

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ЦИРКОНИЕВЫХ ТРУБ-ОБОЛОЧЕК ТВЭЛ

*Г.В. Вольфович, В.Я. Замощиков, А.В. Подлозный, В.С. Вахрушева, Т.Н. Буряк  
Государственный трубный институт им. Я.Е. Осады, г. Днепрпетровск, Украина*

Представлена комплексная модель процесса холодной прокатки труб, позволяющая анализировать и оптимизировать различные калибровки и режимы работы станов.

Технологии изготовления циркониевого проката являются наиболее высокими и наукоемкими среди производства продукции специального назначения. К трубам-оболочкам твэлов из сплава циркония предъявляются жёсткие требования по геометрическим размерам, шероховатости поверхности, комплексу физико-механических характеристик. При этом служебные и технологические характеристики труб-оболочек твэлов формируются в наибольшей степени на стадии холодного передела, где особое значение приобретают схема и распределение деформации при холодной прокатке.

Одним из действенных путей совершенствования производства труб является широкое применение математического моделирования и методов оптимизации с использованием вычислительной техники.

Это задачи по установлению оптимальных параметров рабочего инструмента; определению альтернативных маршрутов производства труб, рассчитываемых по различным критериям с учётом качества продукции, включая в обязательном порядке такой критерий, как стоимостные затраты; по выбору оптимальных технологических схем и состава оборудования, реализующих эти схемы; по выбору оптимальных режимов деформации на трубопрокатных агрегатах с оперативным учётом значений ряда факторов, имеющих место в реально сложившейся производственной ситуации; задачи комплексной оптимизации режимов.

В ГТИ разработана система моделирования процесса прокатки на станах ХПТ [1], которая позволяет проводить вычислительный эксперимент для выбора рациональных решений, обеспечивающих требования к качеству труб, снижение энергозатрат и других расходов на производство, уменьшение технологических отходов металла. Методологической основой системы является интеграция научной и технической информации в виде баз данных и знаний, представленных теоретическими и эмпирическими зависимостями.

Основной разработанной математической модели холодной периодической прокатки труб являются аналитические зависимости, определяющие геометрические и деформационные параметры мгновенного очага деформации, изменяющиеся по длине прямого и обратного ходов клетки. Геометрические па-

раметры очага деформации вместе с прочностными свойствами деформируемого металла и его упругими характеристиками, деформирующего инструмента и системы валки-клеть определяют все деформационные, силовые и энергетические параметры процесса прокатки в любой момент двойного хода клетки. Учтено взаимное влияние геометрических, силовых и деформационных параметров, связанное с упругими деформациями в деформирующей системе.

Математическая модель отображает процесс холодной прокатки труб, который достаточно полно определяется следующими параметрами, являющимися исходными данными для модели:

1. Геометрические параметры прокатного инструмента:
  - калибровка ручья (диаметр и ширина, переменные по длине);
  - калибровка оправки (диаметр, переменный по длине);
  - взаимное положение ручья и оправки;
  - начальный зазор между калибрами (в калибрующей зоне).
2. Механические характеристики прокатываемого металла и инструмента:
  - предел текучести прокатываемого металла до деформации, показатели упрочнения при прокатке;
  - модули упругости прокатываемого металла и металла инструмента.
3. Конструктивные параметры стана:
  - диаметр валка (калибра);
  - диаметр делительной окружности ведущей шестерни;
  - показатель жёсткости системы валок-клеть;
  - длина рабочей части ручья.
4. Технологический режим работы стана:
  - линейное смещение металла (выход трубы за период двойного хода клетки).

Для каждого варианта процесса прокатки в модели задаётся не менее 100...150 числовых значений указанных исходных данных, включая калибровку прокатного инструмента: размеры ручья и оправки

не менее чем в 20...30 поперечных сечениях и продольные координаты сечений.

Варьируемыми данными, как правило, являются геометрические параметры прокатного инструмента и линейное смещение металла. Могут варьироваться также конструктивные параметры стана (например, для сопоставления вариантов прокатки на разных станах).

Оптимизация процесса прокатки заключается в анализе, сравнении и выборе лучшего варианта по принятым критериям с учётом известных ограничений в конкретных условиях производства. Для этого разработана система показателей, включающая 27 технологических параметров, рассчитываемых в модели для каждого варианта отдельно. Эти параметры выдаются на экран монитора и печатающее устройство ПЭВМ в графическом и табличном видах как зависимости от координаты обжимаемого сечения.

К наиболее важным технологическим параметрам, рассчитываемым в модели, относятся:

1. Деформационные параметры:

- абсолютное и относительное обжатия по площади поперечного сечения прокат-головки;
- абсолютные и относительные обжатия по толщине стенки и диаметру;
- отношение относительных обжатий по толщине стенки и диаметру (Q);
- коэффициент вытяжки и текущее линейное смещение металла.

2. Силовые параметры:

- предел текучести прокатываемого металла и давление металла на валки;
- вертикальное и осевое усилия прокатки;
- момент прокатки.

3. Геометрические параметры:

- наружный и внутренний диаметры прокат-головки;
- толщина стенки прокат-головки;
- характеристики точности прокатанной трубы по наружному и внутреннему диаметрам, по толщине стенки.

4. Упругая деформация системы валок-клеть.

В любой точке каждого графика может быть идентифицировано числовое значение параметра. Любой фрагмент графика может быть увеличен в желаемом масштабе для оценки мелких деталей.

Для решения оптимизационной задачи ряд методик расчета калибровки прокатного инструмента объединен с моделью процесса прокатки. Небольшое количество исходных данных (5...15), вводимых для расчета калибровки, дают возможность рассчитать калибровку в объеме 200...300 числовых значений параметров, которые автоматически вводятся как исходные данные в модель процесса прокатки.

К указанным методикам расчета калибровки относятся:

- методика МИСиС (разработана Московским институтом стали и сплавов) на основе прямолинейной оправки [2], широко используемая в странах СНГ по настоящее время;
- методика КПО (разработана в ГТИ) на основе криволинейной оправки [3], аналог методики фирмы "Маннесманн-Меер", ФРГ [4], широко используемой в странах Европы;
- методика В (разработана в ГТИ) на основе прямолинейной или криволинейной оправки.

Методики МИСиС и КПО исходят из геометрических принципов построения продольного профиля ручья и оправки – по заданным жестким функциям. Законы обжатий по площади, толщине стенки и диаметру являются следствием заданной геометрии и не могут быть оптимизированы с изменением закона деформации по физическим соображениям. Они не обладают многовариантностью с изменением деформационных и других важных параметров в нужном диапазоне.

Методика В исходит из заданного закона обжатия по площади поперечного сечения прокат-головки и отношения деформаций по толщине стенки и диаметру, которые могут варьироваться в широком диапазоне. Могут быть получены практически любые виды законов обжатий варьированием всего двух-трех параметров закона обжатия. Такая методика обладает многовариантностью, и поэтому в сочетании с моделью холодной прокатки труб позволяет успешно решать оптимизационные задачи процесса прокатки различных видов труб, в особенности из циркония, для которых особое значение имеет возможность планирования отношения деформаций по толщине стенки и диаметру.

По указанным выше методикам были рассчитаны и оптимизированы в рамках возможностей каждой методики калибровки для прокатки циркониевых труб. При этом были рассчитаны и проанализированы более 100 вариантов калибровок.

Анализ результатов расчета и оптимизации этих калибровок показывает следующее:

1. Калибровки МИСиС дают возрастающий закон обжатий по площади, значительные, близкие к максимальным, вертикальное и осевое усилия прокатки в конце обжимной зоны, где формируются предготовые и готовые размеры трубы и оправка имеет наименьшую прочность. Это снижает стабильность процесса прокатки, повышает склонность к разрушению металла и оправки, налипанию на инструмент циркониевого сплава, и без того имеющего повышенную склонность к налипанию. Кроме этого, фактор Q значительно ниже 1, что ухудшает коэффициенты ориентации гидридов и анизотропии прочностных свойств металла.
2. Калибровки КПО дают ярко выраженные максимальные деформации и усилия прокатки в средней части обжимной зоны, где металл уже значительно упрочнен, а в конце обжимной зоны эти параметры близки к ну-

лю. Такое распределение названных параметров не является рациональным. Кроме этого, к концу обжимной зоны фактор Q снимается до значений 0,5 и меньше, что значительно ниже оптимальных (1,5 и более).

3. Калибровки В с прямолинейной оправкой могут обеспечить благоприятное снижение деформационных параметров и усилий прокатки к концу обжимной зоны при факторе  $Q = 1 \dots 1,5$ , что может быть приемлемым в отдельных случаях, на промежуточных размерах труб.
4. Калибровки В с криволинейной оправкой обеспечивают комбинацию факторов: снижение относительной деформации по площади в  $1,5 \dots 2$  раза к концу обжимной зоны, отсутствие значительных усилий прокатки, близкое к равномерному распределение фактора Q и значение его в конце обжимной зоны  $1,5 \dots 3,5$ .
5. По точности размеров труб калибровки КПО и В идентичны и заметно превосходят калибровки МИСиС.
6. Методика расчета калибровок В наиболее удачно сочетается с разработанной математической моделью процесса холодной прокатки труб, так как позволяет варьированием небольшого количества параметров (в большинстве случаев 2...3) получить любой тип калибровок с достаточным количеством вариантов для оптимизации, с прямолинейной или криволинейной оправкой, управлять фактором Q.

По рассчитанным и оптимизированным с помощью модели калибровкам изготовлен прокатный

инструмент и проведены опытные прокатки. Процесс прокатки проходил стабильно.

Таким образом, выполнена разработка комплексной модели процесса холодной прокатки труб, позволяющая анализировать и оптимизировать различные калибровки и режимы работы станов холодной деформации. Предполагается, что использование данных разработок позволит не только усовершенствовать технологию изготовления циркониевых труб-оболочек твэлов, но и обеспечить качество металла труб из сплава Zr1Nb в результате тангенциальной ориентации гидридов, заданного коэффициента анизотропии механических свойств (по пределу текучести  $\sigma_{0,2}$  при 375°C не менее 1,4) и другим параметрам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Подлозний, В.П. Сокурченко, В.Д. Шевченко, Г.Ф. Ефремова. Разработка интегрированной системы имитационного моделирования процесса прокатки труб на станках ХПТ // *Производство труб и баллонов: Тематический сборник научных трудов*. Днепропетровск: ГТИ, 1999, с. 87–90.
2. Ю.Ф. Шевакин. *Калибровка и усилия при холодной прокатке труб*. М.: «Металлургиздат», 1963. 270 с.
3. О.А. Семёнов, В.Ф. Фролов, Л.Н. Скоробогатская и др. Совершенствование калибровок прокатного инструмента станов холодной прокатки труб // *Обзорная информация: сер. "Трубное производство"*. М.: Ин-т "Черметинформация", 1981, вып.2, 36 с.
4. В. Даль. Калибровка инструмента нового типа фирмы Маннесманн-Меер // *Материалы Симпозиума по холодной пильгерной прокатке*. 24.03 – 25.03, 1969, Мюнхенгладбах, 1969, с. 22–34.

## КОМПЬЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ЦИРКОНІЄВИХ ТРУБ-ОБОЛОНОК ТВЕЛ

*Г.В. Вольфович, В.Я. Замощиков, А.В. Подлозний, В.С. Вахрушева, Т.М. Буряк*

Представлена комплексна модель процесу холодної прокатки труб, яка дозволяє аналізувати та оптимізувати різні калібрування та режими роботи станів.

## COMPUTER SIMULATION OF ZIRCONIUM TUBES COLD ROLLING

*G.V. Volfovitch, V.J. Zamostchikov, A.V. Podlozniy, V.S. Vakhrusheva, T.N. Buriak*

The complex model of tube cold rolling is presented; this model allows to analyze and to optimize the different calibrations and the rolling mill functioning regimes.