

С.В. Пилипенко, В.У. Григоренко

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА  
ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ НА СТАНАХ ХПТ И ХПТР С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНИЙ БЕЗЬЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ  
ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ РАБОЧЕГО КОНУСА  
ДЕФОРМАЦИИ**

*Аннотация.* Рассматривается метод калибровки инструмента станов холодной прокатки труб, основанный на использовании линий Безье. Данный метод обеспечивает: падающую величину относительной деформации вдоль рабочего конуса; описание формы кривой развёртки ручья одной зависимостью; обеспечение плавного сопряжения участков калибровки. При помощи управляющих коэффициентов, входящих в предложенную зависимость калибровки инструмента, имеется возможность подобрать любой необходимый режим деформации вдоль конуса. При этом силовые параметры процесса контролируются с помощью математической модели. Предложенный метод требует дополнительных практических исследований.

*Ключевые слова:* холодная пильгерная валковая прокатка труб, калибровка инструмента, плавное сопряжение участков деформации

**Вступление.** Холодной прокаткой на станах ХПТ и ХПТР производят трубы с повышенными требованиями по точности геометрических размеров их поперечного сечения [1, 2]. Во многом точность геометрических размеров труб зависит от правильно рассчитанного продольного профиля рабочего конуса деформации и точности изготовления деформирующего инструмента для обеспечения заданного профиля. На станах ХПТ форма продольного сечения рабочего конуса деформации обеспечивается формой ручья калибра или бочки валка, а на станах ХПТР формой продольного сечения планки.

**Проблема.** Одной из задач при выполнении ручья с переменным сечением или планки является обеспечение их геометрических размеров согласно параметрам рассчитанной калибровки. Например, для станов ХПТ на трубопрокатное предприятие поступает калибр с

ручьём, изготовленным с припуском плюс 1,5..2 миллиметра. Окончательная шлифовка под точный размер проводится на предприятии, на специальном шлифовальном оборудовании. При этом, при расчете калибровки, порой приходится вносить изменения в режим деформации, исходя из возможностей оборудования, на котором будет производиться шлифовка инструмента. Допуски на размеры поперечного сечения по длине развертки ручья калибров довольно высокие (таблица 1).

Таблица 1

## Допуски на изготовление ручья калибра стана ХПТ

Участки ручья	Калибрующий	Три участка в конце обжим- ной зоны	Остальные участки об- жимной зоны	Разность глубин в паре	
				В ка- либро- вочном	
Допуск по глубине	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	$\pm 0,20$		$\pm 0,05$
Допуск по ширине	$+0,30$	$+0,6$	$+0,6$	Осталь- ные	$\pm 0,15$

**Анализ публикаций.** Большинство украинских предприятий оснащены станками для шлифовки калибра типов Лр-41 и Лр-40, а также более современными ЛЗ-250 и ЛЗ-250Ф. В последние годы несколько предприятий модернизировали станки ЛЗ-250, установив на них системы с числовым программным управлением. Такая модернизация позволила увеличить точность шлифовки ручья и исключила необходимость расчета и изготовления специальных кулаков-копиров.

Как известно, рабочий конус деформации в процессе ХПТ разделяется на несколько зон: зону редуцирования, зону обжатия стенки, предотделочный участок, зону калибровки и обратный конус. Все эти зоны имеют определенные размеры. Все эти участки сопрягаются между собой. Геометрия каждого из этих участков описывается определенным законом, и это затрудняет плавное их сопряжение [3].

Плавность сопряжений можно проверить, используя первые и вторые производные закона изменения всего профиля по продольной координате [3]. Модернизированные станки ЛЗ-250 имеют встроенную программу сглаживания сопряжений, однако эта программа способна сгладить кривую в определенном диапазоне перепадов. Для обеспечения сглаживания в современных калибровках инструмента при изготовлении их как на модернизированных станках ЛЗ-250,

так и на станках GG-55 (производства Германии) вводятся участки сглаживания. Это приводит к сокращению возможной длины зоны деформации. При сглаживании кривой станком режим деформации изменяется неконтролируемо. Усложняется работа расчетчика калибровки инструмента. Порой, необходимо изменять наиболее выгодные для данного случая прокатки конусности оправки, их типы, степени крутизны калибра.

**Выделение нерешенного.** Актуальным является развитие метода расчета параметров процессов ХПТ и ХПТР, а также соответствующих калибровок инструмента так, чтобы рабочий конус выполнялся по одному закону.

При этом необходимо обеспечивать:

- падающую величину относительной деформации вдоль рабочего конуса, которая удовлетворяет заданным условиям прокатки;
- описание формы кривой развёртки ручья одной зависимостью;
- обеспечение плавного сопряжения участков.

**Изложение основного материала.** Наиболее подходящей линией для построения образующей является кривая Безье (рис. 1). Математически кривая Безье степени  $n$  задаётся зависимостью:

$$\bar{P}_n(t) = \sum_{i=1}^n B_n^i(t) \bar{P}_i \quad t \in [0, 1], \quad (1)$$

где:  $\bar{P}_n(t) = \{X_i, Y_i, Z_i\}$  – координаты  $i$ -той вершины разомкнутого треугольника  $P_0 \dots P_n$ ;  $B_n^i(t) = C_n^i (1-t)^{n-i} t^i$  – базис Бренштейна;

$C_n^i = \frac{n!}{(n-i)!i!}$  – биномиальный коэффициент.

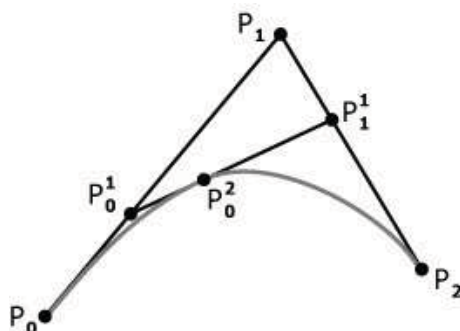


Рисунок 1

Кривая Безье с тремя опорными точками ( $P_0$ ,  $P_1$  и  $P_2$ ) [6]:  $P_0^1$  – изменяется, от  $P_0$  до  $P_1$  и описывает линейную кривую Безье;

$P_1^1$  изменяется от  $P_1$  до  $P_2$  и описывает линейную кривую Безье;  $P_0^2$  изменяется от  $P_0^1$  до  $P_1^1$  и описывает квадратичную кривую Безье

Кривая Безье второго порядка может задаваться формулой:

$$y_n = \frac{p_0(1-a)(1-Kx_n)^2 + 2p_1a(1-Kx_n)Kx_n + p_2(1-a)(Kx_n)^2}{(1-a)(1-Kx_n)^2 + 2a(1-Kx_n)Kx_n + (1-a)(Kx_n)^2} \quad (2)$$

или:

$$y_n = \frac{p_0a_0(1-Kx_n)^2 + 2p_1a_1(1-Kx_n)Kx_n + p_2a_2(Kx_n)^2}{a_0(1-Kx_n)^2 + 2a_1(1-Kx_n)Kx_n + a_2(Kx_n)^2}, \quad (3)$$

где:  $p_0, p_1, p_2$  - координаты вершин треугольника;  $a, a_0, a_1, a_2$  - управляющие коэффициенты;  $Kx_n$  - относительная координата сечения.

При этом формулы расчета значений диаметра калибров в сечениях конуса деформации принимают вид:

$$D_n = D_3 - \frac{(D_3 - D_T)(1-a)(1-Kx_n)^2 + 2(D_3 - D_T)a(1-Kx_n)Kx_n}{(1-a)(1-Kx_n)^2 + 2a(1-Kx_n)Kx_n + (1-a)(Kx_n)^2} \quad (4)$$

или:

$$D_n = D_3 - \frac{(D_3 - D_T)a_0(1-Kx_n)^2 + 2(D_3 - D_T)a_1(1-Kx_n)Kx_n}{a_0(1-Kx_n)^2 + 2a_1(1-Kx_n)Kx_n + a_2(Kx_n)^2}. \quad (5)$$

Формулы расчета значений диаметров оправки в контрольных сечениях:

$$D_n = D_{ц} - \frac{(\Delta_d - \Delta)(1-a)(1-Kx_n)^2 + 2(\Delta_d - \Delta)a(1-Kx_n)Kx_n}{(1-a)(1-Kx_n)^2 + 2a(1-Kx_n)Kx_n + (1-a)(Kx_n)^2} \quad (6)$$

или:

$$D_n = D_{ц} - \frac{(\Delta_d - \text{заз})a_0(1-Kx_n)^2 + 2(\Delta_d - \text{заз})a_1(1-Kx_n)Kx_n}{a_0(1-Kx_n)^2 + 2a_1(1-Kx_n)Kx_n + a_2(Kx_n)^2}, \quad (7)$$

где:  $D_3$  - диаметр заготовки;  $D_m$  - диаметр трубы;  $d_u$  - диаметр цилиндрической части оправки;  $\Delta d$  - перепад по внутреннему диаметру трубы;  $\Delta$  - диаметральный зазор между внутренней поверхностью трубы и цилиндрической частью оправки.

Наличие трех управляющих коэффициентов в формулах (5) и (7) позволяет более точно подобрать кривую близкую к кривой, необходимой в данных условиях деформации. Формулы с одним коэффициентом более просты для этих целей, но не обеспечивают возможность необходимого сглаживания.

При помощи управляющих коэффициентов подбирается необходимый режим деформации вдоль конуса, параметры деформации.

При этом силовые параметры процесса контролируются с помощью математической модели.

На рис. 2 показан график вторых производных закона изменения всего профиля по координате, в случае калибровки инструмента для стана ХПТ «по кривой Безье» и «по Шевакину».

Как видно, в случае калибровки по линиям Шевакина Ю.Ф. на графике имеются два всплеска: в конце зоны калибровки и в конце зоны предотделки (зона калибровки и зона обратного конуса на графике не показаны). В то же время, в случае калибровки по кривой Безье график остается ровным, что значительно облегчает работу шлифовального станка.

Указанная методика расчета параметров процесса ХПТ и соответствующей калибровки инструмента применима и для расчета калибровки планок станов ХПТР. При этом один из плюсов данной методики состоит в том, что имеется возможность рассчитывать все области деформации на планке одной зависимостью.

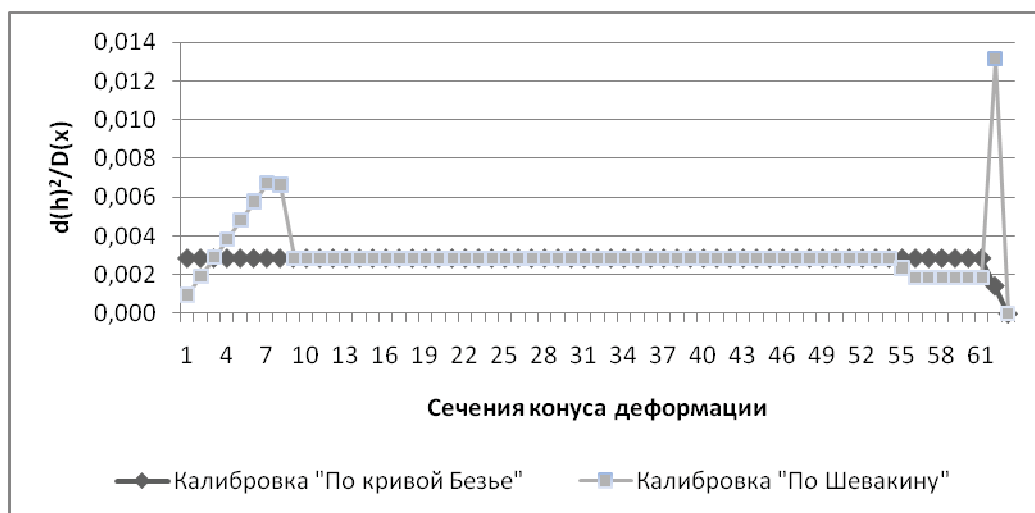


Рисунок 2

Графики вторых производных закона изменения профиля развертки ручья калибра в случае калибровки инструмента по линиям, рассчитанным по Шевакину Ю.Ф., и по линиям Безье. ( маршрут 38x7-26x5).

Данная методика была проверена при расчете параметров процесса холодной периодической прокатки и соответствующей калибровки планок для стана ХПТР 8-15 при прокатке трубы из титанового сплава по маршруту 14,5x1,24-12,7x0,889.

**Выводы.** Предложено развитие метода расчета параметров процессов ХПТ и ХПТР, а также соответствующих калибровок инструмента при построении линии, описывающей продольный профиль рабочего конуса калибра одной кривой. При этом отсутствуют сопряжения между зонами редуцирования, обжатия стенки, калибровки стенки и диаметра на рабочем конусе деформации. Для описания таких линий использовали зависимости Безье.

Такой метод расчета обеспечивает падающий закон распределения величин относительной деформации вдоль конуса деформации или развалки, а также обеспечивает плавные сопряжения участков рабочего конуса деформации при холодной пильгерной и периодической прокатке труб на станах ХПТ и ХПТР.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов В.Ф., Данченко В.Н., Фролов Я.В. Холодная пильгерная прокатка труб - Днепропетровск: Пороги, 2005. - 255 с.
2. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. - М.: Металлургия, 1963. - 212 с.
3. Григоренко В.У., Пилипенко С.В. Метод розрахунку параметрів процесу холодної пильгерної прокатки труб на оправці з криволінійною твірною з первинним урахуванням поширення металу в миттєвому осередку деформації // Системні технології. – 2008. - Т.12. - с. 150 -153.
4. Петраков Ю.В., Паньків К.М., Живцов С.П. Формирование геометрических моделей ручья калибров станов холодной прокатки труб / Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Машинобудування: Збірник наукових праць. - Вип. 57. – К.: КПІ, 2009.-С.63-70.
5. Кальченко В.В. Шлифование методом последовательного копирования кольцевого желоба переменного профиля трубопрокатных валков ориентированным инструментом / В.В. Кальченко, А.М. Ерощенко / Вісник СевДТУ. Вип. 95: Автоматизація процесів та управління: зб. наук. пр. — Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2009.-С.89-94.
6. Алгоритмические основы растровой графики: (Офіційний сайт) [Електронний ресурс] / Д.В. Иванов, А.А. Хропов, Е.П. Кузьмин и др.//– Режим доступа: <http://www.intuit.ru/department/graphics/>