки, определенных с учетом угла кантовки и изменения расстояния между валками;

– площадью секторов наружных и внутренних контуров гильз, труб с центральным углом $\Delta\omega_i$, позволяет осуществлять графическую визуализацию формоизменения металла с помощью построения стандартных графиков, рассчитывать площади сечений по ступеням деформации и по ним – коэффициенты вытяжки.

Автоматическая загрузка данных из электронной таблицы прокатки упрощает выполнение расчетов. Организация автоматического подбора величин зазоров между валками для получения оптимальных параметров настройки по критериям оптимизации, варьирование размерами оправок обоих станов продольной прокатки для поиска лучших параметров настройки, высокая точность расчетов позволяют находить лучшие решения и оптимизировать настройку станов за счет рекомендации оптимальных коэффициентов вытяжки. В качестве критериев оптимизации могут применяться относительная разностенность, минимальное и максимальное обжатие по стенке, минимальное обжатие в предвыпускной зоне, уровень разностенности в круглой части калибра и др.

Пример экранной формы работающей по данной методике программы моделирования конечного формоизменения металла при прокатке в СПП, встроенной в программу расчета таблиц прокатки для ТПА-140 ТПЦ – 5 ОАО «Интерпайп НТЗ», приведен на рис. 5.

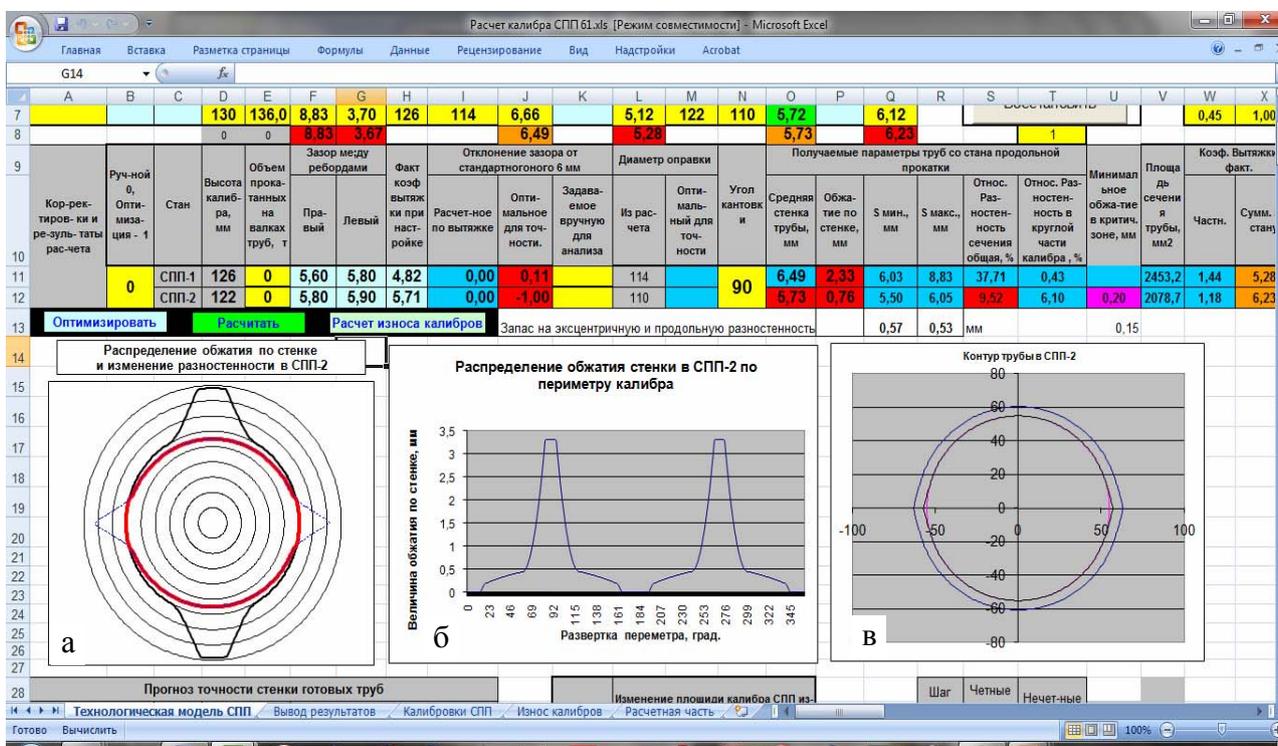


Рис. 5. Экранная форма программы расчета оптимальной настройки станов продольной прокатки

Здесь а – совмещенный круговой график толщин стенки труб после СПП-1 и СПП-2, иллюстрирующий характер изменения толщины стенки трубы в СПП-2; б – график распределения обжатия стенки в СПП-2 по периметру калибра; в – круговой график, иллюстрирующий форму сечения трубы после проката в СПП-2 и размеры зоны отставания трубы от оправки.

В увеличенном виде совмещенный круговой график толщин стенки труб после СПП-1 и СПП-2, иллюстрирующий характер изменения толщины стенки трубы в СПП-2, приведен на диаграмме (рис. 6).

Кроме круговых диаграмм, характеризующих распределение толщины стенки по периметру трубы и визуализирующих распределение обжатий по стенке в СПП-2, на основном листе программы осуществляется построение диаграммы распределения обжатия по периметру трубы. Визуализация качества настройки, учитывающая износ валков, показывает

изъяны и преимущества вариантов настройки и позволяет минимизировать уровень разностенности прокатываемых труб. Расчет оптимальных вытяжек позволяет ускорить выход на лучшие параметры проката и снизить количество настроечных труб, имеющих пониженные показатели точности.

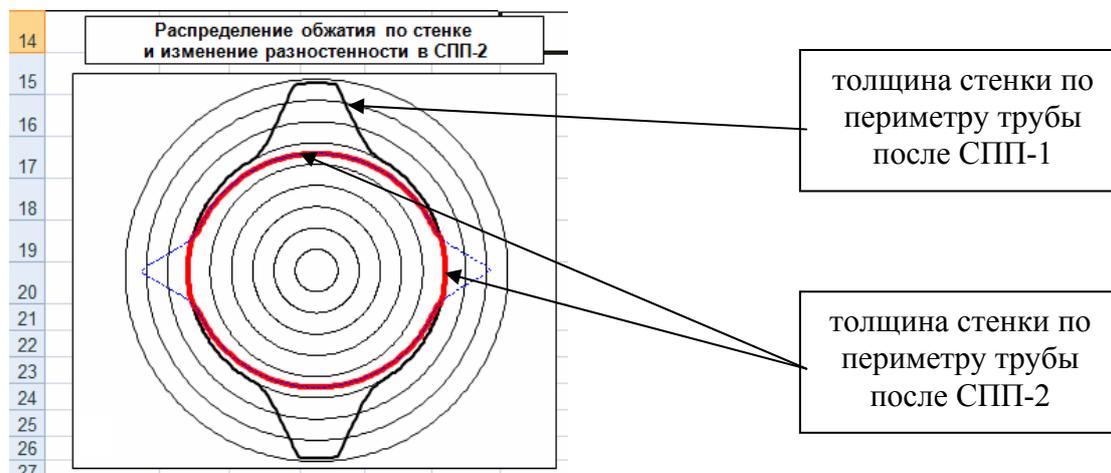


Рис. 6. Распределение обжатия по стенке

ВЫВОДЫ

Выполненный анализ структуры разностенности труб, производимых на ТПА-140 ТПЦ-5 ОАО «Интерпайп НТЗ», показал высокий уровень симметричной компоненты разностенности.

Основным и наиболее эффективным способом минимизации симметричной разностенности является оптимизация режимов обжатий по стенке трубы за счет лучшего подбора диаметра применяемых оправок и оптимизации установки зазоров между валками с учетом износа валков.

Создана методика моделирования процесса продольной прокатки на оправке для решения задачи оптимизации распределения деформации по станам ТПА-140 с целью повышения точности прокатываемых труб.

Графическое представление распределения деформации по периметру калибра, выбор оптимальных размеров оправок и расчет оптимальных вытяжек непосредственно на пультах управления станами продольной прокатки позволяет более корректно оценивать влияние настройки на величину симметричной разностенности и обеспечивает повышение точности и качества внутренней поверхности прокатываемых труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Столетний М. Ф. Точность труб / М. Ф. Столетний, Е. Д Клемперт. – М. : Металлургия, 1975. – 240 с.
2. Данилов Ф. А. Горячая прокатка и прессование труб / Ф. А. Данилов, А. З. Глейберг, В. Г. Балакин. – М. : Металлургия, 1972. – 576 с.
3. Технология трубного производства : учебник для ВУЗов / В. Н. Данченко, Б. А. Романцев, С. В. Самусев. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 640 с.
4. Чуев А. А. Учет износа валков прошивного стана при совершенствовании технологии прошивки / А. А. Чуев, В. Н. Данченко // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 2 (21). – С. 396–400.

Чуев А. А. – аспирант НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: namani@rambler.ru