

А.Н. Савельев, Н.А. Локтева, В.С. Королев

Сибирский государственный индустриальный университет

ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОКАТНЫХ КЛЕТЕЙ, СВЯЗАННЫХ МЕЖДУ СОБОЙ ЧЕРЕЗ ПРОКАТЫВАЕМУЮ ПОЛОСУ

Динамические процессы в непрерывных прокатных станах, как правило, определяются характером технологических нагрузок в переходных зонах прокатки. В дальнейшем эти процессы распространяются на значительную часть стабильных участков технологического процесса, создавая тем самым дополнительные нагрузки на элементы привода машин [1, 2]. Поведение полосы в момент заполнения металлом очага деформации прокатного стана определяется соотношением скоростей полосы и прокатываемых валков [3], формой переднего конца полосы [4], влиянием соседних клетей [5]. В настоящей работе с учетом особенностей работы черновой группы прокатных клетей непрерывно-заготовочного стана (НЗС) разработаны динамическая и математическая модели поведения группы клетей.

Цель настоящей работы – оценка на основе разработанной модели силовых составляющих в элементах клетки при нормальном режиме ее работы.

Основой формирования математической модели выступает динамическая модель прокатной системы, которая является результатом реализации метода, описанного в работе [6], и представляет собой минимально-допустимый набор взаимосвязанных сосредоточенных масс

и жесткостей (рис. 1). Модель включает три клетки, динамические процессы которых влияют друг на друга через взаимосвязывающую их полосу. Степень взаимовлияния клетей экспериментально исследована в работе [5] и учтена в процессе формирования математической модели.

Основу математической модели составляет система дифференциальных уравнений, описывающая движения каждой из масс динамической модели:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_1}{dt} &= \dot{\varphi}_1; & \frac{d\dot{\varphi}_1}{dt} &= \frac{M_1}{I_1}; \\ \frac{d\varphi_2}{dt} &= \dot{\varphi}_2; & \frac{d\dot{\varphi}_2}{dt} &= \frac{M_2}{I_2}; \\ &\dots & \dots & \\ \frac{d\varphi_n}{dt} &= \dot{\varphi}_n; & \frac{d\dot{\varphi}_n}{dt} &= \frac{M_n}{I_n}, \end{aligned}$$

где φ , $\dot{\varphi}$ и $\ddot{\varphi}$ – угол поворота, угловая скорость и ускорение i -ой массы системы; M_i – суммарный момент внешних и внутренних сил, действующих на i -ую массу; I_i – момент инерции i -ой массы.

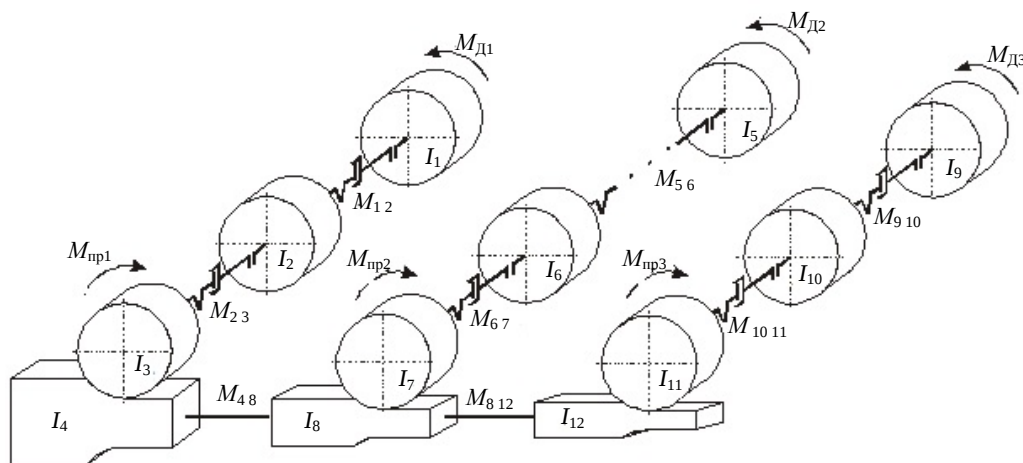


Рис. 1. Динамическая модель прокатной системы

Для решения уравнений математической модели разработаны программы расчета силовых и кинематических параметров процесса движения масс технологического оборудования во время обжатия металла валками в каждой из трех клетей непрерывно-заготовочного стана. Интегрирование дифференциальных уравнений в расчете осуществлено по методу Рунге-Кутты; в данном случае для расчета использовали прикладные программы из библиотеки. Силовые составляющие дифференциальных уравнений включают моменты в упругих связях, моменты прокатки и моменты от электродвигателей клетей.

В динамической модели массы соединены между собой упругими связями с зазорами Δ_{ij} и демпферами, коэффициент демпфирования g . Реакция связи между массами модели определяется по формуле

$$M_{ij} = g(\dot{\varphi}_j - \dot{\varphi}_i) + m_{ij};$$

здесь

$$m_{ij} = \begin{cases} c_{ij}(\varphi_j - \varphi_i + \Delta_{ij}) & \text{при } (\varphi_j - \varphi_i) < -\Delta_{ij}; \\ 0 & \text{при } -\Delta_{ij} < (\varphi_j - \varphi_i) < 0; \\ c_{ij}(\varphi_j - \varphi_i) & \text{при } (\varphi_j - \varphi_i) > 0, \end{cases}$$

g – коэффициент эквивалентного вязкого демпфирования в упругих связях; φ_i и $\dot{\varphi}_i$ – перемещение и скорость поворота i -ой массы системы; c_{ij} – жесткость упругой связи; Δ_{ij} – зазор в упругой связи.

Усилие в связи между участками прокатываемого металла M_{48} M_{812} описывается этим же уравнением с соответствующими нагретому металлу параметрами, где зазор в связях отсутствует. Моменты двигателей прокатных клетей постоянного тока определяются в модели по следующей формуле:

$$M_{дв} = C_m \left(u - C_e \frac{30}{\pi \dot{\varphi}_q} \right) / R_s,$$

где C_m , C_e – постоянные машины; u – напряжение на якоре двигателя; R_s – сопротивление якоря двигателя.

Момент прокатки зависит от соотношения скоростей металла и валков в зоне их контакта. Если скольжение валков по металлу отсутствует, то момент прокатки находится по зависимости

$$M_{пр} = M_0 = 2l_p \psi_\phi \sqrt{\Delta h R B}, \quad (1)$$

где l_ϕ – длина очага деформации; p_ϕ – удельное давление металла на валки; ψ_ϕ – коэффициент приложения равнодействующей усилия прокатки; B – ширина полосы.

Если наблюдается проскальзывание валков по раскату, то это учитывается при расчете момента прокатки следующим образом:

$$M_{пр} = 2l_\phi p_\phi \mu_\phi B R, \quad (2)$$

где μ_ϕ – коэффициент трения валков по металлу.

В процессе расчета моментов прокатки необходимо знать зависимости, по которым изменяются давление p_ϕ , коэффициент плеча приложения равнодействующей усилия прокатки ψ_ϕ , длина контакта металла с валками l_ϕ и коэффициент трения μ_ϕ . Характер нарастания момента на неустановившейся стадии прокатки тесно связан с закономерностью изменения коэффициента плеча приложения равнодействующей усилия прокатки. В процессе захвата металла валками коэффициент ψ_ϕ изменяется от величины $R \cos \alpha_3 / \sqrt{\Delta h R}$ до его значения в стационарной стадии прокатки. Характер изменения этого коэффициента нелинейный. В работах [9, 10] при анализе нарастания момента и усилия в неустановившейся стадии прокатки сделан вывод, что коэффициент должен отображаться монотонно убывающей функцией с резким уменьшением в первый момент заполнения очага деформации и с плавным насыщением при переходе к стационарной стадии. Рассмотренные в работах [9, 10] данные по изменению коэффициента ψ_ϕ при захвате металла валками получены только для прямоугольной полосы. В реальной ситуации металл, задаваемый в валки клетей НЗС, имеет форму, напоминающую клин. Для учета особенностей формы переднего конца полосы, поступающей на НЗС и передаваемой из клетки в клетку, в настоящей работе используется понятие клиновидности переднего конца полосы [1], которая описывается с помощью коэффициентов клиновидности переднего конца полосы (рис. 2). Коэффициент изменения плеча равнодействующей для клинообразного конца полосы (так же, как и для прямоугольного) изменяется от значения $R \cos \alpha_3 / \sqrt{\Delta h R}$ до его значения в стационарной стадии. Поэтому, приняв за основу формулу из работы [8] и введя в нее коэффициенты, учитывающие форму переднего конца полосы, получена зависимость следующего вида:

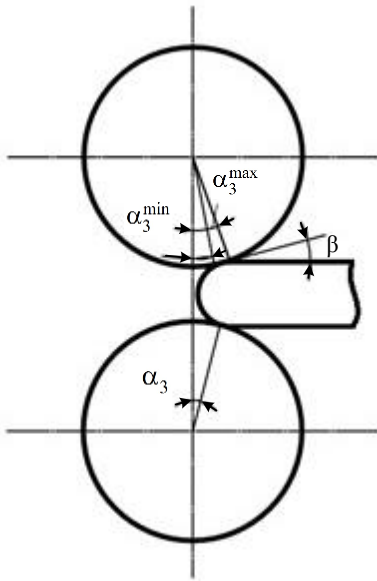


Рис. 2. Углы контакта клиновидного конца полосы с валками прокатной клетки:

α_3 – начальный угол контакта металла с валками; $\alpha_3^{\min}$ и $\alpha_3^{\max}$ – минимальный и максимальный угол контакта полосы с валками; β – угол клиновидности переднего конца полосы

$$\psi_\varphi = K_4 - (K_4 - \psi_{cr})(1 - \exp \left[(-10^{-3} \varphi R [1,5 + 4(K_5 - K_2)] / \alpha_3^{\max} \right])$$

где $K_4 = \alpha_3 / \alpha_3^{\max}$; $K_5 = (\alpha_3^{\max} - \alpha_3^{\min}) / \alpha_3$; $K_2 = \sin \beta$; $\psi_{cr} = 0,790 - 0,887 l / H_{cp} + 0,444 (l / H_{cp})^2$.

При захвате металла валками усилие прокатки возрастает как за счет увеличения площади контакта металла с валками, так и за счет изменения давления, которое меняется в пределах зоны неустановившегося давления $l_{нд}$. Для определения давления, как показал выполненный в работе [7] сравнительный анализ существующих зависимостей, лучше всего подходит формула $l_{нд} = l + 0,32H_0$, где H_0 – начальная высота раската. В момент захвата на участке зоны неустановившегося процесса проката давление изменяется от нуля до значения, соответствующего установившемуся процессу прокатки. Характер изменения давления имеет нелинейную форму и с учетом формы переднего конца полосы хорошо описывается экспоненциальной зависимостью [8]

$$p_\varphi = p_0 [1 - \exp(-2,1\varphi R / (K_3 l + 0,32H_0))],$$

где $K_3 = (\alpha_3 - \alpha_3^{\min}) / 2$; φR – координата перемещения полосы, выраженная через угол по-

ворота валков (углы контакта металла при захвате его валками показаны на рис. 2).

В процессе захвата металла валками коэффициент трения зависит от скорости относительного скольжения контактирующих поверхностей. В большинстве работ [11 – 14] определяется влияние на коэффициент трения не скорости относительного скольжения, а скорости вращения валков. Тем не менее в этих работах опыты поставлены таким образом, что скорость вращения валков или равняется скорости относительного скольжения, или легко определяется. По экспериментальным данным [9, 11 – 14] при усреднении результатов, полученных разными авторами, по минимуму получена зависимость

$$\mu_\varphi = \mu_0 e^{-0,00025(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0)R} - \left(\mu_0 \frac{\psi_\varphi - l_\varphi}{R} \right) \frac{2}{\pi} \times \arctg \left[\frac{(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0)R}{0,1} \right],$$

где μ_0 – коэффициент трения, соответствующий нулевому скольжению валков по металлу; $(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0)R$ – относительное скольжение валков по металлу.

При этом было учтено [13], что при приближении рассогласования скоростей к нулю коэффициент трения, а также и моменты на валках стремятся к значениям состояния, когда проскальзывания металла по валкам нет. Значения моментов в этом случае приближаются и, в конечном итоге, становятся равными моменту прокатки M_0 , определяемому по формуле (1). Из сравнения уравнений моментов (1) и (2) вытекает, что коэффициент трения в случае, когда скорость скольжения равна нулю, определяется как $\mu_0 = \psi_\varphi \sqrt{\Delta h R} / R$.

Форма переднего конца полосы влияет и на площадь контакта металла с валками. В зависимости от вида передней части полосы характер нарастания площадки контакта металла с валками по мере его перемещения в зону деформации, найденный графическим построением, описан математически следующей формулой:

$$l_\varphi = l_0 (1 - \exp - \varphi_0 / \alpha_3^{\max} [1,78 + 6(K_1 - K_2)]) ,$$

где $K_1 = (\alpha_3^{\max} - \alpha_3^{\min}) / (\alpha_3 + \alpha_3^{\min} / 2)$.

Таким образом, в результате экспериментально-теоретических изысканий получены все необходимые зависимости для определения

средних характеристик нагружения клеток НЗС при прокатке.

Пример расчета процесса прокатки в клетях НЗС показан на рис. 3. В качестве исходных

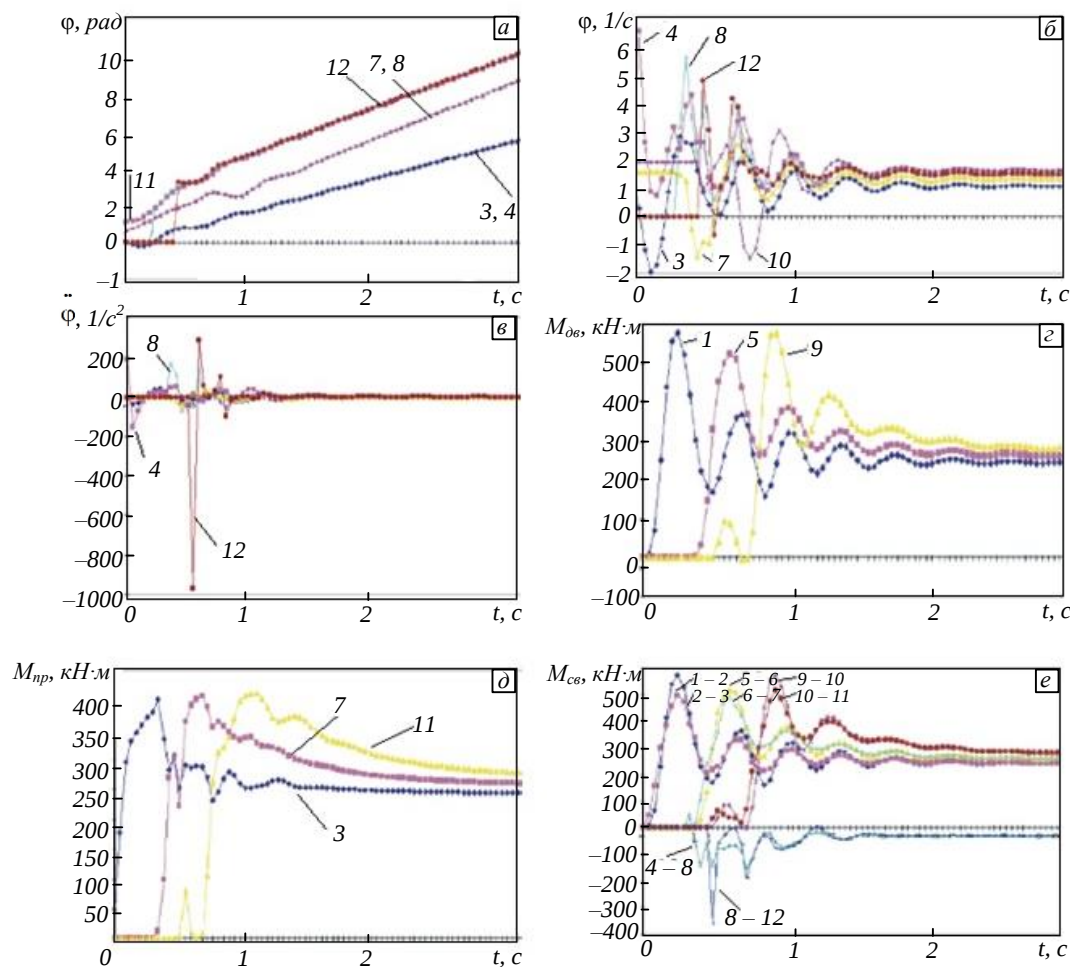


Рис. 3. Силовые, кинематические и динамические характеристики процесса прокатки в клетях В, 2, 3 непрерывно-заготовочного стана:

a – перемещение масс модели (массы обозначены на рис. 1); *б* – скорости масс; *в* – ускорения масс; *г* – моменты двигателей; *д* – моменты прокатки; *е* – моменты в связях

данных для расчета были приняты следующие значения: $I_1 = 3,2 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $I_2 = 2,0 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $I_3 = 2,8 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $I_4 = 0,33 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $I_5 = 3,2 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $I_6 = 2,1 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $I_7 = 2,7 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $I_8 = 0,36 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $I_9 = 3,5 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $I_{10} = 2,2 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $I_{11} = 3,1 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $I_{12} = 0,36 \text{ т} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $C_{1\ 2} = 27500 \text{ кН} \cdot \text{м/рад}$; $C_{2\ 3} = 22000 \text{ кН} \cdot \text{м/рад}$; $C_{5\ 6} = 23000 \text{ кН} \cdot \text{м/рад}$; $C_{6\ 7} = 26000 \text{ кН} \cdot \text{м/рад}$; $C_{9\ 10} = 27000 \text{ кН} \cdot \text{м/рад}$; $C_{10\ 11} = 25000 \text{ кН} \cdot \text{м/рад}$; $C_{4\ 8} = 26000 \text{ кН} \cdot \text{м/рад}$; $C_{8\ 12} = 22000 \text{ кН} \cdot \text{м/рад}$.

Рассчитанные кинематические динамические и силовые характеристики процесса прокатки металла в трех двухвалковых клетях непрерывно-заготовочного стана 850 показаны на рис. 3. Поочередный процесс захвата металла валками каждой из клеток сопровождается интенсивным динамическим процессом, охватывающим все элементы привода. Динамические процессы возникают и в электродвигателе (рис. 3, *г*), и во всех элементах переда-

точного механизма стана (рис. 3, *е*), и во время обжатия металла валками (рис. 3, *д*). При этом динамические процессы в первой клетке накладываются на процессы захвата металла валками во второй клетке и остаются динамически активными при вхождении металла в зону деформации третьей клетки. В конечном итоге все три главных привода последовательно расположенных клеток оказывают взаимное влияние друг на друга, синхронизируя динамические нагрузки в элементах всех трех клеток (рис. 3, *г*, *е*). Нужно отметить, что в колебательных процессах в клетях, расположенных перед захватывающей металл клетью, амплитуда колебаний быстро уменьшается. Уменьшение происходит настолько быстро, что колебательные процессы в третьей клетке практически не влияют на динамические процессы в первых клетях. Минимальная частота крутильных колебаний в главных линиях клеток

соответствует частоте порядка 3 – 4 Гц и определяется параметрами трехклетевой системы в целом. Крутящие моменты, возникающие при этом в элементах системы, превышают статические нагрузки в 1,4 – 1,6 раза. Явных ударных нагрузок в зазорах приводов клеток в рассматриваемом примере моделирования динамических процессов не наблюдается.

Таким образом, в результате моделирования процесса работы трехклетевой системы непрерывного прокатного стана, связанной между собой прокатываемой полосой, разработан инструментарий, позволяющий исследовать влияние различных факторов прокатной системы на протекающие в ней динамические процессы. На примере показано, что при захвате металла каждой из клеток в их главных линиях возникают значительные по величине динамические процессы. Динамические колебания передаются через металл на соседние клетки со значительным уменьшением их амплитуды. Передача колебательного процесса через клетку на третью клетку практически незначима, что позволяет не принимать их в расчет при формировании непрерывных прокатных станов. Наибольшие крутящие моменты в приводе прокатных валков станов возникают в момент заполнения металлом зоны деформации между валками одной из клеток, по значению они могут превышать статические нагрузки до 1,6 раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев А.Н., Воскресенский В.А. Динамика в главной линии при захвате клиновидного слитка // Изв. вуз. Черная металлургия. 1975. № 10. С. 92 – 95.
2. Савельев А.Н., Савельев А.Н. The study of dynamics of a moving strip in the steady state of rolling // Steel in the USSR. 1982. № 10. С.
3. Савельев А.Н., Воскресенский В.А., Перетягко В.Н. Исследование процесса захвата металла валками. – В кн.: Сб. трудов кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением» Омского политехнического института. – Омск: изд. ОПИ, 1975. С. 152 – 157.
4. Савельев А.Н., Воскресенский В.А., Перетягко В.Н., Широков В.Н. Исследование процесса захвата клиновидных слитков. – В кн.: Сб. трудов кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением» Омского политехнического института. – Омск: изд. ОПИ, 1975. С. 158 – 163.
5. Савельев А.Н., Савельев А.Н., Киринос А.М. Изменение динамической составляющей нагрузок в приводах клеток непрерывно-заготовочного стана // Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 12. С. 135 – 137.
6. Савельев А.Н., Локтева Н.А., Бич Т.А. Особенности операций по разработке метода формирования динамической модели при определении нагруженности элементов машин: учеб. пособие. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016. – 175 с.
7. Воскресенский В.А., Киринос А.М. Влияние скорости прокатки на распределение давлений во внешних зонах высоких полос. – В кн.: Исследование и расчет металлургического оборудования: сб. науч. трудов. – Новокузнецк: изд. СМИ, 1971. С. 97 – 102.
8. Савельев А.Н., Ступаков М.И. Определение динамических нагрузок в технологическом оборудовании. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 1995. – 110 с.
9. Статистический анализ и математическое моделирование блюминга / С.Л. Коцарь, В.Н. Поляков, Ю.Г. Макаров, В.А. Чичигин. – М.: Металлургия, 1974. – 280 с.
10. Грудев А.П., Брусенков И., Шломчак Г.Г. Контактные напряжения при захвате полосы валками // Обработка металлов давлением. 1972. № 58. С. 231 – 235.
11. Tofel W., Schneider E. Creifen Von Wolaen Dei weronderlicher Walegeschwindigkeit // Stahl und Eisen. 1924. № 12.
12. Макаев С.В. К вопросу захвата металла валками блюминга // Сталь. 1956. № 12. С. 1084 – 1094.
13. Куприн М.И. Влияние скорости скольжения на величину коэффициента трения при горячей прокатке. – В кн.: Сборник научных трудов. – Магнитогорск: изд. Магнитогорского горно-металлургического ин-та, 1957. Вып. 11. С.
14. Фон Кортцфляйт. Производственные исследования условий захвата и установившегося процесса при прокатке блюмов на реверсивном стане // Черные металлы. 1967. № 8. С. 11 – 20.

© 2017 г. А.Н. Савельев,
Н.А. Локтева, В.С. Королев
Поступила 13 апреля 2017 г.