

УДК 621.774.6

Федоринов В. А.
Завгородний А. В.
Стриченко С. М.
Литвинова Е. Г.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРАВКЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

Предприятия металлургического комплекса Украины относятся к крупнейшим поставщикам сортовой заготовки и длинномерного металлопроката на мировой рынок. В условиях жесткой конкуренции перед отечественными производителями встала проблема скорейшего повышения качества, получаемых на машинах непрерывного литья (МНЛЗ), в том числе и таких показателей как прямолинейность формы в вертикальной и горизонтальной плоскостях [1, 2]. Решение таких задач возможно на основе дальнейшего развития методов автоматизированного расчета и проектирования технологий и оборудования соответствующих процессов правки.

Целью данной работы является уточнение математической модели для определения напряженно-деформированного состояния металла непрерывнолитой заготовки, подвергаемой правке изгибом на участке правильно-тянущих установок МНЛЗ.

В рамках анализа напряженно-деформированного состояния металла при правке был выполнен расчет с использованием метода конечных элементов в системе ABAQUS [3]. Рассматриваемая применительно к анализу процесса правки непрерывно-литых заготовок на участке тянуще-правильного устройства расчетная схема представлена на рис. 1.

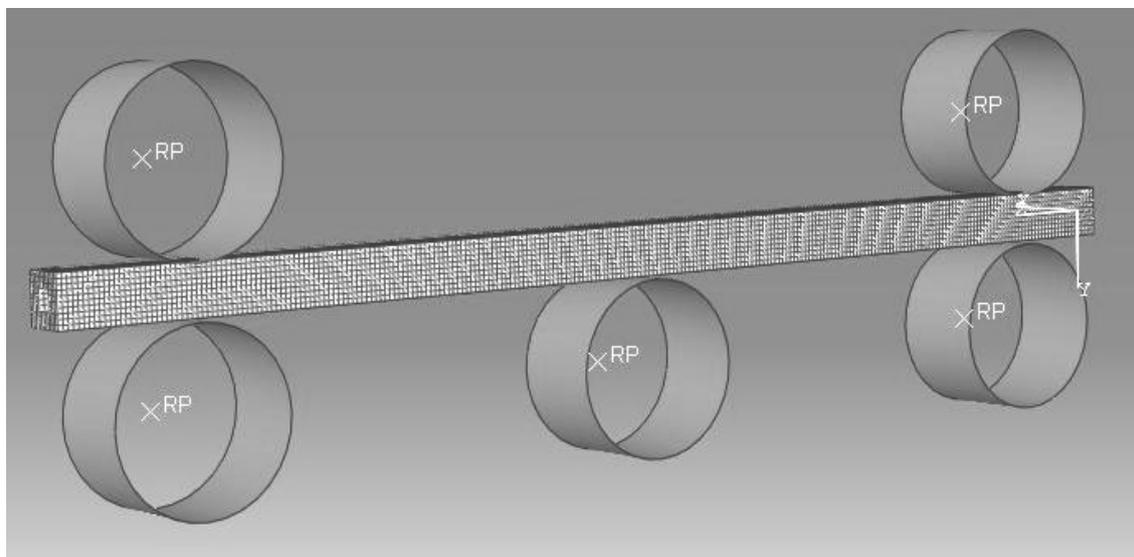


Рис. 1. Конечно-элементная модель процесса правки непрерывнолитых заготовок на участке тянуще-правильного устройства сортовой МНЛЗ радиального или криволинейного типов

Моделирование заключалось в построении конечно-элементной сетки, а затем разбиении ее на конечное множество элементарных элементов. Модель валков была выполнена с использованием недеформируемых четырехузловых элементов типа R3D4 [4], а непрерывнолитая заготовка – четырехузловый элемент с контролем разрушения типа S4R [4].

Данные расчеты были выполнены применительно к тянуще-правильному устройству сортовой МНЛЗ Енакиевского металлургического завода. При этом шаг машины t был принят

1000 мм, диаметр бочки ролика $D = 350$ мм, длина бочки ролика $L = 200$ мм. Непосредственно моделирование процесса было выполнено для непрерывно-литой заготовки сечением $h \times B = 100 \times 100$ мм. Исходная конечно-элементная модель имеет следующие граничные условия: крайние нижние валки (см. рис. 1) имеют одну вращательную степень свободы, верхние валки имеют вращательную степень свободы и возможность перемещения по оси Y глобальной системы координат для осуществления настройки модели на требуемый сортament. Средний опорный ролик имеет две степени свободы – возможность вращения вокруг своей оси, а также перемещения по оси Y глобальной системы координат.

При расчетах была принята изотропная упругопластическая модель (рис. 2, а) материала заготовки с учетом упрочнения [5]:

$$\bar{s} = \bar{s}(\bar{e}^{nl}, \dot{\bar{e}}^{nl}, q, f_i), \quad (1)$$

где \bar{e}^{nl} – эквивалентная пластическая деформация;

$\dot{\bar{e}}^{nl}$ – скорость пластической деформации;

q – температура;

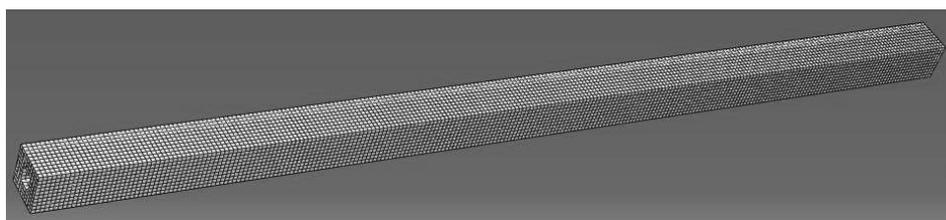
f_i – другие предопределенные переменные [6].

Контакт между заготовкой и роликами задавался при помощи модели контакта «Поверхность к поверхности» путем задания коэффициента трения $m = 0,3$, используя «classical isotropic Coulomb friction model»:

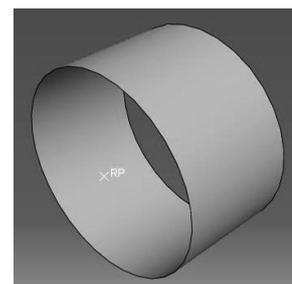
$$t_{крит} = m \cdot p, \quad (2)$$

где p – нормальные контактные напряжения в плоскостях сопряжения инструмента и деформируемой заготовки [6].

Моделирование правильных валков (см. рис. 2, б) было выполнено в виде недеформируемой поверхности вращения, полученной путем вращения кривой профиля вокруг оси валка.



а



б

Рис. 2. Конечно-элементная модель непрерывнолитой заготовки, подвергаемой правке (а), и рабочего ролика (б) при моделировании процесса правки на участке тянуще-правильного устройства сортовой МНЛЗ

Процесс моделирования правки непрерывнолитых сортовых заготовок на тянуще-правильной установке осуществлялся в два этапа. Первый шаг заключался в применении граничных условий, описанных выше. Следующий шаг заключался в задании контрольным точкам верхних валков перемещения по оси Y глобальной системы координат, чем создавалась настройка модели на данный сортament, а контрольной точке среднего опорного валка задавалось перемещение по оси Y для создания прогиба заготовки. После этого все пять валков приводились во вращение.

В качестве выходных параметров в данном случае выбирались проекции реакций в контрольных точках валков в глобальной системе координат $RF1, RF2, RF3$, а также перемещения, деформации и напряжения в узлах конечных элементов непрерывно-литой заготовки.

Проводя анализ полученных результатов, выяснилось, что максимальная сила правки действует на средний опорный валок. Это объясняется тем, что правка осуществляется смещением данного ролика вверх. Распределения эквивалентных напряжений (рис. 3) и деформаций (рис. 4) представлены в графической форме в виде объемной деформированной модели.

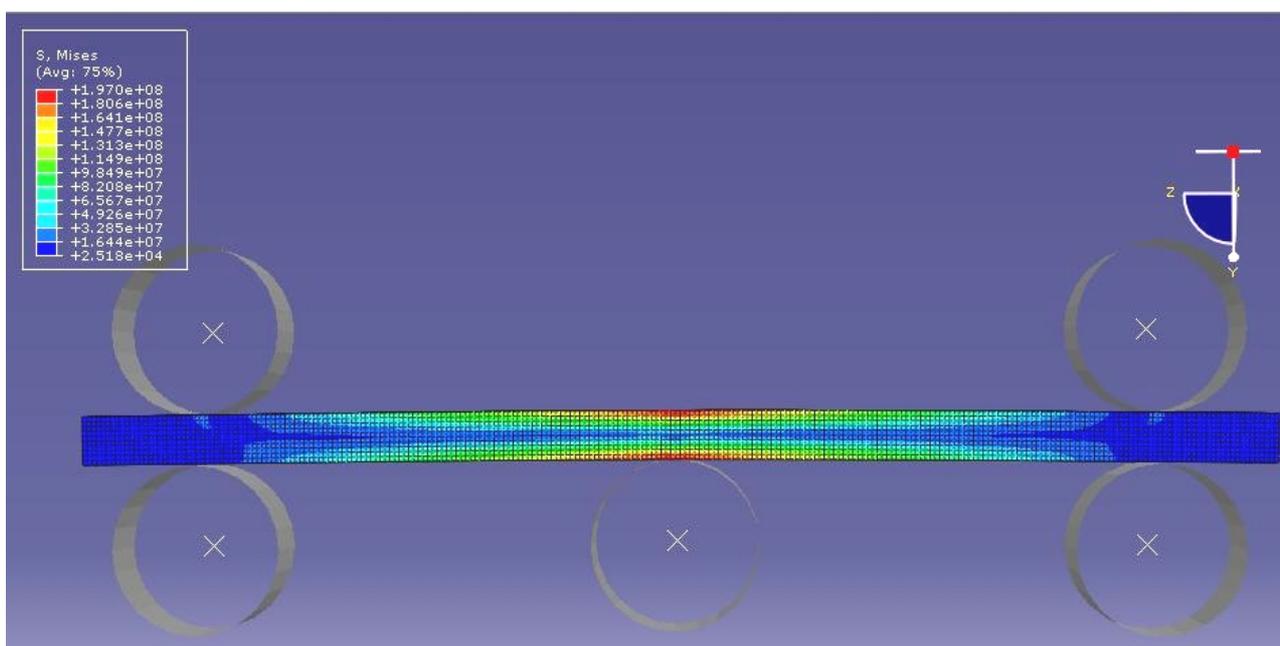


Рис. 3. Расчетные распределения эквивалентных напряжений непрерывнолитой заготовки при реализации процесса ее правки на участке тянуще-правильного устройства сортовой МНЛЗ

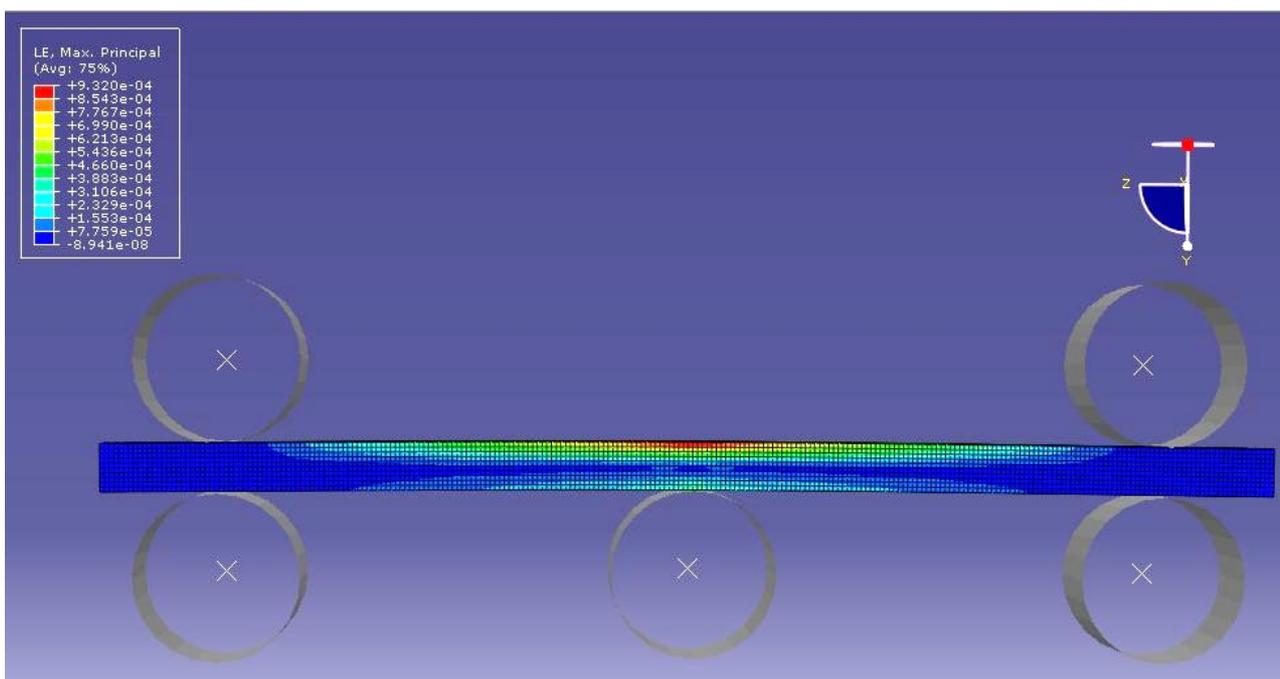


Рис. 4. Расчетные распределения деформаций непрерывнолитой заготовки при реализации процесса ее правки на участке тянуще-правильного устройства сортовой МНЛЗ

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно сложном характере механизма формирования напряженного состояния металла. Расчетные распределения напряжений и деформаций показали, что максимальные значения наблюдаются в районе среднего опорного ролика, и возрастают с увеличением прогиба опорной системы.

Все это подтверждает целесообразность разработки адекватных расчетных моделей, которые строго учитывают граничные условия, а также используют метод конечных элементов.

ВЫВОДЫ

Расчет был произведен применительно к тянуще-правильному устройству МНЛЗ Енакиевского металлургического завода. В связи с чем приводными выполнены первая пара тянущих роликов и выходной верхний ролик. Диаметры роликов соответствуют реальным значениям. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно сложном характере напряженного состояния металла при правке непрерывнолитых смортовых заготовок изгибом на участке тянуще-правильного устройства машин непрерывного литья. Все это подтверждает необходимость создания адекватных расчетных моделей, строго учета граничных условий, таких как наличие жидкой фазы в осевой зоне заготовки, а также использование метода конечных элементов, с использованием программного продукта ABAQUS. Все это позволит разработать рекомендации по совершенствованию технологий и оборудования процессов правки непрерывнолитых заготовок во всем диапазоне их возможных условий реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Машины непрерывного литья заготовок / Л. В. Буланов, Л. Г. Корзулин, Е. П. Парфенов, Н. А. Юровский, В. Ю. Авдонин. – Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2003. – 320 с.*
2. *Смирнов А. Н. Процессы непрерывной разливки : монография / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев [и др.]. – Донецк : ДонНТУ, 2002. – 536 с.*
3. *Манилык Т. Практически е рекомендации программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.6. / Т. Манилык, К. Ильин. – М. : МФТИ, Тесис, 2006. – 68 с.*
4. *Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд. ; перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.*
5. *Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гунн, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.*
6. *Viscouse and elastic-plastic material model in the ABAQUS / K. Santaoja. – Espoo, 1993. – 54 p.*

Федоринов В. А. – канд. техн. наук, проф., ректор ДГМА;

Завгородний А. В. – аспирант ДГМА;

Стриченко С. М. – ведущий инженер ОАО «ЕМЗ»;

Литвинова Е. Г. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ОАО «ЕМЗ» – ОАО «Енакиевский металлургический завод», г. Енакиево.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua