

6. Kuznetsov L.A. *Primenenie UVM dlya optimizacii tonkolistovoj prokatki* [Computer application for optimization of sheet rolling]. Moscow: Metallurgy, 1988. 304 p.
7. Pimenov V.A. About the causes of cold rolling stability loss. *Izvestiya vuzov. Chyornaya metallurgiya* [Proceedings of the universities. Ferrous metallurgy], 1990, no. 8, p. 36-38.
8. Vassilev J.D. *Inzhenernye modeli i algoritmy raschyota parametrov holodnoj prokatki* [Engineering models and algorithms for calculating the parameters of cold rolling]. Moscow: Metallurgy, 1995. 368 p.

УДК 621.777: 621.777.22

РАСЧЕТ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЗОНЫ ОБЖАТИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Курмачев Ю.Ф., Соколов Р.Е., Высотина А.А.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы расчета продольного профиля зоны обжатия при холодной периодической прокатке труб из алюминиевых сплавов в зависимости от заданной функции изменения степени деформации.

Ключевые слова: труба, прокатка, периодическая прокатка, степень деформации, заготовка, профиль, калибровка, прокатные валки, ручей, расчет, алюминий, сплав.

Введение

Холоднокатанные трубы из цветных металлов и сплавов занимают важное место в современной промышленности. Трубы из алюминиевых сплавов широко применяются в качестве изделий ответственного назначения в авиационной и космической технике.

Следует отметить, что процесс проектирования инструментальной оснастки при разработке технологии холодной прокатки труб (ХПТ) сопряжен с проведением большого объема вычислений, связанных с определением продольного профиля ручья калибра.

На сегодняшний день из технической литературы [1, 2] известен ряд методик расчета калибровок инструмента станов ХПТ, наиболее распространенными из которых являются методики НИТИ-НТЗ, МИСиС и УралНИТИ. Они широко применяются в производстве стальных и титановых труб, однако не предполагают точного аналитического решения поставленной задачи из-за принятия ряда допущений при её постановке.

В связи с этим актуальной становится задача по разработке методики точного расчета продольного профиля зоны обжатия при холодной периодической прокатке труб из алюминиевых сплавов по заданной функции изменения степени деформации.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Введем следующие обозначения; L – длина обжимной зоны; $D(x)$ – диаметр трубы в точке x ; D – диаметр заготовки; d – диаметр готовой трубы; $t(x)$ – толщина стенки трубы; $do(x)$ – диаметр оправки; $F(x)$ – площадь поперечного сечения трубы; $F_0 = F(0)$ – площадь поперечного сечения заготовки; $F_1 = F(L)$ – площадь поперечного сечения готовой трубы; μ – суммарная вытяжка, равная отношению $\frac{F_0}{F_1}$; $\varepsilon(x)$ – относительная частная деформация; m – подача заготовки.

Профиль обжимной зоны ручья калибра определяется изменением площади поперечного сечения, диаметра и толщины стенки трубы по длине зоны обжатия. Оправка, заданная известной функцией (линейной – коническая, либо нелинейной – так называемая «фигурная»), позволяет свести характеристику профиля обжатия лишь к изменению площади поперечного сечения, так как, зная диаметр оправки $do(x)$ и

площадь сечения трубы $F(x)$ в точке x , получаем толщину стенки

$$t \cdot x \cdot \frac{d\sigma \cdot x}{2} \cdot \sqrt{\frac{d\sigma^2 \cdot x}{4} \cdot \frac{F \cdot x}{\cdot}}, \quad (1)$$

тогда диаметр трубы

$$D \cdot x \cdot d\sigma \cdot x \cdot 2 \cdot t \cdot x.$$

Поэтому рассмотрим проектирование продольного профиля обжимной зоны, определяемого законом изменения площади сечения трубы (см. рисунок).

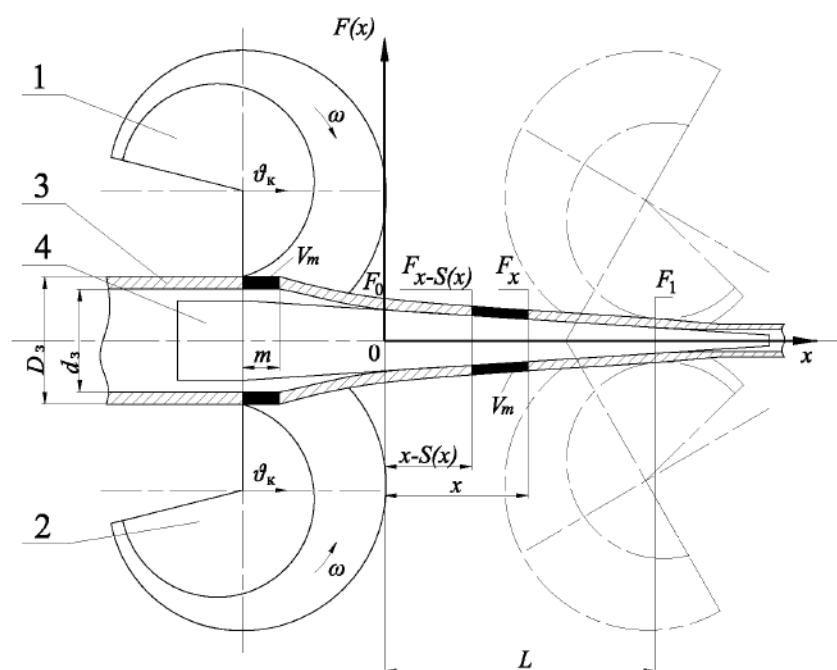


Схема изменения площади поперечного сечения трубы по длине очага деформации при холодной прокатке: 1, 2 – валки; 3 – заготовка; 4 – оправка

Выделим поперечное сечение трубы зоны обжатия в точке x от начала зоны. На расстоянии $S(x)$ влево от сечения в точке x выделим сечение в точке $x-S(x)$. Объем металла, находящийся между этими двумя сечениями, – величина постоянная и равна объему подачи заготовки

$$V = \int_{x-S(x)}^x F(t) dt. \quad (2)$$

Степень деформации в точке x определим как отношение абсолютной величины деформации

к площади исходного сечения на участке $[x-S(x); x]$

$$\varepsilon(x) = \frac{F(x-S(x)) - F(x)}{F(x-S(x))}. \quad (3)$$

Пусть степень частной деформации $\varepsilon(x)$ по длине зоны обжатия задана и соответствует функции изменения ресурса пластичности обрабатываемого металла.

Начальные значения степени деформации заданы:

$$\varepsilon(0) = \varepsilon_0, \quad \varepsilon(L) = \varepsilon_1.$$

Таким образом, получена система двух уравнений с двумя неизвестными функциями $S(x)$ и $F(x)$:

$$\begin{cases} \int_{x-S(x)}^x F(t) dt = V, \\ \frac{F(x-S(x)) - F(x)}{F(x-S(x))} = \varepsilon(x). \end{cases}$$

Первое уравнение есть интегральное уравнение Вольтерра I рода с единичным ядром, второе – функциональное.

Интегральное уравнение вида

$$\int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} \Phi(\tau) d\tau = \eta(x)$$

дифференцируется по пределам интегрирования следующим образом:

$$\Phi(\varphi_2(x)) \cdot \varphi_2'(x) - \Phi(\varphi_1(x)) \cdot \varphi_1'(x) = \eta'(x).$$

Воспользовавшись приведенным правилом, дифференцируем интегральное уравнение системы:

$$F(x) \cdot x' - F(x-S(x)) \cdot (x-S(x))' = 0.$$

Отсюда

$$F(x-S(x)) - F(x) = S'(x) \cdot F(x-S(x)).$$

Разделив обе части полученного уравнения

на $F(x - S(x))$, получим

$$S'(x) = \frac{F(x - S(x)) - F(x)}{F(x - S(x))}.$$

Правая часть полученного уравнения есть не что иное, как функция степени деформации $\varepsilon(x)$, и тем самым представляет собой второе уравнение системы. Отсюда получаем простое выражение функции смещения $S(x)$ для любой точки обжимной зоны в виде интеграла

$$S(x) = \int \varepsilon(x) dx + C. \quad (4)$$

Константа C определяется начальными значениями степени деформации и заданным суммарным смещением Sm . Площадь сечения трубы на расстоянии длины смещения определится как

$$F(x) = S(x) \cdot \frac{F_1}{1}. \quad (5)$$

Итак, продольный профиль зоны обжатия при периодической прокатке определяется заданной функцией относительной степени деформации.

Из практических данных, полученных в условиях производства, известно, что суммарная вытяжка при прокатке труб из алюминиевых сплавов не должна превышать семи единиц, то есть ~ 7 (при превышении этого значения на основании опытных данных исчерпывается ресурс пластичности, и металл разрушается). Следовательно, при заданных размерах готовой трубы суммарное смещение, определяющее производительность стана, $Sm \sim m \cdot 7m$, то есть фактически определяется величиной подачи m . (Заметим, что $Sm \cdot F_1 \sim V$, то есть объему подачи металла.) При выбранной подаче m и площади сечения готовой трубы F_1 определяются предварительные размеры заготовки, размеры зоны редуцирования, обжимной зоны, калибрующих участков по стенке и диаметру.

Рассмотрим конкретные примеры функций, определяющих степень деформации $\varepsilon(x)$.

1) Степень относительной деформации изменяется линейно:

$$\varepsilon(x) = ax + b.$$

Тогда

$$b = \varepsilon_0, \quad a = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{L}.$$

По формуле (4) получаем функцию смещения

$$S(x) = \frac{ax^2}{2} + bx + C.$$

Константа

$$C = Sm - \frac{aL^2}{2} - bL.$$

Далее по формулам (4) и (5) последовательно производим расчет частных смещений и площадей, а значит, толщины стенки и диаметра трубы от конечной точки L к началу обжимной зоны.

2) Степень относительной деформации изменяется по гиперболическому закону:

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{ax + b}.$$

Тогда

$$b = \frac{1}{\varepsilon_0}, \quad a = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_1 L}.$$

По формуле (4) получаем функцию смещения

$$S(x) = \frac{1}{a} \ln(ax + b) + C.$$

Константа

$$C = Sm - \frac{1}{a} \ln(aL + b).$$

Также далее по формулам (4) и (5) последовательно производим расчет частных смещений и площадей, а значит, толщины стенки и диаметра трубы от конечной точки L к началу обжимной зоны.

В результате расчетов получим $n \sim 1$ точек на обжимной зоне. Количество точек на обжимной зоне равно дробности деформации. В полученных точках вычисляются значения площадей F_i поперечного сечения трубы, толщины стенки t_i и диаметров D_i . Искомые непрерывные функции изменения площади поперечного сечения трубы $F(x)$ и ее диаметра $D(x)$ представ-

ляются полиномами Лагранжа степени n (на единицу меньше количества полученных точек).

Интерполяционной формулой Лагранжа называется многочлен

$$\Lambda(x) = \sum_{i=0}^n y_i l_i(x),$$

где базисные полиномы $l_i(x)$ определяются по формуле

$$l_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}$$

и обладают следующими свойствами:

- 1) являются многочленами степени n ;
- 2) $l_i \cdot x_i = 1$;
- 3) $l_i(x_j) = 0$ при $j \neq i$.

Многочлен Лагранжа $\Lambda(x)$ как линейная комбинация базисных полиномов $l_i(x)$ может иметь степень не больше n , и $\Lambda(x_i) = y_i$.

В нашем случае данными для полиномов Лагранжа являются пары чисел $(x_i; F_i)$, $(x_i; D_i)$, $(x_i; t_i)$, $i = 0, n$. Так как искомые функции изме-

нения площади поперечного сечения, диаметра и стенки трубы являются монотонно убывающими функциями, то погрешность интерполяции равна нулю.

Результаты исследования и выводы

Таким образом, получены аналитические функции, позволяющие получить уточненное решение при расчетах изменения площади поперечного сечения, диаметра и стенки трубы на продольном профиле зоны обжатия. Предложенная методика расчета была использована в ООО «Красноярский металлургический завод» при проектировании рабочего инструмента для холодной прокатки труб с наружным диаметром от 50 до 100 мм и толщиной стенки от 2 до 4 мм из сплава Д16. Прокатку осуществляли на станах ХПТ – 2-90 и ХПТ – 2-55.

Список литературы

1. Тетерин П.К. Теория периодической прокатки. М.: Металлургия, 1978.
2. Орлов Г.А. Элементы теории прокатки труб: учеб. пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 66 с.
3. Kurmachev Yuri F., Sokolov Ruslan E., Denis S. Voroshilov, Bepalov Vadim M., Moscvichev Vladimir V. 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.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

CALCULATION OF THE LONGITUDINAL PROFILE OF THE REDUCTION ZONE DURING PERIODIC COLD ROLLING OF ALUMINUM ALLOY TUBES

Kurmachev Yuriy Fedorovich – Ph.D. (Eng), Associate Professor, FSAEI HPE Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: kurmach@mail.ru.

Sokolov Ruslan Yevgenyevich – Ph.D. (Eng), Associate Professor, FSAEI HPE Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: sokolov.sfu@gmail.com.

Vysotina Alena Andreyevna – Student, FSAEI HPE Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: las_vegas_24@mail.ru.

Abstract. In this article the issues concerning the calculation of longitudinal profile of the reduction zone during periodic cold rolling of aluminum alloy tubes were considered, depending on the given function of deformation ratio change.

Keywords: tube, rolling, periodic rolling, deformation ratio, billet, profile, grooving, mill rolls, caliber, calculation, aluminum, alloy.

References

1. Teterin P.K. *Teoriya periodicheskoy prokatki* [The theory of periodic rolling]. Moscow: Metallurgy, 1978.
2. Orlov G.A. *Elementy teorii prokatki trub* [Elements the theory of tube rolling]. Yekaterinburg: SEI HPE USTU-UPI, 2004, 66 p.
3. Kurmachev Yuri F., Sokolov Ruslan E., Voroshilov Denis S., Bepalov Vadim M., Moscvichev Vladimir V. 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.