

Н.И.Подобедов, А.М. Юнаков, В.В. Коренной

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАХВАТА ЗАГОТОВКИ ПРОКАТНЫМИ ВАЛКАМИ

Изложен вариант моделирования переходного процесса прокатки с учётом взаимодействия прокатываемого металла, валков и привода, позволяющий при заданном обжатии, скорости заготовки исследовать динамику захвата и пробуксовки заготовки.

Состояние вопроса

При моделировании линии привода прокатной клетки с целью исследования динамических процессов в передаточных звеньях технологическая нагрузка (момент и усилие прокатки) принимались заданными, определёнными по данным теории прокатки для установившегося процесса и представляемые в моделях постоянными величинами, либо пропорционально или экспоненциально зависимыми от времени захвата [1,2]. Подобное задание технологических нагрузок, априори гарантирующий захват металла, целесообразно при исследовании динамической реакции передаточных звеньев линии главного привода на приложение усилия прокатки. Однако, при анализе условий захвата металла валками и реакции линии привода на ударное взаимодействие металла и валков возникает необходимость в формировании технологического сопротивления, как результата взаимодействия металла, прокатных валков и их привода. В таком случае модель должна предусматривать не только механику взаимодействия валков и металла, но и влияние этого взаимодействия на деформацию металла. Такой общий подход расширяет возможности моделирования процесса захвата и деформации металла вне зависимости от сортамента. Если блюмс или сляб обладают массой, которую надо учитывать при захвате валками, то кинетической энергией тонкой полосы тоже нельзя пренебрегать при захвате.

Описание динамического взаимодействия в механической системе «заготовка–валки» предложено в [3], но при этом не учитывается вертикальное смещение валков. Метод совмещения вертикального перемещения и вращения валков, от которого зависит изменение технологического момента без учёта влияния массы прокатываемого металла [4,5,6] тоже не даёт инструмента для исследования особых случаев прокатки.

Отсутствие единого представления процесса захвата можно объяснить, во–первых, частичным учётом всех параметров и масс взаимодействующих механических элементов, создающих условия деформации и перемещения металла. Во–вторых, технологическое сопротивление задаётся, а не формируется в процессе взаимодействия трёх основных элементов – заготовки, валков и их привода. Получается, что валки и привод играют роль не инструмента прокатки, но служат пассивным комплексом меха-

низмов, лишь силовой реакцией привода отвечающих на активные технологические силы и не участвующие в их формировании. Иными словами, приложение момента прокатки – первично, а реакция валков и привода – вторично. В–третьих, существующее представление о формировании момента прокатки из условия силового равновесия в плоских сечениях [7,8] при относительном скольжении поверхностей металла и валков приводит к понятию нейтрального угла, который делит соприкасающиеся поверхности на два участка, на одном из которых металл отстаёт от валков, на другом – обгоняет и делит технологический момент сопротивления на два составляющих – движущий валки и тормозящий их. В таком случае не просматривается механизм передачи энергии от валков к металлу.

Один из подходов, более близкий к механике прокатки с точки зрения взаимодействия твёрдых тел, допускающий вовлечение поверхностей металла и валков в периодическую передачу энергии через силы поверхностного трения от валка к металлу изложен Марьютой А.Н [9]. Подобным квантованием энергии с периодическими срывами (пробуксовки) валков относительно металла объясняются колебания прокатных валков при захвате металла и в установившемся движении. Здесь рассматривается передача энергии через трение, не вдаваясь в природу возникновения сил сцепления и размеров площади распределённого контакта. При оценке перемещения и деформации металла распределение сил трения по дуге контакта используются известные эпюры сил давления, полученные экспериментальным путём [8], т.е. усилие прокатки также предполагается заданным, известным.

Исходные положения.

Механизм прокатки можно подразделить на два процесса:

- образование единой механической системы из трёх основных элементов – прокатных валков, заготовки и привода валков, силовое взаимодействие которых создают условие для деформации металла или отсутствие такового,
- непосредственный процесс деформации или проскальзывания металла в валках.

Эти два процесса взаимосвязаны и их нельзя разрывать.

Для изучения явления прокатки можно представить прокатный валок как колесо, катящееся по неровной пластической платформе. В отличие от свободного качения колеса ось валка имеет возможность перемещаться только в вертикальном направлении. Роль относительной горизонтальной составляющей перемещения оси валков играет продольное перемещение металла при условии отсутствия пробуксовки. Относительное смещение поверхностей металла и валков происходит в двух случаях – при обычном поверхностном скольжении (пробуксовка) металла с коэффициентом трения μ , когда сила трения, по закону Кулона – Амонтона

$$F_{TP} = \mu \cdot N + F_1$$

достигает значения трения покоя (первое слагаемое), дальнейшее же повышение давления приводит к деформации металла, когда он перемещается увлекаемый поверхностью валков силами трения, равными по величине внутренним силам трения вязкости. В данном случае происходит не пробуксовка, а проскальзывание.

Постановка задачи.

Представить взаимодействие валков с прокатываемым металлом с точки зрения механики качения колеса по пластической платформе. На основе данного подхода необходимо определить условие взаимодействия валков и металла в переходном режиме захвата и установившегося движения.

Метод решения задачи.

Основными элементами в приводимом описании являются клеть, как бесконечно большая масса, прокатные валки (с возможностью вертикального перемещения и вращения около собственной оси), деформируемый металл, привод же ограниченномассовым приведенным элементом $m_{дв}$, соединённым упругой вращательной связью M с валками.

Таким образом, комплекс взаимодействующих тел представляет собой четырёхмассовую механическую систему, которая включает два прокатных валка с общим моментом инерции $J_B = 2J_0$, к которому приложен момент M со стороны двигателя $J_{об}$, верхний валок массой m_B и заготовка массой m_3 , к которой приложено усилие F_0 от подающего рольганга и взаимная силовая реакция N между валками и заготовкой во время их совместного движения.

В предположении, что реакция N при качении валка по поверхности заготовки смещается по направлению качения [10] и приложена в точке А (рис.1), соответствующие уравнения, описывающие движение упомянутых масс, сведены к системе дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{M}_{\partial\partial} = -a \cdot M_{\partial\partial} + b \cdot (\omega_0 - \dot{\phi}_{\partial\partial}) \\ \ddot{\phi}_{\partial\partial} = (M_{\partial\partial} - M) / J_{\partial\partial} \\ \dot{\phi} = (M - 2 \cdot N \cdot R \cdot \mu) / J_B \\ \dot{M} = C \cdot (\dot{\phi}_{\partial\partial} - \dot{\phi}) \\ \ddot{x} = (F_0 - 2 \cdot N_X) / m_3 \\ \ddot{y} = (N \cdot (\mu \cdot \cos \gamma + \sin \gamma) - P) / m_B \\ \dot{N} = C_n \cdot (\dot{x} \cdot \cos \gamma - \dot{y} \cdot \sin \gamma) \\ \dot{P} = C_{кл} \cdot (\dot{y} + R \cdot \dot{\beta} \cdot \cos \gamma - \Delta y) \\ \dot{\beta} = (M + N_X \cdot R \cdot \sin \gamma - P \cdot R \cdot \cos \gamma) / J \\ N_X = N \cdot (\cos \gamma - \mu \cdot \sin \gamma) \end{array} \right. \quad (1)$$

где: a, b – характеристики двигателя постоянного тока; ω_0 – заданная рабочая скорость двигателя; β – угол вращения валка относительно точки А; x, y – горизонтальное перемещение заготовки и вертикаль-

ное верхнего вала; C , C_m , $C_{кл}$ – жёсткости крутильной связи, полосы и нажимных винтов.

$$\sin \gamma = (y - 0,5 H_0) / R,$$

H_0 – толщина заготовки перед валками; $J = m_{\kappa} R^2 + J_0$ – момент инерции верхнего вала относительно точки A; R – радиус валков; $\Delta y = R \Delta \omega \cos \gamma$ – скорость перемещения верхнего вала за счёт деформации металла при выполнении условия прокатки, которое будет изложено ниже;

$\dot{S} = \Delta \omega = \dot{\varphi} - \dot{\beta}$ – скорость проскальзывания валков относительно металла или скорость изменения длины дуги ABC (рис. 1б); μ – коэффициент трения между поверхностями валков и заготовки, принимающее положительное значение при $\Delta \omega > 0$, в противном случае – отрицательное

«Качение» валков по поверхности металла без проскальзывания может быть осуществимо при равенстве углового ускорения β ускорению вращения валков φ , т.е. при выполнении условия:

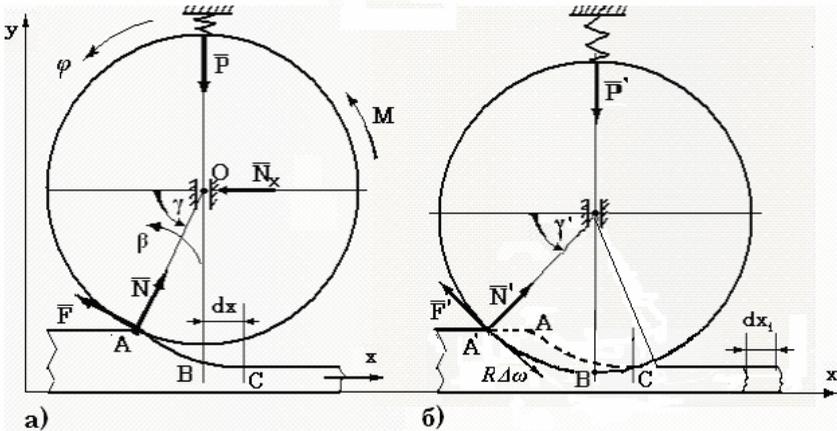


Рис 1. Расчётная схема захвата заготовки.

$$N = N_0 = \frac{k \cdot P \cdot \cos \gamma + (1 - k) \cdot M / R}{2 \cdot \mu + k \cdot (0,5 \cdot \sin 2\gamma - \mu \cdot \sin^2 \gamma)}, \quad (2)$$

где: $k = 0,5(1 + m_e \cdot R^2 / J_0)$.

Очевидно, при значении реакции

$$N < N_0 > 0 \quad (3)$$

будет происходить поверхностная пробуксовка. С другой стороны, условие:

$$N \geq N_0 > 0 \quad (4)$$

приводит либо к заклиниванию, либо перемещению вала по заготовке (рис.1,а), либо деформации заготовки (рис.1,б), т.е. собственно прокатки. В последнем случае в предположении, что сила сцепления между валком

и поверхностью металла превышает силы внутреннего трения, происходит втягивание слоёв металла в очаг деформации. Определим, при каких условиях происходит данный процесс.

Допустим, перемещение частиц прокатываемого металла происходит послойно, как при ламинарном течении жидкости, а связь между слоями передаётся через силы внутреннего трения $F_{\text{вн}}$, например, пропорциональной относительной скорости слоёв и записанной в дифференциальной форме [11]:

$$F_{\text{вн}} = \eta \cdot \frac{dV}{dr} S \quad (5)$$

где dV – относительная скорость слоя, соприкасающаяся площадь которой – S , расстояние между этими слоями – dr , η – коэффициент динамической вязкости.

Иная запись выражения (5) через тангенциальное напряжение и скорость изменения сдвига [12]:

$$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (6)$$

Тангенциальное усилие, ведущее к сдвигу слоя металла, можно определить из (6) при известной площади контакта по дуге ABC (рис. 1б) длиной S и скорости изменения углового сдвига $\Delta\omega$, т.е.:

$$F_{\text{ГР}} = S \cdot \tau = S \cdot \eta \cdot \Delta\omega. \quad (8)$$

За счёт снятия слоя металла скорость опускания верхнего вала приблизительно равна:

$$\Delta y = R \Delta\omega \cos \gamma \quad (9)$$

Точка А при этом перемещается влево, а часть деформируемого металла на выходе удлиняется на dx_1 . Это частичное удлинение, тождественное площади части сегмента AA^1BC^1 , происходит за счёт деформационного сдвига (рис.1,б), тогда как перемещение dx (рис.1,а) предполагает вертикальное смещение вала и качение его по металлу без проскальзывания. Причём в последнем случае длина дуги $S = 0$. Таким образом, качение без деформационного проскальзывания продолжается до тех пор, пока усилие поджатия P или давление N не достигнет значения:

$$N > N_{\text{ГР}} = F_{\text{ГР}} / \mu, \quad (11)$$

при котором возможна прокатка.

С увеличением дуги контакта ABC увеличивается предельная деформирующая сила $F_{\text{ГР}}$ (8), сила давления P уменьшается. Следовательно, давление N приближается к значению N_0 , когда происходит качение без скольжения и процесс повторяется.

Анализ решений

Для проверки реальности процесса прокатки, описанного математической моделью (1), в качестве примера были взяты параметры для клетки ДУО широкополосного стана 1680 и сляба, исходная толщина которого

составляет 168 мм, масса 10 тонн, а угловая рабочая скорость валков – 3 рад/сек. Скорость задачи заготовки в валки в 10 раз меньше окружной скорости прокатных валков. Усилие со стороны подающего рольганга не учитывалось.

На рис. 2 приведены результаты для обжатия в 30 мм. Удар заготовки о валки закручивает валопровод в обратную сторону. Происходит динамический захват и частичная прокатка до угла контакта в 0,01 радиан. Однако величина движущего момента M недостаточна для дальнейшего продвижения и прокатки заготовки, в результате чего происходит остановка заготовки при сохранении контакта между заготовкой и валком, т.е. наблюдается пробуксовка. При пробуксовке валков относительно заготовки линия привода находится в напряжённом состоянии, обусловленном реакцией контакта N .

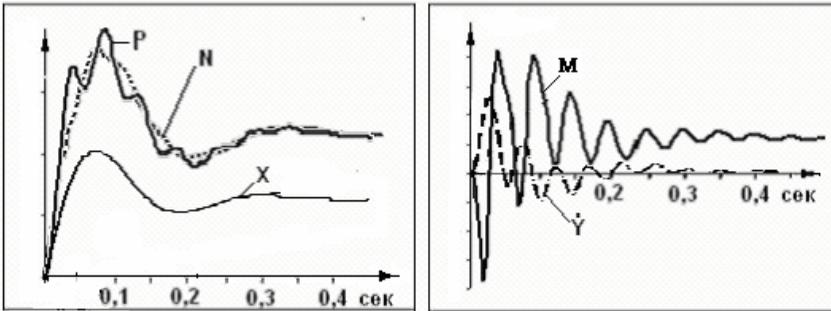


Рис.2. Реакция связи N , усилие в нажимных винтах P , перемещение X , вертикальная скорость валка Y и момент M при обжатии заготовки в 30мм.

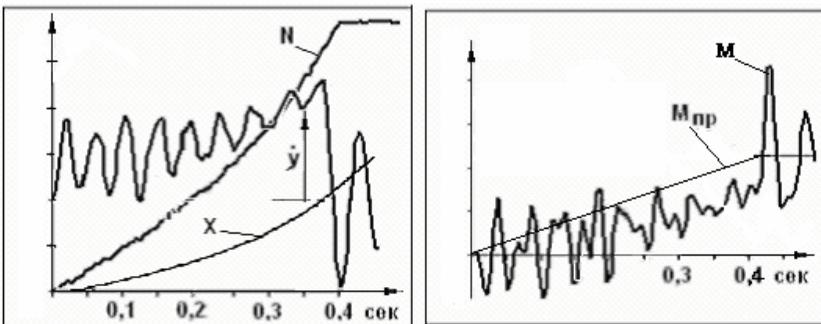


Рис.3. Реакция N , вертикальная скорость верхнего валка, перемещение заготовки X , и момент M при обжатии в 10 мм.

Захват осуществим, если обжатие снизить до 10 мм (рис. 3). Превышение максимальной амплитуды момента M над установившимся значе-

нием прокатки $M_{пр}$ двукратное. Усилие P в нажимных винтах практически повторяет по форме реакцию N . Если нет прокатки, т.е. при $\Delta\omega=0$, то дальнейшее перемещение заготовки ведёт к увеличению N , а, следовательно, и росту момента сопротивления на прокатных валках. При заполнении угла захвата и формирование соответствующего момента прокатки $M_{пр}$ наблюдается периодическое проскальзывание валка относительно поверхности металла, что вызывает автоколебания на моменте M и вертикальной скорости валка (рис. 3).

Данный пример иллюстрирует качественную картину процесса захвата заготовки, и возможность предлагаемого упрощённого варианта моделирования захвата металла с учётом инерции линии привода, участвующей в процессе прокатки в переходный период.

Следует учесть, что в излагаемом подходе предполагается неразрывный контакт между поверхностями металла и валков, как необходимое условие прокатки. От поверхности металла сила взаимодействия передаётся силами внутреннего трения вязкости на всё поперечное сечение деформируемой кромки заготовки. В этой связи надо отметить, что если сила внутреннего трения (5) передаётся постоянной от слоя к слою металла, то относительная скорость dV слоёв падает пропорционально расстоянию от поверхности валков. Этими причинами возможно объяснение отличия прокатки сляба от обжатия тонкой полосы. Ведь деформационное смещение металла при толстой заготовке резко падает к центру сечения, тогда как при тонком сечении продольная скорость деформации незначительно падает к середине сечения металла. Поэтому теория плоских сечений более оправдана для тонких полос, тогда как для толстых заготовок она не применима [13].

Представленный вариант комплексного взаимодействия рабочих валков и заготовки, её скорости, инерции взаимодействующих тел позволяет, в частности, при первом приближении определить динамические возможности линии привода при прокатке заданного сортамента.

Выводы

1. Предложена отличная от существующих версия модели прокатки металла, когда процесс прокатки представлен как качение цилиндра по пластической поверхности с периодическим проскальзыванием. Прокатка металла рассматривается, как один из видов скольжения валков относительно поверхности металла.

2. Захват металла валками и формирование момента технологического сопротивления представляется как результат взаимодействия прокатного оборудования и металла. Это позволяет рассматривать случаи пробуксовки валков относительно металла.

1. *Влияние зазоров на динамические характеристики главных линий клетей черновой группы НШСГП./ Мазур И.П., Барышев В.В. и др. // Вибрация машин. Измерение, снижение, защита. – Выпуск 1/ – 2005.*

2. *Кожевников С.Н.* Динамика нестационарных процессов в машинах. – Киев, Наукова думка, 1986.
3. *Смирнов В.В., Яковлев Р.Я.* Механика приводов прокатных станов. – М., Металлургия, 1977. – 216 с.
4. *Большаков В.И.* Влияние податливости прокатной клетки на нагрузки привода. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1999. – №4 – с.90–94.
5. *Большаков В.И.* Момент, действующий на валки при захвате листов. // *Листо-прокатное производство.* Выпуск №1, М.: «Металлургия».1972.–С.109–112.
6. *Скичко П.Я., Леена И.И.* Момент сил сопротивления при прокатке листов // *Металлургическая и горнорудная промышленность/* – №3. – 1970.–С.38–41.
7. *Целиков А.И., Гришков А.И.* Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1970.
8. *Грудев А.П.* Теория прокатки. – М. Металлургия, 1988.
9. *Марюта А.Н.* Фрикционные колебания в механических системах. – М.: «Недра», 1993.
10. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия. – М.: «Мир», 1989. – 509с.
11. *Кузьмичёв В.Е.* Законы и формулы физики. Справочник. –К.: Наукова думка, 1989.
12. *Хайкин С.Э.* Физические основы механики. – М.: «Наука», 1971. –750 с.
13. *Зильберг Ю.В.* О некоторых противоречиях и допущениях теории прокатки. *Известия высших учебных заведений. //Чёрная металлургия.* – № 11. –2004. – С.24–26.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. В.И. Большаковым.