

# ГИБРИДНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ И ТРУБ

П.А. Мальцев, В.Г. Дукмасов, Ф.С. Дубинский, А.В. Выдрин

## THE HYBRID METHOD OF MODELING THE SHAPE AND PIPE ROLLING PROCESSES

P.A. Maltsev, V.G. Dukmasov, F.S. Dubinsky, A.V. Vydrin

Рассмотрен метод моделирования процессов прокатки, основанный на совместном применении инженерных методик, метода конечных элементов и нейронных сетей, который получил название «гибридный». Представлена его реализация в виде программных продуктов для случаев прокатки сортовых профилей и труб. Разработана нейронная сеть для прогнозирования величины сопротивления деформации сталей 04Г2Б и 07Г2МФБ в зависимости от химического состава, температуры, скорости и степени деформации. Проведено сравнение опытных и прогнозируемых данных.

*Ключевые слова:* моделирование процессов прокатки, очаг деформации, калибр, программный комплекс, метод конечных элементов, нейронные сети, гибридный подход.

In this work the approach to the simulation of rolling processes, based on the joint application of engineering techniques, the finite element method and neural networks, called "hybrid" is presented. Its implementation in the form of software products for the cases of shape and pipe rolling is considered. A neural network to predict the value of deformation resistance of high-strength steels depending on the chemical composition, temperature, velocity and strain rate is developed. A comparison of experimental and predicted data is investigated.

*Keywords:* rolling processes modeling, deformation zone, roll pass, bundled software, finite element method, neural networks, hybrid approach.

При проектировании технологии прокатки необходимо решать ряд вопросов, связанных с правильным выбором технологических режимов, обеспечивающих получение продукции высокого качества. Один из сложных вопросов - прогнозирование формы и размеров переходных сечений металла. Здесь необходимо учитывать множество факторов: химический состав металла, скоростной и температурный режимы, состояние поверхности валков, расположение клетей стана и др. Известен ряд методик, которые условно можно отнести к традиционным, основанным, как правило, на эмпирических зависимостях. Эти методики позволяют выбрать подходящую схему прокатки и размеры сечений полосы. При расчетах уширения металла и формы поверхности, свободной от контакта с валками, методики являются неэффективными и требуют корректировки при практическом применении.

Достаточно эффективным является использование метода конечных элементов, однако, при этом необходимо заранее знать ряд граничных условий и технологических параметров, которые будут выступать в качестве первого приближения, точность которого во многом определяет качество решения задачи в целом.

Расчет технологических параметров можно осуществлять различными способами:

- задавать неизвестные параметры приближенно по аналогам;
- считать их с помощью упрощенных методик;
- использовать экспериментальную информацию.

Первый способ, очевидно, является наименее эффективным, а третий - наиболее эффективным для существующих прокатных станов. При проектировании новых станов и технологий наиболее приемлем второй способ.

Наибольший положительный эффект дает гибридный метод построения математической модели прогнозирования технологических параметров процессов прокатки, который предполагает совместное использование упрощенных методик, метода конечных элементов и нейронных сетей.

Программный комплекс, в основе которого заложен данный гибридный метод, позволит не только получать теоретически обоснованные результаты, но и будет обучаемым и приспособляемым к конкретному объекту. Это достигается именно за счет использования нейронных сетей, которые через процесс обучения позволяют учитывать взаимосвязи технологических параметров,

но не требуют создания сложной математической модели, описывающей эти взаимосвязи.

Программный комплекс на основе гибридного метода построен следующим образом.

На нулевом уровне производится ориентирование комплекса на объект. В качестве объекта выступают типы станков. На первом уровне производится приближенный расчет деформации, энергосиловых параметров, изменения температурных и скоростных режимов по клетям стана. На основе результатов приближенного расчета дальнейшие действия выполняются на втором уровне. Возможно возвращение на первый уровень для корректировки исходных данных и повторного расчета для достижения заданной точности и для расчета деформации металла методом конечных элементов (МКЭ). Далее результаты расчетов подаются на вход в обученную нейронную сеть, в которой за счет весовых коэффициентов производится корректировка выходных параметров.

Для практической реализации гибридного метода разработаны:

- в качестве моделей первого уровня - программные продукты, адаптированные для процессов прокатки профилей на сортовых станах и труб на редуцированных станах, станах ХПТ;

- в качестве моделей второго уровня - программные продукты, адаптированные для прогнозирования показателей деформации на сортовых и редуцированных станах;

- в качестве моделей третьего уровня - математические модели нейронных сетей для прогнозирования механических свойств металлов и энергосиловых параметров процессов прокатки.

Разработаны самостоятельные программные комплексы для проектирования процессов прокатки сортовых профилей, труб на станах ХПТ и труб на редуцированных станах.

Программный комплекс «Калибр», ориентированный на сортовые профили, разработан для решения широкого круга задач. В состав комплекса входят расчетные модули для использования их на первом уровне гибридного метода, в частности, для прогнозирования показателей деформации, энергосиловых параметров, проектирования скоростных и температурных режимов для любых станков, выбираемых пользователем на нулевом уровне.

Наряду с расчетными модулями в системе «Калибр» реализованы специальные технические средства для анализа проектируемой технологии. Например, на любом этапе расчета системой формируются эскизы калибров с отображением в них сечений полосы с размерами, а также диаграммы распределения технологических параметров (коэффициент вытяжки, обжатия, момент прокатки и др.) по проходам. Эти средства делают процесс проектирования «визуально прозрачным», что на практике существенно уменьшает трудозатраты.

По окончании проектирования на первом уровне в комплексе «Калибр» можно перейти на

второй уровень конечно-элементного анализа показателей деформации, либо сформировать выходную документацию в виде чертежей и таблиц требуемого вида.

В случае перехода на второй уровень, все полученные на первом уровне результаты автоматически заносятся в таблицу исходных данных второго уровня.

Для расчетов на втором уровне используется модель анализа деформированного состояния металла в очаге деформации. В этой модели, как и предполагает метод конечных элементов, производится разбиение объема очага деформации на трехмерные комплекс-элементы. Комплекс-элементы позволяют получать более точный результат за счет использования дополнительного узла в центре тяжести элемента.

При сортовой прокатке определили зависимость координат узлов от формы калибра. В общем виде координаты узлов записываются следующим образом:

$$x_{ij} = x_{ij}(F_{1i}, j);$$

$$y_{ij} = y_{ij}(F_{2i}, j);$$

$$z_{ij} = z_{ij}(F_{2i}, j),$$

где  $j$  - номер узла  $i$ -го конечного элемента;  $F_{1i}$  - кусочно-аналитическая функция, описывающая геометрию очага деформации в плоскости  $ZOY$  для области, к которой принадлежит  $i$ -й конечный элемент;  $F_{2i}$  - кусочно-аналитическая функция, описывающая геометрию очага деформации в плоскости  $XOZ$  для области, к которой принадлежит  $i$ -й конечный элемент.

Указанные зависимости были получены для десяти типов калибров, наиболее часто встречающихся на сортовых станах.

При разработке модели, на этапе локальной аппроксимации, исходные зависимости представлены в виде интерполяционных полиномов следующего вида:

$$\hat{\psi}_1^{(e)} = a_0^{(e)} + a_1^{(e)}x + a_2^{(e)}y + a_3^{(e)}z + a_4^{(e)}x^2z;$$

$$\hat{\psi}_2^{(e)} = b_0^{(e)} + b_1^{(e)}x + b_2^{(e)}y + b_3^{(e)}z + b_4^{(e)}xyz;$$

$$\hat{\sigma}^{(e)} = c_0^{(e)} + c_1^{(e)}x + c_2^{(e)}y + c_3^{(e)}z + c_4^{(e)}x^2,$$

где  $a_q^{(e)}$ ,  $b_q^{(e)}$ ,  $c_q^{(e)}$  ( $q = 0, \dots, 4$ ) - коэффициенты аппроксимации;  $x, y, z$  - координаты узлов каждого из конечных элементов.

Зависимости выбраны таким образом, чтобы обеспечить линейную независимость функции координат и исключить разрывы на границах конечных элементов.

Алгоритм вычислений по методу конечных элементов достаточно широко освещен в литературе, в частности, и для процессов прокатки [1,2], поэтому в настоящей работе более подробно не приводится.

В результате вычислений на втором уровне гибридного метода уточняются показатели фор-

моизменения и производится либо корректировка исходных данных, либо осуществляется переход на третий уровень.

Результаты, полученные на первом и втором уровне гибридного метода, могут являться основой для проведения опытных испытаний разработанной технологии.

Особенностью разработанной системы является то, что уровни гибридного метода реализованы в ней в виде самостоятельных программных модулей. Соответственно данные модули могут независимо друг от друга применяться при решении задач.

Осуществлена реализация гибридного метода и для моделирования процессов прокатки труб на станах ХПТ и непрерывной безоправочной прокатки.

Для первого случая разработан программный комплекс «СТСР», который реализует первые два уровня гибридного метода. На нулевом уровне здесь указывается конкретный стан следующим образом:

- выбирается тип стана: ХПТ, ХПТВ или ХПТР;

- в зависимости от выбора программный комплекс подбирает подходящие методики расчета и производится переход на первый уровень. Причем, если выбран стан ХПТ, то пользователю также предоставляется выбор из трех методик расчета размеров инструмента: НИТИ-НТЗ, УралНИТИ и МИСиС.

С учетом заданных исходных данных «СТСР» позволяет рассчитать:

- размеры технологического инструмента;
- энергосиловые параметры процесса прокатки;
- поврежденность металла;
- параметры для различных станков изготовления инструмента.

Более подробно рассмотрим расчет поврежденности металла. Существующая практика расчета средней поврежденности трубы не учитывает особенности деформации и может привести к зна-

чительным искажениям результатов. При анализе маршрутов прокатки на станах ХПТ необходимо проводить расчет по разработанной методике вдоль нескольких траекторий движения частиц, варьируя исходной продольной координатой и исходной окружной координатой, выбирать режимы прокатки из рассмотрения поврежденности вдоль траектории, наиболее опасной с точки зрения разрушения [3].

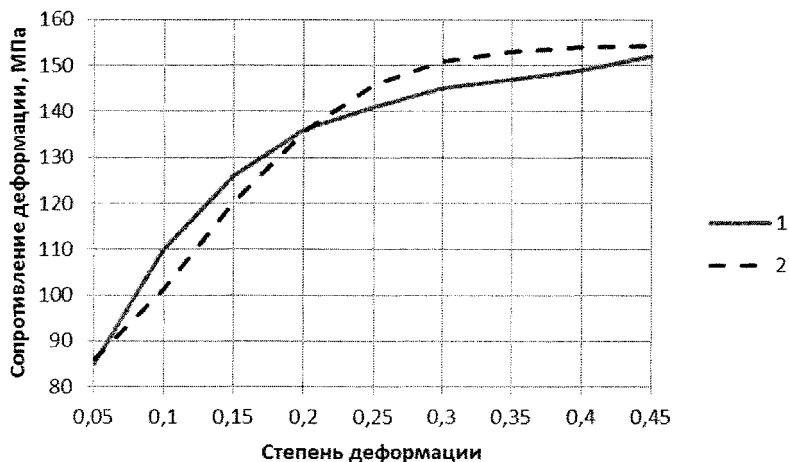
Для случаев прокатки труб на редуционных станах разработан комплексный программный продукт «ReduceR1», реализующий первые три уровня гибридного метода. Данный продукт по своим техническим характеристикам во многом схож с рассмотренным выше комплексом «Калибр».

При использовании нейронных сетей на третьем уровне гибридного метода производится корректировка результатов расчетов с учетом практических данных.

Для использования нейронной сети с целью прогнозирования технологических параметров прокатки известны различные прикладные пакеты программ. Авторами использована программа JustNN для прогнозирования величины сопротивления деформации. При формировании обучающей выборки использовались данные работы [4], в которой проводилось исследование высокопрочных трубных сталей 04Г2Б и 07Г2МФБ.

На входном слое выступают 17 нейронов: четырнадцать нейронов характеризуют химический состав сталей, остальные - температуру металла, скорость деформации и степень деформации соответственно. На промежуточном слое девять нейронов и на выходе - один нейрон, принимающий значение сопротивления деформации.

Для обеих марок сталей температура металла принималась равной 850, 900 и 1000 °С, скорость деформации - 1 и 10 с<sup>-1</sup>, степень деформации - 0,05, 0,25 и 0,45. Для каждого из вариантов на выходной слой задавали экспериментальное значение сопротивления деформации.



Влияние степени деформации на величину сопротивления деформации:  
1 - экспериментальные данные; 2 - прогнозируемые в нейронной сети

Таким образом, обучающая выборка была представлена в виде массива данных размером 18х36 элементов.

На основе данной выборки обученная нейронная сеть позволяет прогнозировать величину сопротивления деформации при варьировании содержания химических элементов в стали, температуры нагрева, скорости и степени деформации.

Для примера, на рисунке представлена диаграмма зависимости величины сопротивления деформации стали 04Г2Б от степени деформации (при неизменной температуре, равной 850 °С и скорости деформации 1 с<sup>-1</sup>).

Ошибка прогнозирования в нейронной сети составила от одного до восьми процентов. При увеличении количества данных обучающей выборки качество прогнозирования будет повышаться.

В целом гибридный подход к моделированию процессов прокатки позволяет успешно и с достаточной степенью прогнозировать технологические параметры. Расчеты на инженерном уровне позволяют ориентировочно оценить поставленную задачу, метод конечных элементов - уточнить первоначальную оценку, а нейронные сети - связать теоретические расчеты с конкретными производственными условиями.

#### **Выводы**

В работе показана целесообразность применения гибридного метода моделирования технологических параметров процессов прокатки. В рамках данного метода определено взаимное влияние инженерных методик, метода конечных элементов

и нейронных сетей друг на друга. Для случаев прокатки профилей на сортовых станах и труб на редуцированных станах и станах ХПТ разработаны программные комплексы, реализованные на базе гибридного метода. Разработана нейронная сеть для прогнозирования величины сопротивления деформации высокопрочных трубных сталей 04Г2Б и 07Г2МФБ в зависимости от химического состава стали, температуры, скорости и степени деформации. Сравнение опытных и прогнозируемых данных для отдельно взятого варианта показало, что величина ошибки составляет от одного до восьми процентов.

#### **Литература**

1. Дукмасов, В.Г. *Математические модели и процессы прокатки профилей высокого качества* / В.Г. Дукмасов, А.В. Выдрин. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. - 212 с.
2. Выдрин, А.В. *Конечно-элементная модель очага деформации при продольной прокатке* / А.В. Выдрин. - Челябинск: ЮУрГУ, 1999. - Деп. в ВИНТИ 02.06.99, № 1765-В-99.
3. Колмогоров, В.Л. *Напряжения, деформации, разрушение* / В.Л. Колмогоров. — М.: Металлургия, 1970. - 230 с.
4. *Влияние температуры пластической деформации на структуру и свойства низкоуглеродистой трубной стали* / И.Ю. Пышминцев, А.Н. Борякова, М.А. Смирнов, В.И. Крайнов // *Известия вузов. Черная металлургия*. — 2010. — № 1. — С. 35-40.

*Поступила в редакцию 20 сентября 2010 г.*