

В.В. ЧИГИРИНСКИЙ, А.Ю. ПУТНОКИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕРИОД ЗАХВАТА МЕТАЛЛА

Розглядається змінний процес прокатування в умовах безперервного широкосмугового стану. В лінії головного приводу виникають затухаючі крутильні коливання. Змінний вплив валків на осередок деформування приводить до зміни взаємодії системи валок - смуга. Для аналізу введені у розгляд динамічні та кінематичні характеристики зони пластичної течії металу. Показано, що на крутильні коливання валків і толчковий характер дії осередку деформування впливає кінематика зони обтіску. Випередження виконують роль демпфера, який змінює характер затухання динамічної взаємодії всієї механічної системи.

Ключові слова: нестационарна задача, взаємодія, затухаючі крутильні коливання, кінематика осередку деформування, крайові умови, випередження.

Рассматривается неустойчивый процесс прокатки в условиях непрерывного широкополосного стана. В линии главного привода возникают затухающие вращательные колебания. Изменяющее воздействие валков на очаг деформации приводит к изменению взаимодействия системы валок - полоса. Для анализа введены в рассмотрение динамические и кинематические характеристики зоны пластического течения металла. Показано, что крутильные колебания валков и толчковый характер воздействия очага деформации на полосу определяются кинематикой зоны обжатия. Опережение выполняет роль демпфера, изменяющее характер затухания динамического взаимодействия всей механической системы.

Ключевые слова: нестационарная задача, взаимодействие, затухающие крутильные колебания, кинематика очага деформации, крайевые условия, опережение.

An unsteady rolling process is considered in the context of a continuous broadband mill. In the main drive line, damped rotational oscillations appear. The changing effect of rolls on the deformation center leads to a change in the interaction of the roll-band system. For the analysis, dynamic and kinematic characteristics of the zone of plastic flow of a metal are introduced. The kinetic moment of the system takes into account the moment of the quantity of the system of the strip at the exit from the deformation center. The obtained equation of rotational oscillations of rolls depends, among other things, on the advance value in the deformation zone. The speed of the exit of the strip from the reduction zone is determined by the linear speed of the rolls and the advance parameters, which determines the mathematical relationship between the characteristics of rotational oscillations of the rolls and the kinematic parameters of the outgoing band. It is shown that during the period of metal capture by rollers, the torsional oscillations of the rolls and the jogging nature of the deformation effect on the front outer zone of the strip are determined by the kinematics of the deformation center. Anticipation acts as a damper, which changes the nature of the damping of the dynamic interaction of the entire mechanical system.

Keywords: nonstationary problem, interaction, damped torsional oscillations, kinematics of the deformation focus, boundary conditions, advance.

Введение. В период захвата металла валками в главной линии стана возникают крутильные колебания, которые оказывают воздействие, на выходящую из очага деформации, внешнюю часть полосы. При этом возникает взаимодействие колеблющихся валков и металла в очаге деформации. Учет данного взаимодействия на динамические процессы в период захвата представляет не только теоретический, но и практический интерес. Кроме этого для оценки динамических процессов в упругой полосе за пределами очага деформации необходимо знать крайевые условия задачи, которые связаны с указанным выше взаимодействием.

Постановка задачи. Анализ литературных и экспериментальных данных показывает [1],[2], что вращательные колебания главной линии прокатного стана представляют собой затухающие вращательные колебания и могут быть представлены дифференциальным уравнением вида[3]

$$\ddot{\varphi} + 2b\dot{\varphi} + k^2\varphi = 0, \quad (1)$$

где b - параметр, учитывающий вязкое сопротивление среды; k - круговая частота колебаний механической системы. Решением (1) является уравнение затухающих вращательных колебаний главного привода, [2], т.е.

$$\varphi = \exp(-bt) \cdot (A \cdot \cos kt + B \cdot \sin kt) \quad (2)$$

Решение задачи. Для оценки взаимодействия валков и полосы в очаге деформации на динамику захвата необходимо совместно рассмотреть кинематические и динамические характеристики валка и прокатываемой полосы. Запишем теорему об изменении кинетического момента системы в скалярном виде, [2]

$$\frac{dL_x}{dt} = \sum_{k=1}^n M_{kx}, \quad (3)$$

L_x - проекция вектора кинетического момента системы на ось x ; M_{kx} - моменты сил относительно оси x . Кинетический момент системы

$$L_x = I_x \omega + m v_1 R,$$

где I_x - осевой момент инерции валка относительно оси x ; $m v_1 R$ - момент количества движения полосы на выходе из очага деформации. На выходе момент количества движения полосы равен

$$m \cdot v_1 \cdot R = m v_g \cdot (1 + S) \cdot R,$$

где v_g - окружная скорость валков; S - опережение при прокатке.

При установившемся движении

$$\frac{dL_x}{dt} = 0,$$

т.к. с течением времени момент количества движения полосы и угловая скорость не меняются.

Рассмотрим неустойчивый процесс прокатки. В этом случае, производная от кинетического момента системы по времени равна

$$\frac{dL_x}{dt} = I_x \cdot \frac{d\omega}{dt} + m \cdot \frac{dv_1}{dt} \cdot R.$$

Производная от скорости по времени

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{d[v_6 \cdot (1 + S')]}{dt} = \frac{dv_6}{dt} (1 + S') +$$

$$+ v_6 \frac{dS'}{dt} =$$

$$= R \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot (1 + S') + R \cdot \omega \cdot \frac{dS'}{dt}$$

Распишем выражение (3)

$$\begin{aligned} \frac{dL_x}{dt} &= I_x \cdot \frac{d\omega}{dt} + \\ &+ m \cdot R \cdot \left[R \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot (1 + S') + R \cdot \omega \cdot \frac{dS'}{dt} \right] = \\ &= -M_{np} - M_{yn} - M_c \end{aligned}$$

где M_{np} - момент прокатки; M_{yn} - момент сил

упругости; M_c - момент сил вязкого сопротивления;

S' - переменное опережение в очаге деформации во время заполнения его металлом. Принимается линейная зависимость его от времени, вида

$$S' = C \cdot S \cdot t = \frac{1}{\tau} \cdot S \cdot t.$$

При этом производная по времени будет величиной постоянной, т.е.

$$\frac{dS'}{dt} = C \cdot S = \frac{1}{\tau} \cdot S = Const.$$

Преобразуем последнее выражение

$$\begin{aligned} \frac{dL_x}{dt} &= \left[I_x + R \cdot (1 + S') \cdot m \cdot R \right] \frac{d\omega}{dt} + \\ &+ m \cdot R^2 \cdot \omega \cdot \frac{dS'}{dt} = -M_{np} - C_{yn} \cdot \varphi - \mu \cdot \frac{d\varphi}{dt} \end{aligned}$$

где μ - условный коэффициент вязкости среды; C_{yn} - коэффициент жесткости восстанавливающего момента. После приведения

$$\begin{aligned} I_{np} \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \left(m \cdot R^2 \cdot \frac{dS'}{dt} + \mu \right) \frac{d\varphi}{dt} + \\ + C_{yn} \cdot \varphi = -M_{np}, \end{aligned}$$

или

$$I_{np} \cdot \ddot{\varphi} + 2b' \cdot \dot{\varphi} + C_{yn} \cdot \varphi = -M_{np}, \quad (4)$$

$$\text{где } I_{np} = I_x + R \cdot (1 + S') \cdot m \cdot R,$$

$$2b' = m \cdot R^2 \cdot \frac{dS'}{dt} + \mu.$$

В окончательном виде уравнение (4)

$$\ddot{\varphi} + 2b \cdot \dot{\varphi} + k^2 \cdot \varphi = -\frac{M_{np}}{I_{np}}, \quad (5)$$

$$\text{где } 2b = \frac{2b'}{I_{np}}, \quad k^2 = \frac{C_{yn}}{I_{np}}$$

Сопоставляя (1) и (5) практически получаем один тип дифференциальных уравнений, в котором коэффициент b , учитывающий сопротивление среды, определяется опережением в очаге деформации. Отсюда следует влияние опережения на характер затухания вращательных колебаний привода.

Решение дифференциального уравнения (5) несколько отличается от решения уравнения (1), действительно

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2, \quad (6)$$

где φ_1 - решение однородного дифференциального уравнения (1); φ_2 - частное решение уравнения (5). При этом

$$\varphi_2 = Const. \quad (7)$$

Подставляет (7) в (5) имеем

$$k^2 \cdot \varphi_2 = -\frac{M_{np}}{I_{np}}, \text{ или } \varphi_2 = -\frac{M_{np}}{I_{np} \cdot k^2} = -\frac{M_{np}}{C_{yn}}.$$

С учетом последнего общее решение имеет вид

$$\varphi = \exp(-bt) \cdot (A \cdot \cos k \cdot t + B \cdot \sin k \cdot t) - \frac{M_{np}}{C_{yn}} \quad (8)$$

Выражение (8) описывает вращательные затухающие колебания главного привода рабочей клетки в период захвата металла валками, которые являются возмущением, передающиеся на упругую полосу в межклетьевом промежутке. Определим толчковый характер этого возмущения на полосу. Имеем скорость на выходе из очага деформации

$$v_1 = v_0 \cdot (1 + S)$$

или

$$\frac{u_1}{dt} = R \frac{d\varphi}{dt} (1 + S),$$

где u_1 - периодически изменяющееся во времени элементарное удлинение или укорочение полосы на выходе из очага деформации. После упрощений и интегрирования получим

$$u_1 = R\varphi \cdot (1 + S),$$

Подставляя (8), имеем

$$u_1 = R(1 + S) \left[\exp(-bt) (A \cos kt + B \sin kt) \right] - \frac{M_{np}}{C_{yn}} \quad (9)$$

Выражение (9) можно рассматривать, как граничное условие динамической задачи для упругой полосы в межклетьевом промежутке, и представляет собой нестационарное затухающее воздействие. При этом, постоянные интегрирования A, B определяются начальными условиями, которые должны быть заданы.

Если величину u_1 умножить на коэффициент жесткости для полосы, то получим периодически изменяющуюся силу упругости в полосе, определенную с учетом взаимодействия валков и прокатываемого металла в очаге деформации.

Действительно, переход от перемещения к силе в зоне упругости можно реализовать с помощью закона Гука.

Имеем согласно закону Гука

$$F_{yn} = u_1 \cdot C'_{yn} = C'_{yn} \cdot R(1 + S) \cdot \left[\exp(-bt) \cdot (A \cdot \cos kt + B \cdot \sin kt) - \frac{M_{np}}{C_{yn}} \right] \quad (10)$$

где C'_{yn} - коэффициент жесткости полосы. Изменяющиеся во времени напряжения, с учетом (10)

$$\sigma'_{yn} = \frac{F_{yn}}{W_{np}} = \frac{1}{b \cdot h} \cdot \left\{ C'_{yn} \cdot R(1 + S) \cdot \left[\exp(-bt) \cdot (A \cdot \cos kt + B \cdot \sin kt) - \frac{M_{np}}{C_{yn}} \right] \right\} \quad (11)$$

Выражения (9)...(11) позволяют учитывать кинематический и силовой характер воздействия на полосу в межклетьевом промежутке.

В выражении (9) определим постоянные интегрирования из начальных условий. Имеем

при $t = 0$, $u = u_0$, $\dot{u} = u_0$, где u_0 - начальное

положение точки, u_0 - начальная скорость точки.

Скорость движения точки

$$\dot{u} = R \cdot (1 + S) \cdot \exp(-bt) \cdot [(-b) \cdot (A \cdot \cos kt + B \cdot \sin kt) + k \cdot (-A \cdot \sin kt + B \cdot \cos kt)]$$

Подставляя начальные условия в (9) и последнее выражение, получим

$$A = \frac{u_0}{R \cdot (1 + S)} + \frac{M_{np}}{C_{yn}},$$

$$B = \frac{u_0 + b \cdot u_0}{R \cdot k \cdot (1 + S)} + \frac{M_{np} \cdot b}{C_{yn} \cdot k}. \quad (12)$$

Из выражений (12) видно, что постоянные интегрирования определяются не только начальными характеристиками движения, но и силовыми параметрами процесса.

Особенностью представленного решения является учет кинематики очага деформации на динамические процессы в период захвата металла валками. Анализ полученных выражений (9)...(11) показывает, что характер затухания вращательных

колебаний системы (b') зависит от опережения S . Следовательно, резерв сил трения в очаге деформации является своеобразным демпфером системы, способствующим снижению динамического воздействия на привод рабочей клетки.

Выводы

1. Проведен анализ влияния взаимодействия валков и прокатываемой полосы на динамические процессы в период захвата металла валками;

2. Вращательные колебания валков передаются на очаг деформации, который вызывает переменное удлинение полосы на выходе из зоны обжатия;

3. Толчковое воздействие при выходе полосы из очага деформации вызывает динамическое возмущение для части раската в межклетьевом промежутке;

4. Полученные результаты работы позволяют скорректировать математическую модель вращательных колебаний системы в период захвата металла валками.

Список литературы

1. Путники А.Ю. Вибродинамические процессы в в клетях ШПС 1680 / Путники А.Ю. // Обработка металлов давлением. Краматорск: ДГМА: - 2014. - №1(38) с.233–239.
2. Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звеньями //Кожевников С.Н./. - Киев: Изд-во АН УССР. - 1961. - с. 160.
3. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики /Тарг С.М.//. - М: Высшая школа. - 1998. - с. 409.

References (transliterated)

1. Putnoky A.Yu. Vybrodynamicheskye protsessy v v kletyakh ShPS 1680 / Putnoky A.Yu. // Obrabotka metallov davlenyem. Kramatorsk: DHMA: - 2014.- No 1(38) p. 233–239.
2. Kozhevnykov S.N. Dynamika mashyn s uprugymy zveniyami //Kozhevnykov S.N./. - Kyev: Yzd-vo AN USSR. - 1961. - p. 160.
3. Tarh S.M. Kratyky kurs teoretycheskoi mekhaniky /Tarh S.M.//. - : Moscow Vysshaia shkola. - 1998. - s. 409.

Поступила (received) 03.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделирование динамических процессов в период захвата металла / В.В. Чигиринский, А.Ю. Путники // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 77–80 – Библиогр.: 3 назви.– ISSN 2519-2671

Модельювання динамічних процесів в період захоплення металу / В.В. Чигиринський, А.Ю. Путники // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 77–80 – Библиогр.: 3 назви.– ISSN 2519-2671

Modeling of dynamic processes in the period of metal capture / V.V. Chigirinsky, A.Yu. Putnoky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 77–80. – Bibl.:3. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чигиринський Валерій Вікторович - доктор технічних наук, професор, професор Дніпровського державного технічного університету, м Кам'янське; 067 510-22-31; e-mail: val.chig1948@gmail.com.

Чигиринский Валерий Викторович - доктор технических наук, профессор, профессор Днепропетровского государственного технического университета, г. Каменское; 067-510-22-31; e-mail: val.chig1948@gmail.com.

Chigirinsky Valeriy Viktorovich - doctor of technical sciences, professor, professor of Dniprovsky state technical university, m Kam'yansk; 067 510-22-31; e-mail: val.chig1948@gmail.com.

Путники Олександр Юліусович - кандидат технічних наук, докторант Запорізького національного технічного університету, м. Запоріжжя, 050-341-99-85; e-mail: al.putnori@gmail.com.

Путники Александр Юлиусович - кандидат технических наук, докторант Запорожского национального технического университета, г. Запорожье; 050-341-99-85; e-mail: al.putnori@gmail.com.

Putnoki Alexander Juliusovich - candidate of technical sciences, doctoral student of Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye; 050-341-99-85; e-mail: al.putnori@gmail.com.