

Анализ полученных результатов показывает, что расчетные данные весьма близки к экспериментальным. Произведена оценка среднего отклонения расчетных и экспериментальных результатов по соотношению

$$\Delta\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) = \{\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})_{\text{эксп}} - \Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})_{\text{расч}}\} 100 / \Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})_{\text{эксп}}.$$

Среднее отклонение их составляет 4,6 %. Это свидетельствует о высокой надежности метода прогнозирования  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$  по данным измерения активности кислорода  $a_{[\text{O}]}$ .

**Выводы.** Показана возможность экспрессной оценки суммарного содержания (FeO + MnO) в шлаке по данным измерения активности кислорода в жидкой стали 110Г13Л. Метод апробирован в промышленных

условиях и показал высокую надежность результатов прогнозирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давыдов Н.Г., Ситнов В.В. Свойства, производство и применение высокомарганцевой стали. – М.: Машиностроение, 1996. – 232 с.
2. Житнов С.П., Давыдов Н.Г., Братчиков С.Г. Высокомарганцевые стали. – М.: Metallurgy, 1995. – 302 с.
3. Теоретические основы сталеплавильных процессов / Айзатулов Р.С., Харлашин П.С., Протопопов Е.В., Назюта Л.Ю. – М.: МИСиС. 2002. – 320 с.
4. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Metallurgy. 1987. – 272 с.
5. Кислородные зонды в сталеплавильном производстве / Лузгин В.П., Зинковский И.В., Покидышев В.В. и др. – М.: Metallurgy, 1989. – 144 с.

© 2012 г. Э.Б. Тен, Е.Ю. Лихолобов  
Поступила 17 ноября 2011 г.

УДК 621.73

*В.А. Осадчий, Ю.Ю. Костюхин, А.В. Бузинов*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

## РАСЧЕТ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОСЫ В КЛЕТИ ПРОФИЛЕГИБОЧНОГО СТАНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наметилась устойчивая тенденция к применению все большего количества гнутых металлических профилей, особенно в строительной индустрии. Увеличились не только объемы их производства, но и существенно расширился сортамент.

Следствием популярности гнутых профилей, а так же относительной простоты некоторых моделей профилегибочных станков, является тенденция к установке линий производства на предприятиях, специализация которых не связана с металлургией. Фирме, у которой возникла потребность в широкой номенклатуре этих изделий, но объем производства не позволяет заказывать большие партии, бывает выгоднее построить собственную линию производства, чем покупать много мелких партий у внешних поставщиков.

Таким образом, особенно актуальным становится вопрос создания средств, облегчающих проектирование оборудования для производства гнутых профилей, в частности профилегибочных прокатных станков. Большинство таких средств частично автоматизируют расчеты различных характеристик процесса, что часто негативно сказывается на надежности полученных результатов – большинство используемых методик и формул получены эмпирически, а это влечет за собой необходимость постоянного экспертного контроля обрабатываемой информации.

Для автоматизации и этой функции необходимо создать систему, которая будет либо постоянно оценивать работу существующего проектирующего приложения, либо на высоком уровне моделировать уже спроектированный процесс.

Для моделирования формоизменения полосы в процессе прокатки самым мощным инструментом на данный момент является метод конечных элементов. Его можно использовать различными способами.

Стоит отметить, что этот метод, как и большинство других численных методов, практически не совместим с ручными расчетами. Трудоемкость решаемых задач определяется, в лучшем случае, системой из сотен линейных уравнений. Часто число уравнений можно снизить за счет внесения в их формирование элементарных дифференциальных преобразований, но это ведет к увеличению сложности их получения.

Для удобства использования МКЭ создано множество программ с открытым кодом, макросов для использования в приложениях уровня Math Lab, а так же узко ориентированных на решение определенного круга задач систем (например моделирование поведения электромагнитного поля или моделирование процессов течения в металлах при прессовании).

Многие из существующих систем представляют большой интерес и могут послужить исходной точкой

для создания системы, направленной на моделирование прокатки гнутых профилей, но на данный момент ни одна из них в полной мере не может отразить процесс пластической деформации в тонком листе металла.

В результате анализа рынка программных продуктов было принято решение создать собственный программный модуль. Главными аргументами в пользу этого является возможность интеграции его с существующей системой автоматизированного проектирования, а так же возможность точно контролировать допустимый уровень упрощений – достоверность и точность получаемой информации, а так же время выполнения расчетов.

Было несколько принципиальных моментов при постановке задачи. Во-первых, планировалось использовать элементы разных типов в различных зонах исследования: в местах изгиба с маленькими радиусами это должны были стать трехмерные (тетраэдральные) конечные элементы, так как там деформации велики и направлены не только на изгиб, а значит, теория пластин не пригодна; для полок профиля планировалось использовать пластинчатые элементы, что в значительной степени снизило бы разрядность задачи, сложность и время вычислений. Во-вторых, нужно было создать систему граничных условий, наилучшим образом соответствующую энергосиловым параметрам именно процесса профилирования листа валками – правильно учесть контакт пластичного тела полосы с условно-твердым телом валков, а также трение и пластичность.

На данном этапе расчет проводился пошаговым методом исключительно для трехмерных конечных элементов (неудобно считать «широкие» профили).

При разработке алгоритма для упрощения задачи был сделан ряд допущений, в значительной мере не сказывающихся на точности результатов расчета.

1. Принята гипотеза плоских сечений, введенная швейцарским ученым Д. Бернулли, гласящая, что плоские сечения до деформации остаются плоскими и после деформации. Эту гипотезу можно рассматривать как экспериментальный факт, наблюдаемый, например, при нанесении прямоугольной сетки на резиновый стержень. При изгибе такого стержня продольные линии искривляются, в то время как поперечные линии остаются прямыми. В рассматриваемом случае гипотеза относится к смещению точек вдоль длины листа – считаем, что заготовка в продольном направлении не растягивается.
2. Очаг деформации начинается в месте прекращения контакта заготовки с линейками и заканчивается после осевой плоскости валков.
3. В расчетах не учитывается утонение профиля в местах изгиба, толщина металла остается постоянной.
4. Не учитывается упрочнение металла, вызванное наклепом вследствие пластической деформации. Упрочнение не принципиально, так как наибольший интерес представляет поведение полосы при неустановившемся процессе, который в основном проходит при упругих деформациях.
5. Не учитываются объемные силы, такие как сила тяжести, так как их влияние пренебрежительно мало по сравнению с действующими на полосу со стороны валков нагрузками.

Схема алгоритма расчета представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема алгоритм расчета формоизменения полосы МКЭ

Интерес представляют граничные условия. Характеристиками точности расчета являются количество разбиений листа по ширине и длине и количество шагов, на которые будет делиться очаг деформации для получения данных о динамике формоизменения при неустановившемся процессе. Разделение на шаги изображено на рис. 2.

Данные о геометрии валков – это расстояния от оси нижнего валка до соответствующих узловых точек на его поверхности. Каждой точке посвящена отдельная строка. Разбиение вала на  $n$  точек представлено на рис. 3.

В случае прокатки гнутых профилей в качестве граничных условий можно использовать заданные смещения узловых точек, контактирующих с валками.

Так же возможен вариант использования в качестве граничных условий сил, действующих на полосу со стороны валков, но это представляется не рациональным в связи с тем, что математический аппарат для определения этих сил проработан недостаточно, а сама идея использования метода конечных элементов для

реализации данного расчета направлена на уточнение данных, полученных исходя из эмпирических формул, сходных с теми, что определяют силы, действующие на металл в очаге деформации.

Итак, выбрав в качестве граничных условий заданные смещения контактирующих с валками точек, сталкиваемся с проблемой определения критерия прилегания полосы к валкам.

Однозначно можно утверждать только то, что с валками контактируют точки, находящиеся напротив выступающих элементов валков, как представлено на рис. 4.

Приходится допустить, что металл по ширине растягивается пренебрежительно мало, а скольжения его вдоль валков не происходит. Тогда точками контакта будут являться все точки, находящиеся между вершиной и точкой валка, которую можно соединить наиболее длинным прямым отрезком, не проходящим сквозь валок, с точкой другого валка.

Для выбранных узловых точек, исходя из геометрии, можно определить смещения вдоль оси  $Z$  относительно плоскости  $XU$ .

Узловые точки, находящиеся на дальней от валков кромке листа, имеет смысл считать неподвижными, так как деформация на такое расстояние практически не может распространиться, а так же благодаря линейкам, удерживающим полосу. Таким образом, все три компонента смещения узловых точек на дальней кромке принимаем равными нулю.

В результате получаем полный набор данных о смещениях в некоторых точках. При этом неизвестны внешние силы, действующие в этих точках на металл со стороны валка.

С другой стороны, остальные точки с валками не контактируют, следовательно внешние силы, действующие на них, равны нулю.

Основное выражение метода конечных элементов можно записать в следующем виде:

$$[K] \cdot \{\delta\} = \{F\},$$

где  $[K]$  – глобальная матрица жесткости;  $\{\delta\}$  – вектор смещений узловых точек;  $\{F\}$  – вектор внешних сил, действующих на узловые точки.

На данном этапе уже определены смещения в некоторых узловых точках и силы, действующие в других.

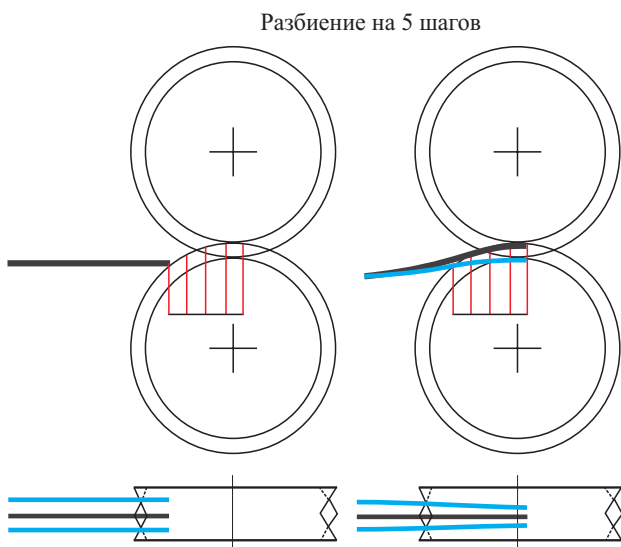


Рис. 2. Разбиение процесса на шаги

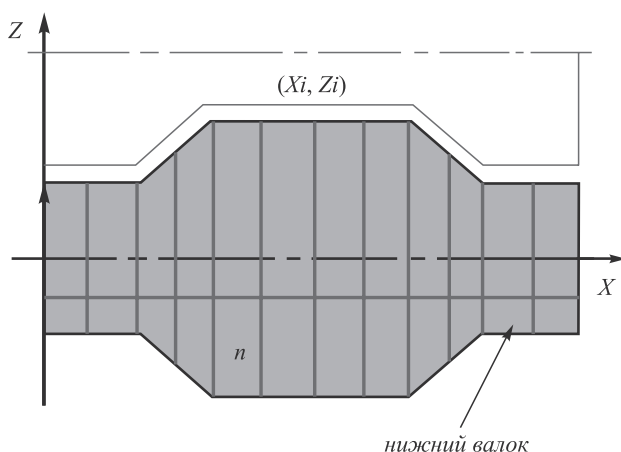


Рис. 3. Разбиение вала на  $n$  точек

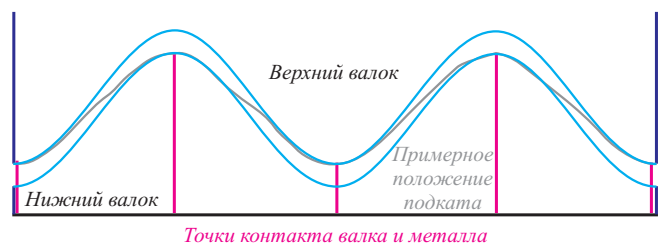


Рис. 4. Точки контакта металла с валками

Это обеспечивает сходимость системы. Матрицу жесткости нужно переопределять на каждом шаге в зависимости от изменения характеристик материала, связанных с пластичностью и изменения геометрии системы, связанного с движением полосы вдоль очага деформации. В остальном глобальная матрица жесткости строится стандартным для метода способом – собирается из матриц конечных элементов, которые в свою очередь получаются из градиентных (отражает геометрию тела) и упругих (отражает механические свойства материала) матриц. Здесь умышленно опущены детальные сведения по созданию матриц жесткости – их можно почерпнуть в любом классическом учебнике по методу конечных элементов.

Последовательное решение таких систем уравнений дает множество массивов смещения узловых точек полосы.

В результате составления программы, выполняющей расчет по приведенному алгоритму, были получены удовлетворительные результаты для профилей из заготовок с большой толщиной по отношению к ширине.

Например, одно из сечений корытообразного профиля построено по точкам с помощью модуля построения графиков Microsoft Excel. Построение представлено на рис. 5.

Аналогичные расчеты были выполнены в Deform и для первых клеток. Результаты смещений сошлись, но накопленная ошибка привела к сбоям на последних клетках. На рис. 6 представлен последний предшествующий критической ошибке шаг в Deform.

Итак, для решения проблемы проверки калибровок, полученных системой автоматизированного проектирования, могут быть использованы различные средства. Прежде чем приступить к созданию самостоятельной программы, были проведены работы с рядом существующих приложений: Deform, Solid Works, Ansys (Ls-Dyna). Каждое из вышеназванных приложений было признано малоприспособленным по различным причинам.

Модуль Simulation, отвечающий за решения конечно элементных задач в Solid Works, ориентирован на прочностные расчеты и показывает низкий уровень сходимости в задачах пластической деформации. Так же все расчеты, сопряженные с пластичностью, выполняются крайне долго из-за полного отсутствия упрощений пос-

тановки задачи. С другой стороны, он поддерживает постановку задачи для плоских элементов (листовой материал). Так же Solid Works – очень удобная программа для задания геометрии системы.

Ansys – система более универсальная. Это логично, так как она в отличие от Solid Works, ориентирована именно на конечно элементные задачи, однако имеет крайне не дружелюбный интерфейс, а так же, зачастую, излишне требовательна при постановке задачи. Попытки ее использования в качестве препроцессора к системе Ls-Dyna увенчались провалом. При проверке конкретных калибровок главной проблемой стала невозможность в должной степени учесть трение, образующееся в процессе прокатки.

Deform – программа, ориентированная на металлургию. С одной стороны она обладает недружелюбным интерфейсом (например, не поддерживает латинских символов в именах файлов и адресах директорий), с другой стороны относительно проста в освоении. Эту программу можно использовать для выполнения расчетов прокатки, но только в случае небольшого количества клеток и небольшой ширины полосы по отношению к ее толщине. Deform поддерживает только объемные конечные элементы, что делает невозможным снижение разрядности задачи за счет упрощений, связанных с теорией пластин, либо другими типами плоских конечных элементов. Таким образом, расчет «широких» профилей в Deform может занимать длительное время

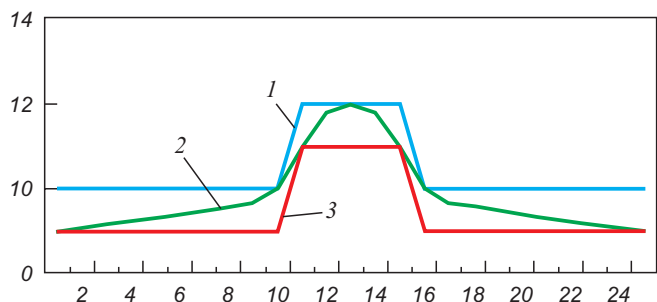


Рис. 5. Построение третьего сечения первого шага:  
1 – верхний валок; 2 – полоса; 3 – нижний валок

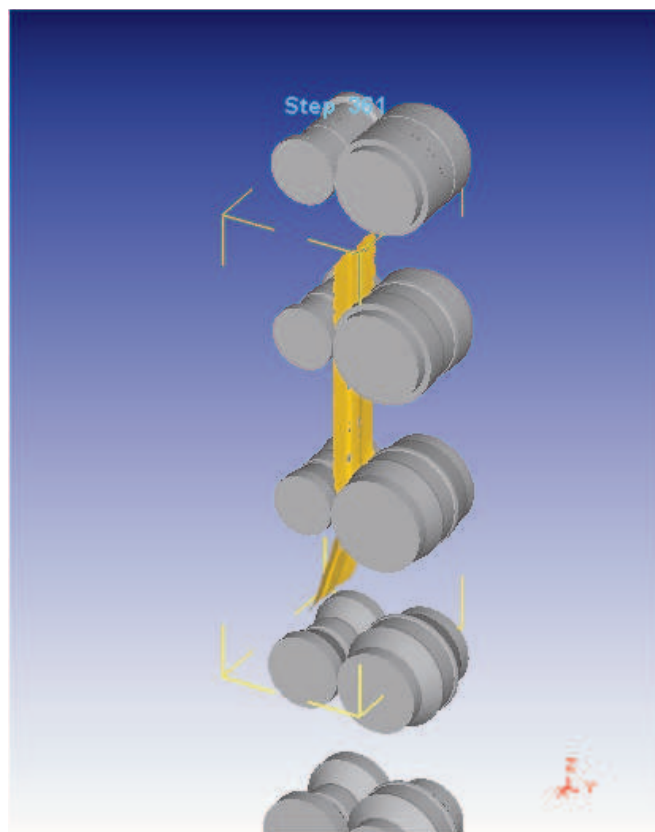


Рис. 6. Модель в Deform

(в рассматриваемом случае для одного из профилей больше месяца). При попытке снизить разрядность задачи за счет снижения точности – плотности разбивки есть существенный риск перехода накопленных деформаций за предел прочности в особо деформируемых элементах. Программа считает их разрушенными и это нарушает достоверность получаемой в ходе ее работы информации.

Таким образом, вопрос моделирования процесса прокатки гнутых профилей, несмотря на наличие широкого круга программных продуктов, ориентированных на метод конечных элементов, остается открытым. Разработка собственного алгоритма и программной надстройки является зачастую оптимальным решением.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство гнутых профилей. Оборудование и технология. / И.С. Тришевский, А.Б. Юрченко, В.С. Марьин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 384 с.
2. Че к м а р е в А.П., К а л у ж с к и й В.Б. Гнутые профили проката. – М.: Металлургия, 1974. – 264 с.
3. Интернет-приложение для проектирования оснастки и оборудования при производстве гнутых профилей проката / В.А. Осадчий, А.О. Овсянников, О.Ю. Герман и др. // Тр. Седьмого конгресса прокатчиков. Т. 2. – М., 15 – 18 октября 2007 г. МОО «Объединение прокатчиков». Корпорация производителей черных металлов. 2007. С. 448 – 450.

© 2012 г. В.А. Осадчий, Ю.Ю. Костюхин, А.В. Бузинов

Поступила 7 ноября 2011 г.

УДК 536.24

Е.В. Попов, Г.М. Дружинин

Уральский федеральный университет

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ НА НАГРЕВ ЗАГОТОВОК В ПЕЧАХ

Для фазовых превращений, имеющих место в металле во время нагрева заготовки в высокотемпературных печах, характерно скачкообразное изменение энтальпии. Теплоемкость при этом также испытывает скачок, сопровождающийся резким максимумом. Причем теплоемкость низкотемпературной фазы, как правило больше теплоемкости высокотемпературной фазы.

Согласно В.А. Маковскому [1], зависимость истинной теплоемкости от температуры, рассчитанная по формуле

$$c(t) = c_0 + a_1 \left( \frac{t}{1000} \right)^n + a_2 e^{-a_3(|t-t_0|)}, \quad (1)$$

где  $t$  – текущая температура стали, °С;  $c_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $t_0$  – постоянные, зависящие от группы марки стали, характеризуется кривой с одним четко фиксированным максимумом.

Однако для стали с повышенным содержанием хрома график температурной зависимости коэффициента теплоемкости характеризуется наличием двух, а то и трех экстремумов. В этом случае для определения истинной теплоемкости стали различного химического состава при наличии  $n$ -го количества фазовых превращений рекомендуется пользоваться уравнением [2]

$$c(T) = c_0 + \sum_{i=1}^n \frac{m_i L_i}{\Delta T_i} \exp \left[ -a_i^2 \left( \frac{T_{i0} - T}{T_{i0} - T_{i1}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $T_1$  и  $T_0$  – температура начала и окончания фазовых

превращений соответственно, °С;  $c_0$  – теплоемкость стали при отсутствии фазовых превращений, Дж/кг·°С;  $L_i$  – теплота эвтектичного превращения, кДж/кг;  $m_i$ ,  $a_i$  – константы, зависящие от функции ошибок [2];  $T$  – текущая температура в рассматриваемых точках, К.

В результате решения уравнения (2) с использованием справочных данных [3, 4] были получены зависимости теплоемкости стали: углеродистой У8, аустенитной 1Х18Н9Т и нержавеющей 2Х13. На рис. 1 видны значительные различия в функциях теплоемкости данных марок стали от температуры. Обращает на себя внима-

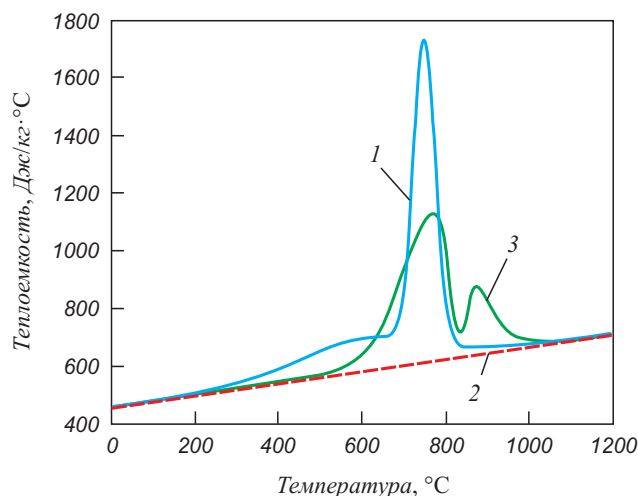


Рис. 1. Зависимость теплоемкости от температуры для различных марок стали:  
1 – У8; 2 – 1Х18Н9Т; 3 – 2Х13