

УПРАВЛЯЕМОСТЬ И НАБЛЮДАЕМОСТЬ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ НА ОПРАВКЕ

Бородин Е.М., Бородин М.Ю., Харитонов В.В.

Институт машиноведения УрО РАН,

УрФУ имени первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург.

Одним из основных способов производства бесшовных труб является непрерывная раскатка на длинной подвижной оправке. Такой способ получения черновых труб используется, в частности на ТПА-80 (Синарский трубный завод), ТПА-30-102 (Первоуральский Новотрубный завод). Однако

данный процесс мало изучен как объект управления. Данное обстоятельство делает актуальным разработку математической модели непрерывной прокатки на оправке.

Схема технологического процесса приводится на рис. 1

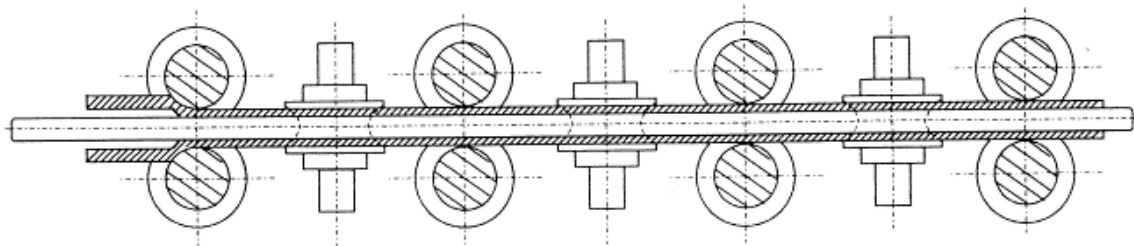


Рис.1. Схема технологического процесса.

В работе [1] предложена математическая модель данного процесса прокатки, основанная на системе линейных алгебраических уравнений. С использованием клеточных матриц [2], система уравнений модели может быть записана

$$Au = b(\Delta\Omega, \Delta V_m), \quad (1)$$

где

$u = (\Delta V_0^T, \Delta V_1^T, \Delta Q^T, \Delta G^T, \Delta F_m^T)^T$ - вектор приращений выходных параметров относительно базового режима и ΔV_0 -вектор приращений входных скоростей клеток, ΔV_1 -вектор приращений выходных скоростей клеток, ΔQ -вектор приращений усилий, приложенных к трубе

на входе в клетки стана, ΔG -вектор приращений усилий, приложенных к трубе на выходе из клетки стана, ΔF_m -вектор приращений усилий трения на оправке, создаваемых отдельными клетями, ΔV_m - скорость оправки.

Правая часть уравнения (1) является линейной комбинацией компонент $\Delta\Omega$ - вектора приращений скоростей валков и ΔV_m - приращения скорости оправки.

Рис.2 поясняет обозначения переменных.

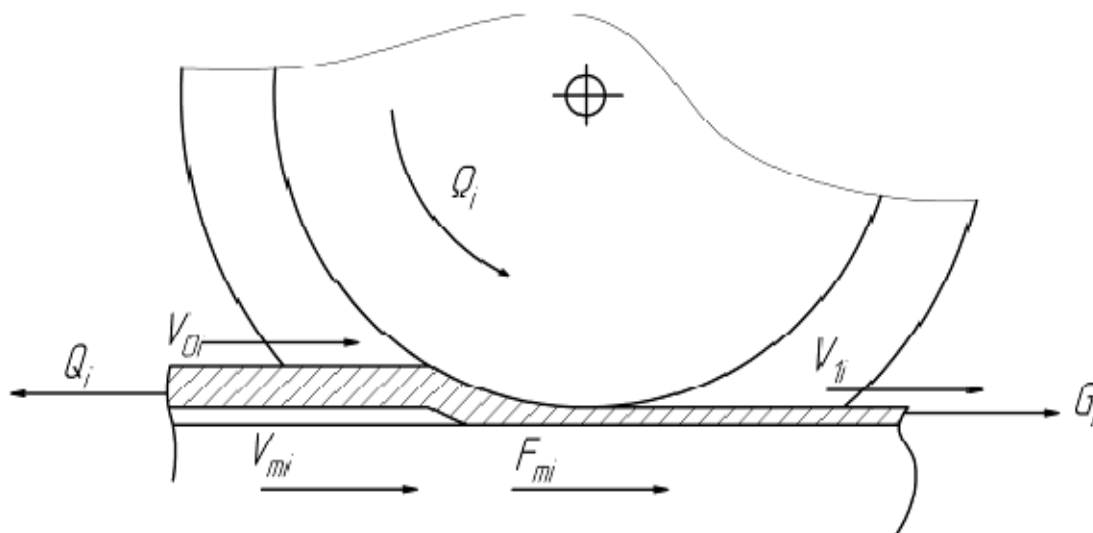


Рис. 2. Входные и выходные переменные отдельной клетки

Компоненты матрицы A и параметры правой части $b(\Delta\Omega, \Delta V_m)$ были получены с помощью решения краевой задачи теории пластичности методом конечных элементов, реализованном в пакете прикладных программ DEFORM-3D. Были приняты допущения об изотропности материала, абсолютно жестком инструменте и изотермическом характере процесса деформации. Материал заготовки вязкопластический, условие несжимаемости материала учтено приближенно при помощи метода штрафов. Коэффициент трения μ (по Прандтлю - Зибелю) на поверхности контакта “валок - заготовка” равен 1, а по поверхности “заготовка - оправка” – 0.3.

Ввиду ограниченности вычислительных ресурсов, исследовалась прокатка в двухклетевом сегменте стана. Вычислительный эксперимент был организован по методу факторного планирования, что позволило сократить объем расчетов. Использовался план вида 2^3 [3]. Сопоставление дополнительных расчетов по методу конечных элементов и по модели (1) показало адекватность последней.

Следующий шаг в построении математической модели непрерывной прокатки как объекта управления связан с учетом динамики оправки.

С учетом того, что на оправку действуют лишь силы трения, ее уравнение движения будет иметь вид

$$m_{оп} \frac{d}{dt} \Delta V_m = \Delta F_m(\Delta\Omega, \Delta Q, \Delta G, \Delta V_m). \quad (2)$$

Модель, предложенная в [1], включает уравнения силовой связи клетей

$$Q_i = G_{i-1}, \quad (3)$$

и кинематической связи клетей

$$V_{0i} = V_{1(i-1)}. \quad (4)$$

Кроме того, следует отметить, что усилия межклетевого взаимодействия являются технологически существенным фактором, тесно связанным с вопросами качества труб и извлечения оправки [4]. С учетом этого соображения и уравнений (3)-(4) уравнения (1) и (2) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta V_m &= J_1 \Delta V_m + J_2 \Delta\Omega; \\ \Delta G &= B_\Omega \Delta\Omega + B_{VM} \Delta V_m; \\ \Delta Q &= C_\Omega \Delta\Omega + C_{VM} \Delta V_m. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, получена модель технологического процесса в виде динамической системы с единственной фазовой координатой ΔV_m и двумя векторными выходами, ΔG и ΔQ . Согласно [5], в системе (5) J_2 - матрица управляемости, B_{VM} -матрица наблюдаемости по выходу

ΔG , C_{VM} -матрица наблюдаемости по выходу ΔQ .

Оценки коэффициентов матриц управляемости и наблюдаемости были выполнены с помощью метода конечных элементов, с использованием приводимых в [1] данных.

Для параметров калибровки К-4 восьмиклетевого непрерывного стана ТПА-80 Синарского трубного завода матрицы B_{VM} и C_{VM} оказались следующими:

$$\begin{aligned} J_1 &= (-0.36), \\ J_2 &= (21.31, -9.4724), \\ B_{VM} &= (0.0065, 0)^T, \\ C_{VM} &= (0, 0.0083)^T. \end{aligned} \quad (6)$$

Можно видеть, что $\text{rang}(J_2) = 1$, что позволяет считать систему (6) управляемой. Поскольку единственный элемент матрицы J_1 - отрицательный, система будет устойчивой.

Как можно видеть из (6), компоненты матриц B_{VM} и C_{VM} относительно малы в сравнении с коэффициентами матриц J_1 и J_2 . Максимальные значения компонент B_{VM} и C_{VM} составляют не более 2.5% от минимального компонента матрицы J_1 . Таким образом, ранг матриц B_{VM} и C_{VM} можно считать равным нулю. Это означает, что систему (5) можно считать ненаблюдаемой.

Таким образом, по усилиям межклетевого взаимодействия нельзя определить скорость оправки. Последнее означает, что система автоматического регулирования межклетевых натяжений должна содержать датчик скорости оправки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Е.М. Бородин, В.Л. Колмогоров, М.Ю. Бородин, В.В. Харитонов. Математическая модель непрерывной оправочной прокатки труб / Сталь. 2009. №10. С. 71-74
2. Фаддеев Д. К., Фаддеева Д. Н. Вычислительные методы линейной алгебры, 2 изд., М.-Л., 1963, 736 С.
3. Налимов В.В. Теория эксперимента М.: Наука, 1971. 208 С.
4. Колмогоров В.Л., Швейкин В.В. О получении зазора между трубой и оправкой при прокатке в непрерывных станах // Труды УПИ, сб. 73. Исследования в области черной и цветной металлургии. Свердловск, 1958. С. 207-215.
5. Страшинин Е.Э. Основы теории автоматического управления, Часть 1. Линейные непрерывные системы управления.: Учебное пособие / Екатеринбург: УГТУ, 2000