УДК 621.771.06

ПОДОБЕДОВ Н. И., к.т.н., с.н.с.

Институт черной металлургии НАН Украины, г. Днепр, Украина

МЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВАЛКОВ С МЕТАЛЛОМ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ

При исследовании динамики захвата и выпуска проката в клети для описания процесса формирования технологической нагрузки сопротивления в очаге деформации используются уравнения А. И. Целикова [1, 2]. Основополагающие положения для вывода этих уравнений были изложены более сотни лет назад Т. Карманом на принципах силового и кинематического равновесия, т.е. из условий статики. Однако, прокатка - процесс динамический и клеть как активный инструмент обработки металла должна задавать закон взаимодействия заготовки и валков, как твёрдых тел и формировать усилие и момент прокатки в динамике. Но зачастую в современной литературе по продольной прокатке металл рассматривается как пластический материал, не давая проявлять себя как твёрдое тело. С позиции взаимодействия в замкнутой механической системе твёрдых тел металл-валки-привод усилие и момент прокатки всего лишь силовые реакции, внутренние силы данной системы. Ведь закономерность движения каждого из названных элементов системы определяются внешними силами – движущим моментом от привода и силами, приложенными к заготовке и валкам. Однако, из положений теории продольной прокатки следует, что валки и привод не являются активными инструментами деформации, а лишь пассивным комплексом механизмов силовой реакцией отвечающих на активные технологические силы прокатки. В принятой теории момент и усилие прокатки рассматриваются вне зависимости от динамических процессов их порождающих.

Начало прокатки в моделях динамики линии привода задаётся либо мгновенным приложением $M_{ст}$ к прокатным валкам, либо априори используют его значение в установившемся движении, распределённое по углу захвата α. В последнем случае момент или усилие прокатки определяется в зависимости от времени захвата по линейной или экспоненциальной зависимостям иногда с учётом вращения и вертикального перемещения валков [3-4]. Таким образом, технологическое сопротивление так или иначе задаётся, а не формируется в процессе взаимодействия трёх основных элементов – заготовки, валков и их привода. Величина момента прокатки в целом или по частям уже сформирована и задана как внешняя сила для замкнутой механической системы «валки-заготовка», а не как внутренняя сила для данной системы тел. Выходит, следствие идёт впереди причины – внешнее приложение момента прокатки провоцирует ответную реакцию привода валков и таким образом порождает видимость динамического процесса прокатки, т.е. псевдопрокатки.

В данной работе на основе опыта моделирования динамики многомассовых механических систем [5-6] рассматривается вариант изложения переходного процесса последовательного заполнения очага деформации с точки зрения взаимодействующих твёрдых тел, в число которых входит и прокатываемый металл, как равноправный элемент механической системы.

В настоящее время познание о процессе прокатки изобилует экспериментальными данными, которые иногда заменяют теоретические положения и расчёты теории прокатки как таковой. На основе принципов кинематического и силового равновесия взаимодействующих заготовки и прокатных валков рассматриваются процессы как в переходном периоде захвата и выброса металла, так и в установившемся режиме прокатки [1-4]. Такое положение делает теорию прокатки мёртвой, суживает возможности

исследования самой природы подвижной деформации. Например, представление о нейтральном угле в традиционной теории прокатки базируется на кинематической схеме равенства секундного расхода металла в любом сечении зоны деформации. Такое поверхностное объяснение (которого практически и нет) природы нейтрального сечения, да и то в установившемся режиме делает беспомощным моделирование переходного процесса захвата.

Подобный подход с позиций статики приемлем до тех пор, пока скорости прокатки относительно низкие, массы и размеры заготовок достаточно малы. При скоростях движения металла, соизмеримых со скоростью распространения деформации в металле возникают противоречия, которые требуют уточнения изначальных положений, учитывающих динамический характер прокатки. Неизвестно, например, как ведут себя валки при встрече с отклонениями на входной стороне клети при больших скоростях. Возможна ли мгновенная реакция такой системы, например, на пропуск шва при высокоскоростной прокатке, если время прохождения шва 0,01 сек., а период собственных вертикальных колебаний валков 0,03 сек. [7]? Ведь возмущение по скорости сравнимо со скоростью распространения деформационной волны в металле. Можно ли здесь говорить о почти мгновенном перемещении центра тяжести многотонной массы валков? Следует отметить, что некоторые взгляды прокатчиков обращаются в сторону динамического характера процесса прокатки. Так в работах [8, 9] продольная прокатка рассматривается как суперпозиция двух движений частиц металла – переносного движения полосы в валки и перемещение их в межвалковом зазоре в процессе деформации. Автор при этом пользуется принципом инверсии, т.е. рассматривает валок, как цилиндр, перемещающийся по неподвижной и деформируемой поверхности. Иными словами исследуется процесс качения цилиндра, испытывающего момент технологической нагрузки, который по существу можно интерпретировать как сопротивление качению цилиндрического тела по деформируемой поверхности (момент трения качения). Однако, сделав шаг вперёд, автор вновь остаётся в рамках силового равновесия движущегося металла и валков.

Современная схема определения сопротивления качению формально рассматривается как момент, формируемый силой реакции N, смещённой относительно нормали ОС на величину плеча μ (рис. 1, а), которое интерпретируется как коэффициент трения качения и находится экспериментально для каждой пары взаимодействующих тел, т.е. $M_{тр} = \mu N$. Аналогичную роль играет и технологическое усилие прокатки. В некоторых интерпретациях момента прокатки эта схема заложена, например, в формуле Баюкова и момент имеет как положительное, так и отрицательное значения (?). Таким образом, движущий момент при качении преодолевает неизвестную силу N, расположенную перед катящемся цилиндром, а мгновенное вращение цилиндра (валков) происходит около точки C (рис. 1, а) [8, 9].

Основной неточностью существующих динамических моделей взаимодействия металла и валков, по моему мнению является искусственное объединение независимых движений – вращение валков и их вертикальное перемещение Y – через очаг деформации, через усилие (или момент прокатки**).** Однако внешние силы приложены к двум разным инерционным массам – вращательному моменту инерции валков и массе валка в их продольном перемещении и в силу известного закона независимости действия сил эти два движения независимы, а, следовательно, могут быть не согласованы. Не всегда здесь прослеживается кинематическая связь между этими движениями, как это принято считать в теории прокатки. Однако, при определённой скорости движения металла встречающееся утолщение на нём, (например, шов) вызывает продольное перемещение валков, что иногда приводит к потере контакта между валком и металлом.

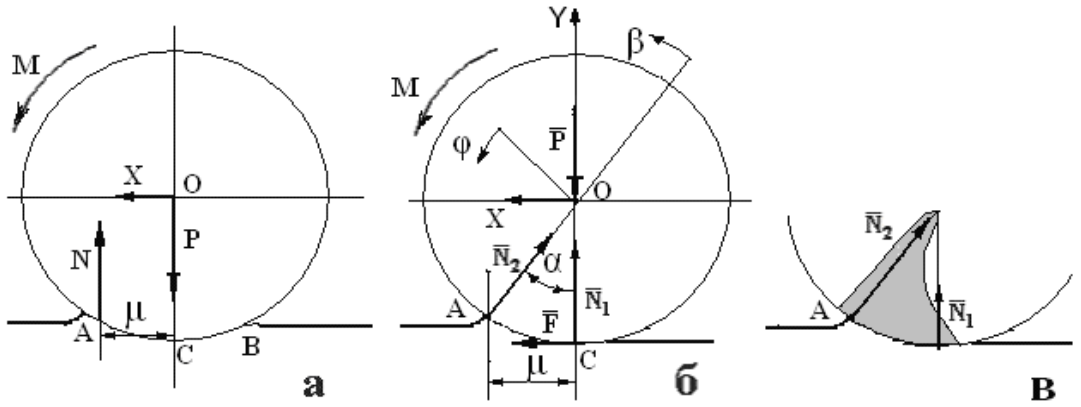

Рисунок 1 – Интерпретация сопротивления качению цилиндра

Во-вторых, из-за неопределённости во взаимодействии прокатываемого металла с валками нет границы между особенностями прокатки тонких (листа) и толстых (слябов, слитков) подкатов

С целью уточнения механики прокатки изначально рассмотрим взаимодействие двух тел – неподвижной поверхности (металла) и цилиндра (одного валка), к которому приложен движущий момент M, поворачивающий цилиндр на угол φ. При возникновении контакта с поверхностью возникают две реактивные силы – вращательная F и продольная N, направленная к центру вращения O, которые связывают два тела в динамическую систему и обеспечивают поступательное перемещение центра массы цилиндра O (рис. 1, б). Следовательно, цилиндр может участвовать в двух движениях – вращательном φ и поступательном X цилиндра O относительно поверхности. Последнее возможно только при вращении моментом M цилиндра около мгновенного центра вращения β относительно, например, точки A (рис. 1, б) и то при условии, что контактное усилие N по значению превышает некое предельное значение. Тогда от разницы вращений цилиндра относительно собственного центра $O - \varphi$ и около точки $A - \beta$ создаётся касательное усилие F. Следует отметить, что сопротивление качению не интерпретируется в данном случае действием неизвестной силы N (рис. 1, а), а вполне конкретной касательной F, порождаемой моментом M (рис. 1, б). На рис. 1,б в представлен период начала качения. Величины сил реакции со стороны поверхности N_1 и N_2 соответственно в точках C и A при дальнейшем повороте без проскальзывания изменяются и в конечном итоге совмещаются в точке A в силу N. Таким образом, внешние силовые воздействия – момент M и сила P порождают ответные силовые реакции – силу N, направленную к центру O и F – касательную к поверхности цилиндра. Однако, здесь, как и в случае реакции N (рис. 1, а) при определении сил сопротивления качению, неизвестна сила F (рис. 1, б).

Взаимодействие поверхности (заготовки, полосы, сляба) и цилиндра (валка) осуществляется двумя активными силами – продольной радиальной силой P и моментом M. В результате появляется продольная деформация в точке D от действия силы $N = P\cos(\alpha)$ (рис. 2, а) и сдвиговая F (рис. 2, б).

Следовательно процесс перемещения цилиндра по деформируемой поверхности можно разложить на три составляющие – внедрение (рис. 2, а), сдвиг (рис. 2, б) и качение (рис. 2, в), где перемещение интерпретируется как перемещение оси цилиндра O вдоль поверхности. Необходимо внести определённость в процесс взаимодействия цилиндра и деформируемой поверхности.

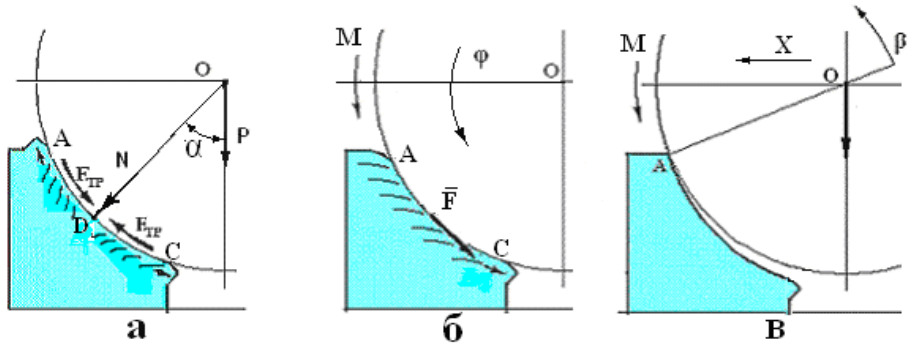

Рисунок 2 –Продольные и сдвиговые деформации цилиндра и опорной поверхности

Выделим слой *BACD* (рис. 3) деформируемой поверхности, прилегающей к поверхности цилиндра толщиной $dr = AB = CD$ и со стороной $AC = S/b$, где S – площадь контакта, b – ширина цилиндра.

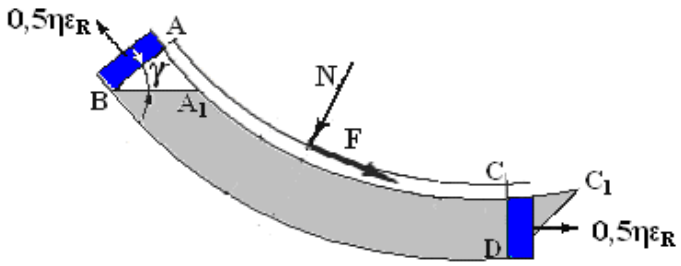

Рисунок 3 – Деформационное смещение слоя материала

Контур *BACD* деформируется в параллелограмм BA_1C_1D. Относительная деформация имеет две составляющие – тангенциальную $\varepsilon_т$ (сдвиг параллельно поверхности цилиндра рис. 2, б) и радиальную ε_R (вдоль радиуса цилиндра). По обобщённому закону Гука:

$$\varepsilon_R = \varepsilon_{R0} + \eta \cdot \varepsilon_{T0},$$
$$\varepsilon_T = \gamma = \varepsilon_{T0} \pm \eta \cdot \varepsilon_{R0},$$

где η – коэффициент Пуассона.

Относительное угловое смещение стороны параллелограмма AC при чистом сдвиге $\varepsilon_{T0} \approx \gamma \approx \dfrac{\tau}{2 \cdot G} = \dfrac{F}{2 \cdot S \cdot G}$, где G – модуль упругости при сдвиге. Относительное радиальное сжатие слоя от продольного усилия N – $\varepsilon_{R0} = \dfrac{N}{S \cdot E}$ Используя последние выражения и известную зависимость между модулями $G = 0{,}5 \cdot E / (1+\eta)$, получим относительные тангенциальную и радиальную деформации в зависимости от нормальной N и касательной F сил:

$$\varepsilon_R = \frac{F \cdot \mu \cdot (1+\eta) + N}{S \cdot E}, \qquad \varepsilon_T = \frac{F \cdot (1+\eta) \pm \mu \cdot N}{S \cdot E}, \tag{1}$$

Как видно из (1) влиянием касательной силы F на радиальную деформацию dr можно пренебречь, тогда как под влиянием радиальной силы N на площадь контакта на отрезке AC цилиндра и материала увеличивается на $\mu\ \varepsilon_{R0}$ как по направлению вращения цилиндра, так и против него (рис. 3). Этим можно объяснить образование зон отставания и опережения в теории прокатки, т.е. движением дополнительного слоя материала относительно переносного движения сдвига дуги AC, которое имеет линейную скорость поверхности цилиндра. Последнее интерпретируется, как «зона прилипания» или «нейтральный угол» (рис. 2, б).

На рис. 4 представлена схема взаимодействия части металла и цилиндра, где поверхность фигурирует как перемещаемый цилиндром слиток прямоугольной формы и массой $m_{\text{СЛ}}$.

Рассмотрим взаимодействия металла с цилиндром для двух случаев.

При $F > F_{\text{пр}}$, где $F_{\text{пр}} = f\,P$ – предельная сила поверхностного трения, f – коэффициент поверхностного трения между валком и опорной поверхностью – слитком. В этом случае контакт между поверхностями опоры (слитком) и цилиндра (валка) не нарушается, т.е. между поверхностями слитка и валка имеется сцепление и они движутся совместно около мгновенного центра вращения – точки A. Уравнение вращения валка около точки A:

$$J_{\text{пр}} \cdot \ddot{\beta} = M - R \cdot (\sin\alpha \cdot P + F), \tag{2}$$

где – $J_{\text{пр}} = J_0 + m_{\text{СЛ}}\,R^2$ – приведенный момент инерции валка относительно точки A с приведенной к ней массой слитка $m_{\text{СЛ}}$, J_0 – момент инерции цилиндра относительно собственной оси вращения O.

Так как центр валка не имеет продольного перемещения, то перемещается сама масса слитка – опорная поверхность.

Деформацию сдвига можно представить как разность между элементарным перемещением поверхности слитка $dx_{\text{сл}}$ и поворотом $d\beta$ цилиндра вокруг точки A. В результате элементарный угловой сдвиг $d\gamma$ (рис. 3) представим в виде:

$$d\gamma = d\beta - dX_{\text{СЛ}} \cdot \cos\delta / R, \tag{3}$$

где $\delta = \alpha – 0{,}5\ \theta$, $\theta = AC/R$ – угол деформации (рис. 4).

Аналогично элементарное радиальное смещение:

$$dr = dX_{\text{СЛ}} \cdot \sin\delta - dy \cdot \cos\delta, \tag{4}$$

где y – вертикальное перемещение оси цилиндра.

Делением элементарных смещений (3, 4) на дифференциал времени dt получим скорости углового деформационного смещения γ и радиальной деформации r. Таким образом, силы F и N будут определяться из дифференциальных уравнений относительно скоростей изменения сил:

$$\dot{F} = C_{\text{T}}\dot{\gamma}, \qquad \dot{N} = C_R\dot{r},$$

где $C_{\text{T}} = \dfrac{S \cdot E}{1+\mu}$ – жёсткость сдвига, $C_R = S \cdot E$ – контактная жёсткость металла.

Горизонтальное перемещение слитка $X_{\text{СЛ}}$ и y – вертикальное смещение валка определяются из системы уравнений:

$$m_{\text{СЛ}}\ddot{X}_{\text{СЛ}} = Q + F\cdot\cos\delta - N\cdot\sin\delta,$$

$$m_{\text{ц}}\ddot{y} = F\cdot\sin\delta + N\cdot\cos\delta - P, \qquad (5)$$

где $P = C_y \cdot y$, C_y – вертикальная сила и жёсткость опоры оси цилиндра.

Величина дуги деформации AC будет зависеть от скорости нормального перемещения центра O валка, т.е.

$$A\dot{C} = \dot{\sigma} = \eta\cdot\dot{r}.$$

В таком случае площадь поверхности контакта равна $S = \sigma\cdot b$.

Скорости движения частиц металла, прилегающих к поверхности валка:
в точке A:

$$\dot{\varphi}_A = \dot{\beta} + \dot{\gamma} - 0{,}5\cdot\dot{\sigma}/R, \qquad (6)$$

а в точке C, на выходе

$$\dot{\varphi}_C = \dot{\beta} + \dot{\gamma} + 0{,}5\cdot\dot{\sigma}/R. \qquad (7)$$

Таким образом, точка D является точкой приложения приведенной радиальной силы N (рис.4). В данном случае точка может определяться как нейтральный угол.

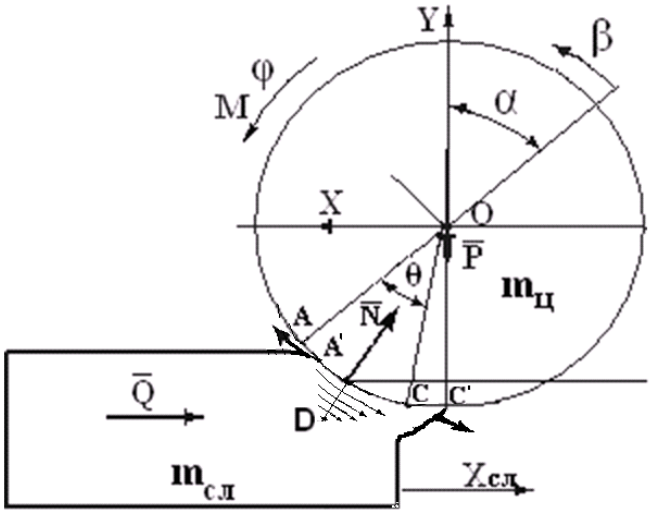

Рисунок 4 – Схема движения цилиндра вдоль деформируемой поверхности

I. При условии $F < F_{\text{пр}}$ перемещение механической системы описывается уравнениями:

$$J_0\cdot\ddot{\varphi} = M - F\cdot R,$$

$$m_{\text{СЛ}}\ddot{X}_{\text{СЛ}} = Q + F\cdot\cos\alpha - N\cdot\sin\alpha, \qquad (8)$$

$$J_{\text{ПР}}\cdot\ddot{\beta} = 0,$$

$$m_B\cdot\ddot{y} = 0,$$

где $F = N\cdot f$.

Таким образом, уравнения (2–8) описывают весь процесс прокатки - при переходном режиме уравнения (2–7), а при установившемся – (8). Для рассмотрения прокатки между двумя валками добавляются уравнения (2–8) для нижнего валка.

Краткое изложение сути содержания подхода к взаимодействию валков и металла не позволяет более подробно описывать модель переходных процессов прокатки.

Основная задача данного сообщения – концептуальное изложение возможного подхода к исследованию процесса прокатки, как динамического взаимодействия масс рабочего инструмента – валков и деформируемого металла.

Выводы. Обобщая изложенное, возможно сделать следующие выводы:

1. Механику взаимодействия прокатного валка и металла можно рассматривать как качение цилиндра по деформируемой поверхности.

2. Обосновано рассмотрение процесса подвижной деформации при продольной прокатке как сочетание трёх видов движений цилиндра по деформируемой поверхности – образование лунки от действия радиальной силы, сдвиг слоя металла и чистое качение – перекатывание через переднюю границу лунки. При определённых сочетаниях сил и свойств металла одна из перечисленных 3 составляющих движения может отсутствовать.

3. Показано, что силы поверхностного трения не влияют на момент и усилие сопротивления деформации, т.к. они противоположно направлены и компенсируются по величине.

4. Предложена интерпретация природы «нейтрального угла» деформирумого металла, имеющего скорость поверхности валка. Скорость сдвига является переносным движением частиц металла, а относительной – скорость пуассоновского перемещения металла от действия радиального усилия, коим можно объяснить отставание частиц металла перед и опережение после очага деформации.

5. Явление подвижной деформации в процессе перемещения валками металла имеют общую природу, как для полосы, так и для сляба или блюма. Подкат имеет разную массу и перемещение металла осуществляется только сдвиговой деформацией слоёв металла, о чём свидетельствуют наплывы на концах заготовок (зоны «затруднённой» деформации).

6. Перемещение металла осуществляется перекатыванием валка через переднюю точку А, которая является мгновенной осью вращения валка, что является отличительной особенностью данного подхода к описанию динамики продольной деформации металла. Это положение учитывает как продольное, так и вертикальное перемещение валка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
2. Грудев А. П. Теория прокатки. – М. : Металлургия, 1988. – 250 с.
3. Скичко П. Я., Леепа И. И. Момент сил сопротивления при прокатке листов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1970. – № 3. – С. 38–41.
4. Смирнов В. В., Яковлев Р. Я. Механика приводов прокатных станов. – М. : Металлургия, 1977. – 216 с.
5. Подобедов Н. И., Юнаков А. М., Коренной В. В. Моделирование захвата заготовки прокатными валками // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. – 2006. – № 13. – С. 115–122.
6. Подобедов Н. И., Коренной В. В. Моделирование захвата заготовки прокатными валками / Тезисы международной научно-технической конференции. – Запорожье, 2007.
7. Мазур В. Л., Мелешко В. И. и др. Прокатка металла со сварными соединениями. – М. : Металлургия, 1985. – 112 с.
8. Ноговицын А. В. Применение подвижной системы координат для описания процесса прокатки // Металлы. – 1989. – № 6. – С. 59–60.
9. Ноговицын А. В. К теории очага деформации при холодной прокатке // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. – 1992. – № 1. – С. 38–43.