

УДК 621.982.47:519.87

Сатонин А. В.
Сухоруков И. С.
Коробко Т. Б.
Козачишен В. А.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С ИЗГИБОМ ХОЛОДНОКАТАННОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА С ПОКРЫТИЕМ

Выход Украины на мировой рынок высококачественного металлопроката делает необходимым дальнейшее развитие высокотехнологичных отраслей промышленного комплекса. Это в полной мере касается процессов производства холоднокатаных лент и полос, успешное дальнейшее развитие которых невозможно без расширения сортамента и повышения качества выпускаемой металлопродукции. Расширение сортамента данного вида металлопроката, а также повышающиеся требования к основным показателям его качества делает необходимым дальнейшее развитие методов по автоматизированному расчету и проектированию соответствующих технологий и оборудования.

Процессы правки растяжением с изгибом относятся к операциям по отделке готового холоднокатаного металлопроката, при этом условия реализации позволяют не только достичь требуемых механических свойств, а также распределений остаточных напряжений и деформаций по толщине обрабатываемой заготовки, но и в значительной мере снизить дефекты формы и плоскостности, такие как волнистость, коробоватость, серповидность и т. д. Таким образом, реализация процессов правки растяжением с изгибом позволяет существенно повысить качество готового холоднокатаного металлопроката, а следовательно, и конкурентоспособность выпускаемой металлопродукции в целом, при минимальных дополнительных затратах материальных ресурсов и времени.

Существующие методы расчета правки растяжением с изгибом не позволяют определять основные характеристики процесса при обработке многослойных полиметаллических лент и полос, а также прогнозировать с высокой долей вероятности основные показатели качества. Поэтому актуальной является задача создания соответствующих систем автоматизированного проектирования.

В основу рассматриваемой математической модели процесса правки растяжением с изгибом положено численное рекуррентное решение конечно-разностной формы условий статического равновесия выделенного элементарного объема металла в зоне его упругопластического формоизменения [1–6]. Расчетная схема в данном случае включает в себя зону исходного состояния, зону предварительного растяжения, зону циклического знакопеременного изгиба, участок выхода и разгрузки, а также зону результирующего состояния полосы (рис. 1).

Целью данной работы является моделирование процесса правки растяжением с изгибом холоднокатанного металлопроката с покрытием.

Полоса, подвергаемая правке, имеет исходную толщину h_H , ширину B , модуль упругости E_n и коэффициент Баушингера b_r , исходный предел текучести σ_{T0} и значение начальной продольной кривизны ρ_H , предварительно нагружается натяжением заданной величины T_0 , вследствие чего она становится плоской, то есть $\rho(T_0) = 0$. При последовательном движении через n роликов полоса подвергается знакопеременному изгибу, при этом считаем, что величины экстремальных значений кривизны полосы при контакте с каждым из рабочих роликов являются известными и для первой итерации расчета определяются значением радиуса кривизны образующей соответствующих роликов. За последним роликом полоса под действием переднего натяжения вновь становится плоской, после чего, по мере снятия внешней нагрузки, она приобретает результирующее состояние, характеризваемое остаточной продольной кривизной $\rho_{ост}$, а также остаточными распределениями механических свойств, напряжений и деформаций.

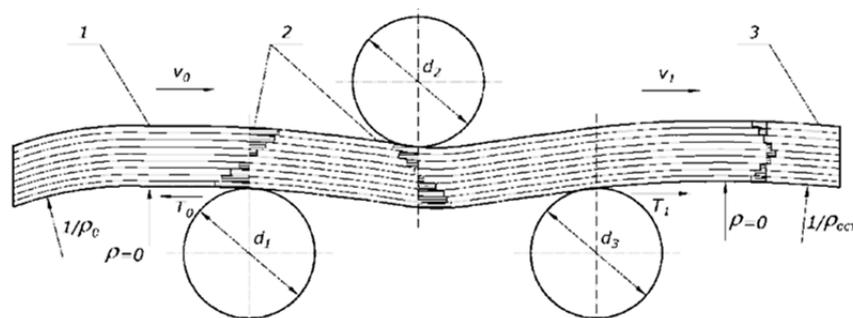


Рис. 1. Расчетная схема условий реализации процесса правки растяжением с изгибом: 1, 2, 3 – номера рабочих роликов

Решение задачи математического моделирования напряженно-деформированного состояния металла при реализации процесса правки растяжением с изгибом в конечно-разностной форме был применен метод сеток. Для решения данной задачи, в связи с тем, что очаг деформации имеет прямоугольную форму, разбиваем его ортогональными плоскостями на конечное множество элементарных объемов по толщине, с порядковыми номерами $i = (1 \dots k_H)$, и разбиением полосы по длине: номера $j = (1 \dots k_\rho)$ (рис. 2). Узлы сетки определяют сечения каждого элементарного объема и могут быть охарактеризованы порядковыми номерами $i, i-1, j, j-1$, полученными разбиением полосы согласно изменению ее продольной кривизны. Геометрическая координата центра тяжести y_{ji} для текущего ji -го элементарного объема определяется геометрическими соотношениями:

$$y_{ji} = h_{0j}/2 - h_{0j}/k_H (i - 0,5), \quad (1)$$

где начало координат y принадлежит центру тяжести $S_{ЦТ}$ поперечного сечения всей полосы;

h_{0j} – текущее значение толщины полосы;

k_H – заданное количество разбиений полосы по ее толщине.

С учетом выбранного значения количества разбиений по кривизне k_ρ могут быть также определены текущие значения кривизны полосы:

$$\Delta\rho = (\rho_1 - \rho_0)/k_\rho; \quad (2)$$

$$\rho_j = \rho_0 + j \cdot \Delta\rho \text{ или } \rho_j = \rho_{(j-1)} + \Delta\rho, \quad (3)$$

где ρ_0, ρ_1 – начальное и конечное значение кривизны полосы на данном цикле изгиба.

С точки зрения напряженно-деформированного состояния каждый элементарный объем металла характеризуется продольными составляющими относительных деформаций растяжения-сжатия $\varepsilon_{(j-1)i}$ и ε_{ji} , а также соответствующими им нормальными осевыми напряжениями $\sigma_{(j-1)i}$ и σ_{ji} , которые связаны соотношениями:

$$\sigma_{(j-1)i} = E_n \cdot \varepsilon_{(j-1)i} \text{ и } \sigma_{ji} = E_n \cdot \varepsilon_{ji}. \quad (4)$$

При разработке математической модели процесса правки растяжением с изгибом приняты следующие основные допущения:

– деформация полосы при неизменной ширине B двумерная. В пределах всей полосы считаем справедливой гипотезу плоских сечений (гипотезу Бернулли), при этом влиянием деформаций сдвига и связанным с ними влиянием касательных компонент тензора напряжений можно пренебречь. Это по своей сути адекватно предположению о неизменности напряженно-

Таким образом, с учетом рекуррентной схемы решения и известных значениях T_{j-1} и M_{j-1} , а также согласно (1) значений геометрических характеристик, непосредственное решение уравнений (5) и (6) и нахождение основных компонент напряженно-деформированного состояния металла при реализации процесса правки растяжением с изгибом сводится к определению нормальных осевых напряжений σ_{ji} , которые, в свою очередь, определяют величины деформаций растяжения-сжатия каждого отдельного слоя в рамках выделенного элементарного объема.

Численное решение сформулированной постановки выполняется средствами стандартного математического пакета FORTRAN. При этом рекуррентные выражения записываются в виде подпрограммы FCT определения правых частей системы.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты свидетельствуют о наличии довольно сложного характера распределений локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при реализации процессов правки растяжением с изгибом в каждом конкретном случае, сложном характере влияния всего комплекса исходных данных и граничных условий реализации процесса. Вышеизложенное в статье подтверждает необходимость обеспечения максимально более полного и корректного учета всех факторов, определяющих условия формирования напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества готовой металлопродукции при реализации различных технологических схем процесса правки растяжением с изгибом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Одномерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при правке растяжением с изгибом* / В. И. Дунаевский, В. А. Самойлов, А. В. Сатонин, А. Б. Егоров // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1994. – № 9. – С. 44–47.
2. *Методика расчета процесса правки на многороликовых листопрямильных машинах* / В. И. Дунаевский, А. Б. Егоров, О. В. Марченякова, И. Н. Добряк // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні* : сб. науч. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 325–328.
3. *Головлев В. Д. Исследование правки растяжением листового металла* / В. Д. Головлев // *Конструирование, расчет и исследование прокатных станков* : сб. науч. трудов. – М. : ВНИИМетмаш, 1987. – 126 с.
4. *О правке металлических полос при знакопеременном изгибе с растяжением* / Г. Л. Химич и др. // *Исследование процессов правки и термического упрочнения полос* : Тр. ВНИИМетмаш. – МТТМ СССР. – М. : ВНИИМетмаш, 1980. – С. 3–7.
5. *Самойлов В. А. Алгоритм расчета параметров процесса правки растяжением с изгибом* / В. А. Самойлов, А. Б. Егоров // *Совершенствование металлургических машин* : сб. науч. тр. – М. : ВНИИМетмаш, 1989. – С. 102–104.
6. *Самойлов В. А. Расчет напряженно-деформированного состояния полосы при правке растяжением с изгибом* / В. А. Самойлов, А. Б. Егоров // *Совершенствование процессов и машин для обработки проката* : сб. науч. трудов. – М. : ВНИИМетмаш, 1988. – С. 94–99.

Сатонин А. В. – д-р техн. наук, проф. каф. АММ ДГМА;

Сухоруков И. С. – аспирант каф. АММ ДГМА;

Коробко Т. Б. – канд. техн. наук, доц. ДонГТУ;

Козачишен В. А. – канд. техн. наук, доц. ДонГТУ.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua; korobko.tamara@rambler.ru; vitalykozachishen@gmail.com