

УДК 621.771

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-61-65

ПРОФИЛЬ ХОЛОСТОЙ ЗОНЫ КАЛИБРА СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Курмачев Ю.Ф.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация

В работе рассматривается вопрос о построении плавной кривой, соединяющей начало и конец холостой зоны калибра при заданных начальных условиях. Гипотетически соединить указанные точки можно бесконечным числом способов. Наиболее простыми способами построения такой кривой являются выборы элементарных функций, имеющих точку перегиба на холостом участке. **Актуальным** является улучшение кинематики любого станка обработки калибра, которая наибольшую нагрузку испытывает при прохождении точки перегиба выбранной функции. **Целью работы** является минимизация производной выбранной функции в точке ее перегиба. Кроме того, необходимо минимизировать наибольшее значение такой функции при подходе в точке начала рабочей зоны. В работе используются **математические методы**, в том числе метод итераций, применяемый при вычислении параметров искомой кривой, опирается на теорему Липшица о единственности решения данной задачи. В качестве искомой кривой выбрана косинусоида. Второй кривой, соединяющей указанные точки, является кубическая парабола. Рассматривается максимальная скорость возрастания каждой функции на холостом участке, где возникает наибольшее усилие при движении рабочего кулака на станке ЛЗ-250, и точки максимума обеих кривых на холостой зоне. **Результаты** исследования и численные эксперименты: выбор сделан в пользу кубической параболы, имеющей меньшее максимальное значение, чем у косинусоиды, и меньшее значение производной функции в точке перегиба. **Подобные исследования** с указанием конкретной функции и минимизации усилий при прохождении холостой зоны калибра во время изготовления калибров **проведены впервые**. Указанный метод расчета профиля холостой зоны, рассчитанный соединением точек конца рабочей зоны и ее начала в виде параболы с соответствующими начальными условиями, успешно применен при изготовлении калибров на станке ЛЗ-250 Красноярского металлургического завода. **Практическая значимость** работы заключается в более долговечной эксплуатации дорогостоящего оборудования, в частности шлифовального станка ЛЗ-250.

Ключевые слова: труба, холодная прокатка труб, холостая зона калибра, косинусоида, парабола, расчет, станок ЛЗ-250.

Введение

Из известных технологий получения бесшовных труб из алюминиевых сплавов наиболее перспективной является технология производства холоднодеформируемых труб на пилигримовых станах методом холодной прокатки. В качестве рабочего инструмента применяют калиброванные одноручьевые валки (калибры), вращающиеся в сторону, противоположную подаче в них трубной заготовки. Прокатка трубы ведётся на круглом конусном дорне (оправке), который служит внутренней жёсткой опорой. Основными параметрами рабочего инструмента являются рабочая и холостая зоны валков. При расчёте параметров рабочего инструмента одной из основных задач является расчёт холостой зоны калибра. Эта задача рассматривалась в [1], однако построения холостой зоны по сопрягаю-

щимся окружностям неоднозначны и рассматриваются предположительно. В работе [2] авторы, предположив в качестве функции, описывающей холостую зону калибра, косинусоиду, недостаточно проанализировали предложенную кривую.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Пусть D, d – наружные диаметры заготовки и готовой трубы соответственно, k – конусность редуцирования по диаметру на участке АБ, равная коэффициенту наклона отрезка OO_1 , l – длина холостой зоны. Задача состоит в построении кривой, плавно соединяющей конец рабочей зоны (точку D_1) и начало рабочей зоны (точку A_1). Точки D_1 и A_1 имеют координаты $D_1(0;d)$, $A_1(l;D)$. Значение производной функции, описывающей искомую кривую, в точке A_1 должно быть равно значению конусности редуцирования k , а в точке D_1 – равной нулю (**рис. 1**).

© Курмачев Ю.Ф., 2016

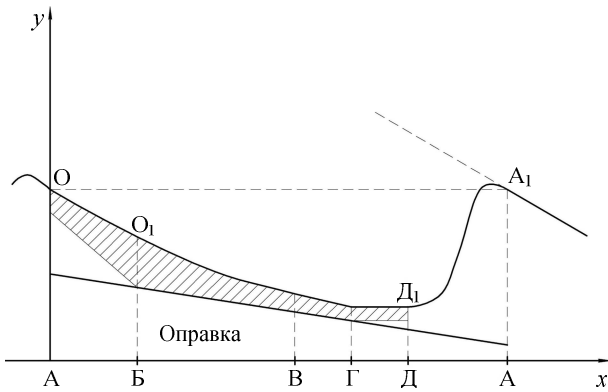


Рис. 1. Схема полной развёртки калибра в прямоугольной системе координат: АБ-зона редуцирования; БВ-зона обжима; ВГ-зона калибровки по стенке; ГД-калибрующая зона; АД-рабочая зона; ДА-холостая зона

В качестве искомой функции рассмотрим косинусоиду

$$y(x) = -a \cdot \cos(bx) + a + d \quad (1)$$

с неопределёнными коэффициентами $a > 0$, $b > 0$. Согласно начальным условиям

$$y(0) = d, \quad y(l) = D,$$

тогда

$$-a \cdot \cos(bl) + a + d = D.$$

Находим производную функции

$$y'(x) = ab \cdot \sin(bx),$$

согласно условию задачи

$$y'(l) = k$$

или

$$ab \cdot \sin(bl) = k.$$

Условие $y'(0) = 0$ выполняется, кроме того, производная обращается в нуль в точке максимума косинусоиды $y'(x_0) = 0$, то есть

$ab \cdot \sin(bx_0) = 0$. Отсюда $x_0 = \frac{\pi}{b}$. В точке максимума производной возникает наибольшая динамическая нагрузка приводов и узлов станка при выполнении движений холостого хода. Точка максимума производной, в свою очередь, является точкой перегиба косинусоиды, где вторая производная функции равна нулю: $y'' = ab^2 \cdot \cos(bx) = 0$. Тогда $x = \frac{\pi}{2b}$, и макси-

мальное значение производной косинусоиды

$$y'\left(\frac{\pi}{2b}\right) = ab.$$

Система уравнений относительно a и b имеет вид

$$\begin{cases} ab \cdot \sin(bl) = k, \\ a(1 - \cos(bl)) = D - d. \end{cases} \quad (2)$$

Пусть $t = bl$. Из второго уравнения системы (2) находим

$$a = \frac{D - d}{1 - \cos t}, \quad (3)$$

подставим a в первое уравнение системы (2)

$$\frac{(D - d)t}{(1 - \cos t)l} \sin t = k. \quad (4)$$

Из (4) находим

$$t = \frac{c(1 - \cos t)}{\sin t}$$

или

$$t = c \cdot \operatorname{tg} \frac{t}{2},$$

где $c = \frac{kl}{D - d}$. Получили уравнение вида

$$t = \varphi(t). \quad (5)$$

Если функция $\varphi(t)$ удовлетворяет на отрезке $[t_0, t_0 + r]$ условию Липшица

$$|\varphi(t_1) - \varphi(t_2)| \leq \alpha |t_1 - t_2| \quad (6)$$

с постоянной α

$$\alpha = \max_{[t_0, t_0 + r]} |\varphi'(t)|, \quad (7)$$

то согласно теореме о единственности решения [3, 4] уравнение (5) имеет решение

$$t_* = \lim_{n \rightarrow \infty} t_n, \quad (8)$$

где

$$t_n = \varphi(t_{n-1}), \quad n = 1, 2, \dots \quad (9)$$

Находим

$$\varphi(t) = \frac{c(1 - \cos t)}{\sin^2 t}.$$

Потребуем выполнение условия единственности решения (5).

$$0 < \alpha < 1,$$

$$0 \leq \varphi(t_0) - t_0 \leq (1 - \alpha)r.$$

Длина холостой зоны $l \approx 343,1$. В соответствии с технологическими рекомендациями копусность редуцирования по диаметру $-0,14 \leq k \leq 0$, разница между диаметрами заготовки и готовой трубы $30 \leq D - d \leq 40$ мм, поэтому $-1,6 < c < -0,86$. Непосредственными вычислениями получаем

$$t_0 = 5,42, \quad r = 0,75.$$

Таким образом, условия теоремы о существовании единственного решения [3, 4] выполнены, решение уравнения (5) с заданной точностью находим по формуле (9), при этом имеет место оценка

$$|t_n - t_{n-1}| \leq \frac{\alpha}{1 - \alpha} |t_{n-1} - t_{n-2}|, \quad n = 1, 2, \dots$$

Так как $t_n = bl$, то $b = \frac{t_n}{l}$, затем по формуле

(3) находим a . Далее строим полученную косинусоиду (1), соединяющую точки D_1 и A_1 на холостом участке калибра.

Теперь построим кубическую параболу

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d,$$

удовлетворяющую тем же начальным условиям, что и косинусоида: $y(0) = d$, $y(l) = D$, $y'(0) = 0$, $y'(l) = k$.

Так как $y' = 3ax^2 + 2bx + c$ и $y'(0) = 0$ по условию, то $c = 0$. Поэтому парабола имеет вид

$$y = ax^3 + bx^2 + d,$$

где d – диаметр готовой трубы,
и

$$y'(l) = 3al^2 + 2bl = k.$$

Таким образом, получена система уравнений относительно a и b :

$$\begin{cases} 3l^2 a + 2lb = k, \\ l^3 a + l^2 b = D - d. \end{cases}$$

Ее решение:

$$a = \frac{kl - 2(D - d)}{l^3},$$

$$b = \frac{-kl + 3(D - d)}{l^2}.$$

Точка максимума производной

$$x = -\frac{b}{3a}$$

или

$$x = \frac{kl - 3(D - d)}{kl - 2(D - d)} \cdot \frac{l}{3}.$$

Точка максимума функции

$$x = -\frac{2b}{3a}$$

или

$$x = \frac{kl - 3(D - d)}{kl - 2(D - d)} \cdot \frac{2l}{3}.$$

При ограничениях $l = 343,1$, $-0,14 \leq k < -0,1$, $50 < d < 90$, $60 < D < 120$ ($d < D$) получаем: на участке $[0; l]$ максимум косинусоиды больше максимума кубической параболы и максимум производной косинусоиды больше максимума производной параболы.

Приведем пример. $D = 84$, $d = 60$, $k = -0,12$. Получаем, что для косинусоиды максимальная скорость изменения кривой равна 0,164 на 297-м градусе, максимум функции равен 88,43 на 339-м градусе. Для кубической параболы максимальная скорость изменения производной равна 0,13 на 300-м градусе, максимум функции равен 86,96 на 344-м градусе.

Результаты исследования и выводы

Так как задача построения холостой зоны калибра состоит в минимизации наибольшего значения функции и производной на участке возрастания функции, то в качестве искомой функции выбираем кубическую параболу. Расчеты по приведенным формулам реализованы на алгоритмическом языке Quick Basic.

Используя предложенную методику расчёта холостой зоны и рекомендации [1], были рассчитаны копиры-кулаки (рис. 2) для станка ЛЗ-250. Холостая (нерабочая) зона калибра соответствует на копире-кулаке сектору между 256-м и 360-м градусами.

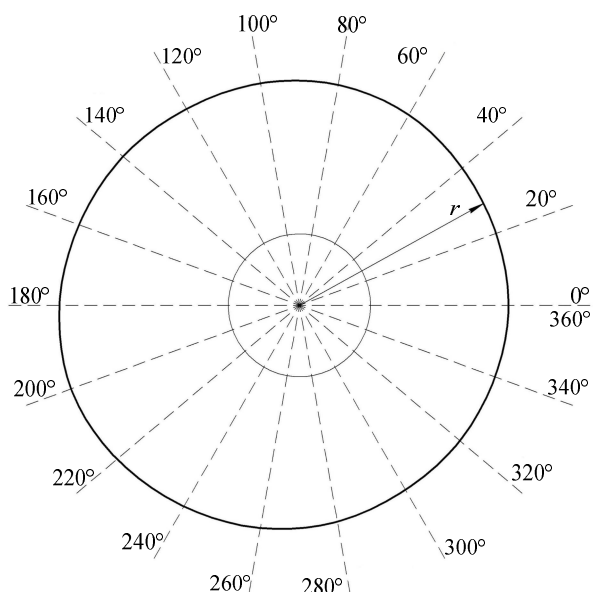


Рис. 2. Кулак врезания (разворота шлифовального круга) станка ЛЗ-250

Практическое применение при шлифовании ручьев калибров на станке ЛЗ-250 в условиях Красноярского металлургического завода по предложенной методике подтвердило полученные теоретические результаты, что позволяет рекомендовать разработки по проектированию профиля холодной зоны в промышленное производство.

Список литературы

1. Курмачёв Ю. Ф., Скоморощенко С. И., Шамраев В. Н. Методика проектирования и изготовление ручья калибров станков ХПТ. Технологическая рекомендация. М.: ВИПС, 1985. 31 с.
2. Петраков Ю. В., Пасечник В. А., Мартынов Н. А. Проектирование траекторий движений рабочих органов станка с ЧПУ при шлифовании профилей калибров станков холодной прокатки труб // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2008. №36.
3. Волков Е. А. Численные методы. М.: Наука, 1982. 254 с.
4. Дьяченко В. Ф. Основные понятия вычислительной математики. М.: Наука, 1977. 126 с.
5. Yuri F. Kurmachev, Ruslan E. Sokolov, Denis S. Voroshilov, Vadim M. Besimalov, Vladimir V. Moscvichev. The analytical dependence of the filling billets value to a given relative degree of deformation during cold rolling of tubes // Journal of Siberian Federal University. 2012 5 (7). С. 731–736.
6. Орлов Г.А. Пути совершенствования калибровок инструмента станков холодной прокатки труб // Сталь. 2004. № 12. С. 83–85.
7. Тетерин П.К. Теория периодической прокатки. М.: Металлургия, 1978.
8. Осада Я.Е. Основные вопросы холодной прокатки труб: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Днепропетровск; М., 1947.
9. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1970.
10. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. М.: Металлургиздат, 1961.

Материал поступил в редакцию 12.05.15.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-61-65

GAUGE IDLE ZONE PROFILE IN COLD ROLLING PIPE MILLS

Yuri F. Kurmachev – Ph.D. (Eng), Associate Professor
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: kurmach@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): This paper deals with a problem of building a smooth curve connecting the beginning and the end of the gauge idle zone under predefined initial conditions. Theoretically, there can be an unlimited number of ways to connect the two points. Elementary functions, which have their inflection point in the idle zone, offer the easiest ways of building such a curve. The relevance of this paper includes improved kinematics of a machine-tool used for gauge treatment, which is subject to the greatest load when passing the inflection point. **Objectives:** The objectives of this work include a minimized derivative of the selected function in the inflection point and minimizing the greatest value of the function when it approaches the point where the working area starts. **Methods Applied:** This paper is based on mathematical methods, including the iteration method applied for calculating the parameters of the tar-

get curve. The paper is also based on the Lipchitz theorem stating that this problem can only have one unique solution. Cosinusoid was chosen for the target curve. The second curve that connects the points concerned is a cubic parabola. The paper looks at the maximum velocity with which the function increases in the idle zone, which sees its greatest load when the cam moves in the LZ-250 machine, as well as at the peak points of both curves in the idle zone. **Findings:** Following the findings and the results of numerical experiments, the authors finally chose to use the cubic parabola, as it has a lower maximum value compared with the cosinusoid and a lower value of the derivative function in the inflection point. This appears to be the first research effort that was based on a concrete function and a minimized load present in the idle zone in a gauge treatment operation. The method of calculating the idle zone gauge by connecting the working area start and end points in the form of a parabo-

la under relevant initial conditions, has found a successful application in the LZ-250 machine installed at Krasnoyarsk Metallurgical Works. **Practical Relevance:** The practical relevance of this paper includes an extended life of costly machinery, i.e. the LZ-250 machine in this case.

Keywords: Pipe, cold rolling of pipes, gauge idle zone, cosinusoid, parabola, calculation, LZ-250 machine.

References

1. Kurmachev Yu.F., Skomoroshchenko S.I., Shamraev V.N. *Metodika proektirovaniya i izgotovleniya ruchia kalibrov stanov KhPT. Tekhnologicheskaya rekomendatsiya* [The method of designing and manufacturing die grooves for cold pipe mills. Technical recommendations]. Moscow: VILS, 1985, 31 p. (In Russ.)
2. Petrakov Yu.V., Pasechnik V.A., Martynov N.A. Designing CNC machine tool paths for the cold pipe mill groove grinding operation. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European journal of advanced technology]. 2008, no. 36.
3. Volkov E.A. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow: Nauka, 1982, 254 p. (In Russ.)
4. D'yachenko V.F. *Osnovnye ponyatiya vychislitel'noy matematiki* [Basic concepts of numerical mathematics]. M.: Nauka, 1977, 126 p. (In Russ.)
5. Yuri F. Kurmachev, Ruslan E. Sokolov, Denis S. Voroshilov, Vadim M. Bepalov, Vladimir V. Moscvichev. The analytical dependence of the filling billets value to a given relative degree of deformation during cold rolling of tubes. *Journal of Siberian Federal University*. 2012 5(7), pp. 731–736.
6. Orlov G.A. Ways of optimising cold pipe mill tool calibration. *Stal'* [Steel], no. 12, 2004, pp. 83–85. (In Russ.)
7. Teterin P.K. *Teoriya periodicheskoy prokatki* [The theory of cold pilger mill technology]. Moscow: Metallurgiya, 1978. (In Russ.)
8. Osada Ya.E. *Osnovnye voprosy kholodnoy prokatki trub: Avtoref. dissertatsii kand. tekhn. nauk* [The fundamental problems of cold pipe mill technology. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Dnepropetrovsk; Moscow: 1947. (In Russ.)
9. Tselikov A.I., Grishkov A.I. *Teoriya prokatki* [The theory of rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1970. (In Russ.)
10. Gubkin S.I. *Plasticheskaya deformatsiya metallov* [Plastic deformation of metals]. Moscow: Metallurgizdat, 1961. (In Russ.)

Received 12/05/15

Курмачев Ю.Ф. Профиль холостой зоны калибра станов холодной прокатки труб // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 61–65. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-61-65

Kurmachev Yu.F. Gauge idle zone profile in cold rolling pipe mills. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 61–65. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-61-65
