

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Миронов В.Г., Митберг Б.Я.
ООО «РосНИТИ»
Чекулаев А.В.
ОАО АКХ «ВНИИМЕТМАШ»

Рассмотрен подход к построению калибровки технологического инструмента станов ХПТ с позиции оптимальности заданных критериев. Рассмотрены упругие деформации инструмента и трубы. Приведены примеры практического применения в промышленности расчётных калибровок.

Введение

В прикладной науке о процессе холодной прокатки и в практике его применения одной из основных проблем всегда была и остается по настоящее время проблема построения оптимальной калибровки основного технологического инструмента (валков и оправки). От того, насколько удачно выполнена калибровка, непосредственно зависит конечный результат прокатки - точность геометрической формы (диаметр, овальность) поперечных сечений готовой трубы. Калибровкой обусловлена также износостойкость рабочей поверхности валков, плавность (безударность) работы основных механизмов стана и другие значимые для практики факторы.

1. Возможные подходы к построению калибровки

Традиционный подход к выбору калибровочной кривой для валков заключается в стремлении обеспечить соответствие режима деформации металла какой-то заданной или как-либо обоснованной закономерности [1]. К недостаткам такого подхода нужно отнести то, что в расчет принимается только прокатка прямым ходом клетки при предположении, что при обратном ходе деформации пренебрежимо малы. Другой, и возможно более существенный, недостаток заключается в том, что рассматривался только общий образующийся при прокатке переходный конус деформации. При этом процессы обработки металлов давлением, происходящие в мгновенных очагах деформации, отождествлялись с процессом формирования всего конуса деформации. Последнее было бы справедливо, если бы процессы, характерные для обоих типов очагов деформации развивались в одном и том же факторном пространстве. В данном случае это совершенно различные, несоизмеримые и не пересекающиеся между собой факторные пространства.

Режим деформации, если под ним понимать отдельные компоненты деформации и соотношения между ними, формируется в мгновенных очагах деформации и не влияет на форму общего конуса деформации.

На наш взгляд, более корректным для определения калибровочной кривой представляется предварительный выбор семейства однотипных подходящих кривых. Тогда последующий анализ процессов, происходящих в последовательных мгновенных очагах деформации, позволит вы-

брать из этого семейства ту конкретную кривую, которая наиболее близко обеспечит требуемую закономерность.

2. Выбор калибровочных кривых

Принципиально подходящей калибровочной кривой может быть любая монотонно убывающая кривая, обладающая свойством непрерывности и удовлетворяющая граничным значениям. Однако желательно, чтобы она входила в семейство однотипных кривых с дополнительными одним - двумя параметрами.

В данном случае рассмотрели степенной ряд. Ограничив его четвертым членом, получили кубическую параболу

$$D(x) = A \cdot x^3 + B \cdot x^2 + C \cdot x + D.$$

В этом выражении обозначены: $D(x)$ - переменный диаметр конуса деформации; A, B, C, D - числовые коэффициенты. Для определения коэффициентов имеются три граничных условия. Четвертым коэффициентом определяется множество получающихся парабол. Для него ввели разумные ограничения.

Чтобы расширить возможности калибровки, отдельно выделили зону начального редуцирования в виде квадратичной параболы

$$D(x) = E \cdot x^2 + F \cdot x + H.$$

Здесь все три коэффициента (E, F, H) находятся из граничных условий.

Профиль оправки приняли в виде [2]

$$d(x) = d(0) - \Delta d \cdot x^a [1 - a \cdot (x-1)],$$

где: $d(0)$ - начальный диаметр оправки,

x - нормированная продольная координата ($0 \leq x \leq 1$),

a - параметр кривизны ($0 \leq a \leq 1$).

Такая постановка приводит к вариационной проблеме, и задача сводится к выбору функционала. В одном случае его приняли в виде экспериментально полученной закономерности тангенциальных остаточных напряжений. В другом случае, используя известные закономерности, скомпоновали критерий, оказывающий решающее значение на усилия прокатки, и минимизировали его величину. Для решения применили численные методы. Сложность решения заключалась в том, что нужно было количественно оценить влияние обратного хода и в том, чтобы правильно учесть закономерности развития и распределения деформаций по длине конуса деформации.

3. Общая характеристика про-цесса холодной прокатки труб

Обычно процесс холодной прокатки относят к разновидности продольной периодической прокатки [1].

Однако, непосредственно процесс продольной периодической прокатки выполняется только при обратном ходе клетки. При этом необходимо учитывать, что начинается прокатка с некоторым запаздыванием, пока выбираются продольные люфты, всегда имеющиеся в кинематических звеньях привода. В результате при прокатке раскатываются не только лампасы, образующиеся при прокатке прямым ходом, но дополнительно деформируется и стенка трубы. По своей величине эти люфты могут быть соизмеримыми с подачей или даже превышать ее, и тогда пренебрежение обратным ходом приведет к недопустимо грубым ошибкам. К тому же, прокатка обратным ходом позволяет распределить общие обжатия, разгружая прокатку прямым ходом и повышая общую дробность деформации. Поэтому при прокатке труб из трудно деформируемых и высокопрочных сплавов роль обратного хода иногда приходится искусственно повышать.

При прямом ходе валки работают как ковочные вальцы. Этот процесс нашел широкое применение в кузнечном производстве. По своему содержанию он как бы совмещает процесс кузнечнойковки и продольной прокатки.

Прокатку в вальцах нельзя полностью отождествлять с периодической прокаткой хотя бы потому, что объем металла, заполняющего каждый мгновенный очаг деформации по длине всего конуса деформации, остается постоянным и равным исходному объему подачи.

Прокатка в вальцах позволяет раздробить общую степень деформации, что входит в состав основных преимуществ процесса холодной прокатки труб.

4. Расчет ширины ручья калибров

Конечная цель калибровки валков заключается в определении формы и размеров поперечных сечений ручья калибров. При этом глубину (высоту) и ширину естественно относят к основным параметрам калибров. Глубина определяется калибровочной кривой, а ширина должна соответствовать геометрическому условию захвата трубы валками в мгновенных очагах деформации.

Для получения нижней оценки ширины необходимо, используя гипотезу плоских сечений, разделить конус деформации на участки, равновеликие по объему с заданным объемом подачи. Тогда ширина калибров в конечных точках этих участков принимается равной удвоенной высоте калибров в начальных точках тех же участков (известное в литературе по пилигримовой прокатке "правило П.Т. Емельяненко").

Границы указанных участков нашли, работав специальный алгоритм числового поиска

последовательных приближений. Необходимые при этом значения диаметра и толщины стенки в области выпусков рассчитали, используя закономерности развития продольных и тангенциальных деформаций по длине конуса деформации согласно экспериментальным исследованиям пластических перемещений и деформаций методом накатанных сеток [2].

Остальные параметры формы поперечных сечений определяются на основе технических возможностей станков для изготовления ручья калибров, в частности отечественного станка ЛЗ-250. Применение этого станка, а также аналогичных импортных станков типа GG-52 ведет к дополнительным ограничениям также и при выборе калибровочной кривой.

5. Упругие деформации

Возросшие в настоящее время требования по точности проката приводят к необходимости учета упругих деформаций трубы и инструмента. Так как диаметр валков не менее чем в 5-10 раз больше диаметра трубы, а также оправки, то наибольших значений упругие перемещения будут достигать в теле валков. Для приближенного расчета их с достаточной для практики точностью применили известные в теории упругости решения задачи Ламе по радиальному сжатию трубы и задачи Буссинеска о прогибе дневной поверхности под действием внешних нагрузок [3].

Для относительно длинных (по отношению к диаметру) мгновенных очагов деформации вертикальные упругие перемещения с достаточной точностью определяются согласно решению Ламе. Для более коротких очагов деформации стенки, а также для зоны свободного редуцирования упругие перемещения находили, решая задачу Буссинеска при разных вариантах загрузки упругого полупространства. По своей величине они во всех случаях получились значительно больше упругого прогиба оси валков. Поэтому в расчетах принимали, что упругие перемещения полностью затухают при приближении к оси валка. Учет этих перемещений позволяет более корректно подходить к выбору расчетного зазора между валками.

Сравнение вертикальных упругих перемещений с горизонтальными (по линии разреза валков) показало, что последние по своей величине получаются почти вдвое большими. Это приводит к уточнению расчета обжатий при обратном ходе клетки.

Для расчета упругих деформаций (перемещений) трубы с достаточной точностью применимы решения, полученные на основе задачи Ламе.

Радиальное сжатие оправки

$$U_a = p_a \cdot a \cdot (1 - \mu_1) / E_1,$$

где p_a - равномерно распределенная радиальная нагрузка,

a - радиус оправки,

μ_1 - коэффициент Пуассона,

E_1 - модуль упругости.

Предельное упругое состояние деформируемой трубы определяется в виде условия пластичности

$$\sigma_{\text{т}} - \sigma_{\text{р}} = 2 * \tau_s,$$

где $\sigma_{\text{т}}, \sigma_{\text{р}}$ - тангенциальное и радиальное напряжения,

τ_s - наибольшее касательное напряжение.

Согласно решению задачи Ламе

$$\sigma_{\text{т}} - \sigma_{\text{р}} = (p_a - p_b) * 2 * a^2 * b^2 / [r^2 * (b^2 - a^2)]$$

Эта разность напряжений становится максимальной на внутренней поверхности при $r = a$. Тогда

$$p_a - p_b = \tau_s * (1 - c^2),$$

где $c = a/b$ - отношение внутреннего радиуса трубы к наружному.

При повышении наружной нагрузки область пластического состояния расширяется и эта разность увеличивается до $p_a - p_b = 2 * \tau_s * \ln(b/a)$ для неупрочняющейся среды или до больших значений в других случаях.

Дальнейший анализ приводит к определению внутреннего давления

$$p_a = 2 * \tau_s / [(1 - \mu_2) + (1 - \mu_1) * E_2 / E_1]$$

и упругого радиального перемещения наружной поверхности трубы

$$u_b = b * [\tau_s * c^2 * (1 + \mu_2) - (p_a - \tau_s) * (1 - \mu_2)] / E_2.$$

Принимая найденную величину ориентировочно равной упругому возврату диаметра трубы после разгрузки, получили фактические размеры трубы после прокатки. Это позволяет уточнить расчетные размеры трубы.

6. Практическое приложение

Все расчеты объединили в один программный пакет. В таком виде калибровка нашла широкое практическое применение при прокатке труб из различных металлов, сталей и сплавов.

В частности при прокатке труб на станах ХПТ-250 реализованы следующие маршруты изготовления с повышенной точностью по толщине стенки и с высокими требованиями к качеству поверхности:

219 x 12 → 171 x 7 мм – Сталь 20,

159 x 6 → 127 x 1,5 мм - Сталь 30ХМАШ.

На типовых станах изготовления ЭЗТМ (ХПТ-32, ХПТ-55, ХПТ-90) калибровка широко используется при прокатке труб из углеродистых, легированных, высоколегированных сталей и сплавов.

При внедрении станов ХПТ нового типа конструкции ВНИИ-МЕТМАШ калибровка нашла промышленное применение на зарубежных заводах.

В Японии установлены станы ХПТ 6-15, ХПТ 6-20, ХПТ 15-30 для прокатки из стали типа ШХ-15.

В Китае при прокатке труб из сплавов титана работают с применением этой калибровки станы ХПТ 6-15, ХПТ 15-30 и ХПТ 30-60.

В Южной Корее на станах ХПТ 30-60 прокатывают трубы из нержавеющей стали по маршруту 48 x 3,68 → 25,4 x 1,65 мм с производительностью до 170 м/час.

В Индии на станах ХПТ 10-45 достигнута подобная производительность при прокатке аналогичных труб.

На Украине на стане ХПТ 6-20 реализованы прокатки труб из нержавеющей стали размерами 14 x 1 мм и 10 x 0,6 мм.

Точность полученных труб находится в следующих пределах:

диаметр, включая овальность – ± 0,02 мм, разностенность – не более ± 5%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тетерин П.К. Теория периодической прокатки. М. Металлургия, 1978, 250 с.
2. Миронов В.Г. Деформации при прокатке труб на станах ХПТ. Автореферат кандидатской диссертации. Свердловск, 1967.
3. Рекач В.Г. Руководство к решению задач прикладной теории упругости. Учебное пособие для ВУЗов. М. 1978.