

В.В.Веренев, В.И.Большаков, Н.И.Подобедов

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЗАХВАТА ПОЛОСЫ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В ПРИВОДЕ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ

При определённом сочетании скорости прокатки и частотных свойств линии главного привода в последней формируются максимальные динамические нагрузки, во многом обусловленные специфическим характером нарастания момента сил технологического сопротивления в период захвата полосы валками. Показано, что путём выбора скорости их можно существенно уменьшить.

Состояние вопроса

Скорость прокатки является одним из основных технологических факторов, влияющих на другие параметры прокатки, в частности, производительность стана, сопротивление деформации и коэффициент трения в очаге. Ее влияние на статические нагрузки (усилие и момент прокатки) достаточно хорошо исследовано в работах по теории прокатки. В то же время роль скорости в формировании динамических нагрузок в период захвата полосы валками во многом еще не выяснена. Распространено мнение, что чем больше скорость захвата, тем больше ударные нагрузки в линии привода. Есть данные по исследованию влияния рассогласования скорости подхода полосы $V_{\text{п}}$ к валкам и окружной скорости валков $V_{\text{в}}$. При $V_{\text{п}} > V_{\text{в}}$ во время удара полосы о валки происходит размыкание угловых зазоров в сочленении валок – шпиндель, что влечет за собой увеличение динамических нагрузок. В данном случае собственно скорость захвата не оказывает влияния на динамику: первичным и решающим возмущением является скорость подхода полосы к клетю, вторичным – зазор. С целью устранения этого явления предлагается выдерживать соотношение $V_{\text{п}} \leq V_{\text{в}} \cos(\alpha)$, где α – угол захвата полосы.

Во время натурных исследований на одноклетьевом стане 2800 полистной прокатки карточек из нержавеющей сталей было установлено, что при определённой скорости прокатки (захвата металла валками) момент сил упругости в линии главного привода достигает максимального значения и существенно нелинейно зависит от скорости [1–3]. Было также показано, что характер нарастания момента сил технологического сопротивления на валках в период заполнения очага деформации металлом имеет куполообразную форму. Его максимальную величину характеризовали коэффициентом превышения момента $K_{\text{с}}$, равным отношению максимального момента $M_{\text{сmax}}$ к моменту $M_{\text{суст}}$ в установившемся режиме прокатки $M_{\text{суст}}$: $K_{\text{с}} = M_{\text{сmax}} / M_{\text{суст}}$. Отмеченная зависимость реакции линии привода от скорости захвата полосы объяснялась совпадением по времени максимума момента $M_{\text{сmax}}$ и максимума первого пика момента сил упругости. В работе [2] было высказано мнение, что формирование куполообразного характера изменения момента на валках

и его влияние на динамические нагрузки в линии привода имеет место также на других станах.

Постановка задачи.

В листовых непрерывных станах холодной прокатки заправка полосы в клетки ведётся на сравнительно низкой (ползучей) скорости 0,2–1,3 м/с. Затем стан разгоняется до 15–25 м/с и более с периодическим снижением скорости до 3–6 м/с для прокатки участка полосы со сварным соединением. Несмотря на такую скорость заправки в линиях привода валков станов холодной прокатки при захвате полосы формируются динамические нагрузки, которые в некоторых клетях в 2–3 раза превышают нагрузку в установившемся режиме прокатки. Задача состоит в том, чтобы путём моделирования определить степень влияния скорости захвата полосы валками на динамические нагрузки с учётом отмеченной особенности изменения момента на валках. Необходимо также определить условия, при которых указанные параметры принимают максимальные значения.

Исходные положения.

Линию главного привода представили в виде двухмассовой электромеханической крутильной расчётной схемы с двигателем постоянного тока и одномассовой упругой системы клетки [3,4]. В такой системе на одну концевую массу (валки) действует момент сопротивления, на вторую – электромагнитный момент двигателя, на валковую систему – усилие прокатки.

Компьютерное моделирование выполнили применительно к пятиклетьевому полосовому стану 1700 холодной прокатки. В каждой клетке при постоянном обжатии изменяли в широких пределах скорость захвата полосы при условии, что скорость подхода полосы согласована с окружной скоростью валков. Частота собственных колебаний главных линий клетей от технологического режима не зависит и в клетях №№ 1–5 составляет соответственно 7–9 Гц. Динамические свойства крутильной линии каждой клетки остаются постоянными. В то же время динамические свойства упругой системы клетей, несмотря на их конструктивную однотипность, различаются и зависят от распределения обжатий по клетям. Это обусловлено тем, что частота собственных колебаний клетки β_K во время захвата и прокатки зависит не только от жесткости клетки C_K , но и от жесткости полосы $C_P=0,5 P/\Delta H$ в очаге деформации [5]: $\beta_K = \sqrt{(C_K + C_P)/m}$, где m – приведенная масса клетки.

Анализ результатов моделирования.

Одним из показателей динамичности системы является коэффициент динамичности K_d . Знание закономерностей его изменения позволяет вести сравнение реакции главных линий клетей между собой, а также в одной клетке при изменении тех или иных параметров оборудования или технологии. Внешнюю нагрузку для листовых станов характеризует коэффициент K_c превышения максимального момента сил технологического сопротивления над статическим, т.е. в установившемся режиме прокатки (рис.1а). На рис.1б для одного

из режимов обжатий в клети 5 приведена зависимость K_d и K_c от относительной скорости $\bar{V} = V/V_n$, где V_n – номинальная скорость прокатки (захвата) при заправке полосы в клети. Отметим ряд особенностей изменения кривых.

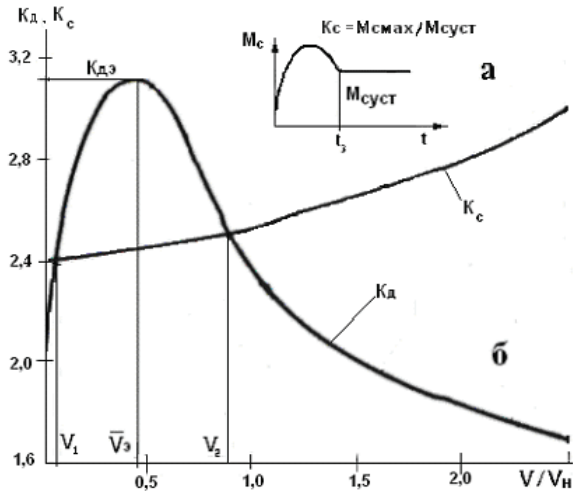


Рис.1 Куполообразный характер изменения момента технологического сопротивления на участке заполнения очага деформации металлом (а) и зависимость коэффициентов K_c , K_d от относительной скорости захвата $\bar{V} = V/V_n$ (б).

Коэффициент превышения момента K_c монотонно увеличивается, т.к. возрастает скорость деформации клети X , входящая в функцию $M(\phi, X)$ [5].

Зависимость коэффициента динамичности от скорости $K_d(\bar{V})$ характеризуется явно выраженным максимумом $K_{dэ}$ при некоторой скорости $V_э$. Два участка с разной тенденцией изменения $K_d(\bar{V})$ объясняются следующим образом. При незначительной скорости захвата ($\bar{V} < \bar{V}_э$) K_c находится в области малых значений, время действия увеличенного момента сопротивления, как и время захвата полосы, увеличивается. Средняя скорость нарастания момента сопротивления уменьшается. В результате коэффициент динамичности $K_d < K_{dэ}$.

В диапазоне $\bar{V} > \bar{V}_э$ дальнейшее увеличение скорости захвата полосы ведёт к увеличению коэффициента K_c , крутизна нарастания момента сопротивления существенно увеличивается, а время действия куполообразной составляющей момента уменьшается. Поэтому линия привода с учётом её частотных свойств не успевает реагировать на эту составляющую. В результате на валковую систему при $\bar{V}$ в 2–3 раза больше $\bar{V}_э$ действует практически скачкообразное увеличение момента от нуля до $M_{c\text{уст}}$. Как

известно, коэффициент динамичности в подобных системах без учёта зазоров меньше 2.

В точке $\bar{V}_3$ – водораздела между указанными двумя участками – система линии главного привода и упругой клетки становится наиболее чувствительной к действию куполообразного характера изменения момента сопротивления.

Между коэффициентами K_d и K_c отсутствует однозначная связь. Поэтому полученный во многих работах характер зависимости коэффициента K_c от технологических параметров и жесткости клетки позволяет сделать лишь качественные выводы относительно возможного влияния куполообразного момента сопротивления на динамику линии привода.

Следует отметить совпадение в двух точках $\bar{V}_1$ и $\bar{V}_2$ коэффициентов K_d и K_c . На основании моделирования установлено, что имеется такая достаточно малая скорость $\bar{V}_1$, когда происходит фактически статическое нагружение валков и линии привода. При этом функция момента на валках совпадает с реакцией линии привода (момента сил упругости) по форме

При скорости $\bar{V}_2$ максимум технологического момента на валках наступает раньше, чем максимум первого пика реакции линии привода. Этот факт имеет лишь тот физический смысл, что с увеличением скорости прокатки положение максимума момента сопротивления на валках по времени смещается в сторону уменьшения (пропорционально скорости или времени захвата), в то время как максимум реакции первого пика момента практически не смещается.

В полосовых станах холодной прокатки момент сил технологического сопротивления в установившемся режиме от скорости прокатки практически не зависит. Следовательно, при скорости $\bar{V}_3$ динамическая составляющая нагрузки в линии привода также принимает максимальное значение $M_{\text{дmax}} = K_d(\bar{V}_3)M_c$. Таким образом, кривая изменения $M_d(\bar{V})$ повторяет кривую $K_d(\bar{V})$, т.е. эквидистантна последней.

Отмеченные выше зависимости в качественном отношении характерны для всех клеток полосового стана холодной прокатки (рис.2). Здесь $\bar{V}_\phi=1$ соответствует фактической скорости прокатки в клетях при захвате полосы (таблица на рис.2).

Следуя по прямой $\bar{V}_\phi=1$ вверх на рис.2 отмечаем, что K_d от клетки к клетке постепенно увеличивается, в клетке №4 достигает максимального значения, а в клетке №5 заметно уменьшается. При этом в клетках №3 и 4 K_d лежит в районе максимума. В этих клетях скоростной режим прокатки (захвата полосы) выбран явно не рационально. Из графиков видно, что в общем случае за счёт выбора скорости захвата полосы валками можно существенно уменьшить уровень динамических нагрузок.

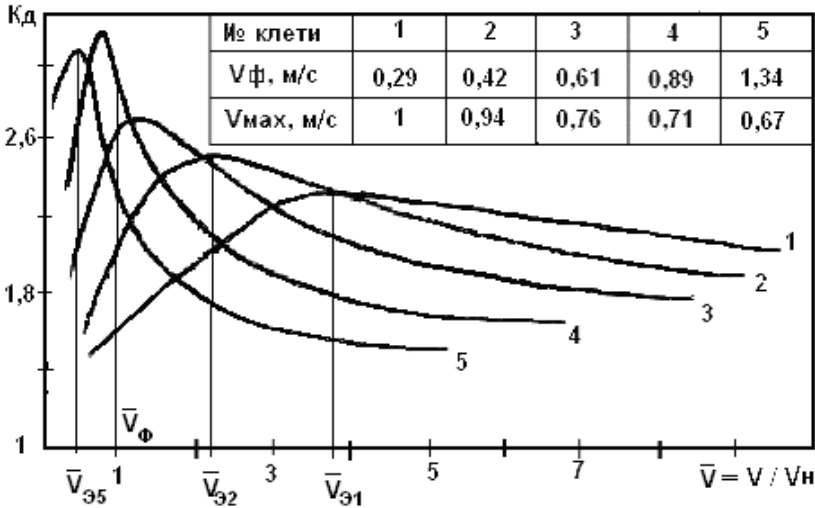


Рис.2. Зависимость коэффициента динамичности K_d от относительной скорости прокатки при захвате полосы в клетях № 1–5 полосового стана 1700.

Результаты моделирования показывают, что при прокатке с другими обжатиями качественная картина полученных зависимостей для K_d во всех клетях сохраняется при некотором смещении максимумов K_d . Следовательно, при прокатке каждого сорта размера можно выбрать рациональный скоростной режим захвата в каждой клетке, при котором коэффициент динамичности и максимальный пиковый момент сил упругости будут по возможности существенно уменьшены.

На основании анализа данных расчётов для полос различного сорта размера и режимов обжатий для полосовых станов холодной прокатки установлено условие, при котором K_d достигает максимального значения: отношение времени захвата полосы (заполнения очага деформации металлом) t_3 к периоду собственных колебаний T линии привода равно:

$$\lambda_3 = t_3 / T \approx 0,22, \quad (1)$$

т.е. приблизительно четверти периода. Время захвата полосы с учётом обжатия ΔH , деформации клетки X_0 и угловой частоты вращения валков ω , радиуса r равно

$$t_3 = \sqrt{(\Delta H + X_0) / r} / \omega_3 \quad (2)$$

Период собственных колебаний двухмассовой системы

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{\theta_1 \theta_2}{(\theta_1 + \theta_2) C_{12}}} \quad (3)$$

Из (1) с учётом (2) и (3) при $V_3 = r \omega_3$ получаем:

$$V_{\text{Э}} \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{Э}}} \sqrt{\frac{r \cdot C_{12} \cdot (\Delta H + X_0) \cdot (\theta_1 + \theta_2)}{\theta_1 \cdot \theta_2}} \quad (4)$$

Таким образом, экстремальное значение скорости зависит от технологических (обжатие, усилие прокатки, т.к. $X_0 = P/C_k$) и конструктивных (жёсткость клетки C_k и линии привода C_{12} , моменты инерции, радиус валков) параметров, чем и объясняется разное значение $V_{\text{Э}}$ для каждой клетки. Чтобы сместить точку $V_{\text{Э}}$ относительно номинальной скорости захвата, в действующем стане необходимо существенно изменять указанные параметры. Поэтому, чтобы избежать равенства $V_{\text{ф}} = V_{\text{Э}}$, остается один выход – целенаправленно увеличить или уменьшить скорость захвата полосы таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\Psi_1 V_{\text{Э}} < V < \Psi_2 V_{\text{Э}} \quad (5)$$

где коэффициенты $\Psi_1 > 1$ и $\Psi_2 < 1$ выбираются исходя из обеспечения требуемой величины K_d . Например, если для клетки №3 задаться величиной $K_d = 2$, то, как видно из рис.2, скорость захвата следует выбрать при значении $\Psi_2 = 0,5$ или $\Psi_1 = 4,7$. Учитывая, что спуск по левой ветви кривой $K_d(\bar{V})$ более быстрый, чем по правой, целесообразно использовать правую часть неравенства (5), т.е. уменьшать фактическую скорость захвата полосы.

Скорости, относящиеся к правой ветви кривых, особенно в клетях №№1 и 2, достигаются после торможения стана для прокатки на постоянной скорости (5–6 м/с) участка полосы с сварным соединением. Например, в рассмотренном примере при скорости прокатки в клетях №5 $V_5 = 4,6$ м/с скорость прокатки в клетях №1 с учётом пересчёта через коэффициент вытяжки составит $V_1 = 1,0$ м/с, что равно $V_{\text{Э}}$. В этом случае линия привода максимально отреагирует на возмущение со стороны сварного соединения, которое имеет вид полусинусоиды. Крутильные колебания в главной линии вызовут дополнительные колебания линейной скорости валков, что может отразиться на межклетьевом натяжении. Однако этот вопрос требует более тщательного исследования с применением более сложных моделей.

Выводы.

В клетях полосовых станов холодной прокатки ввиду специфического характера изменения момента сил технологического сопротивления при определённой скорости захвата полосы $V_{\text{Э}}$ коэффициент динамичности и момент сил упругости достигают максимального значения. Это означает, что при скорости $V_{\text{Э}}$ сочетание технологических и конструктивных параметров приводит к существенному увеличению динамических нагрузок в линии привода. Получено аналитическое выражение для экстремального значения скорости $V_{\text{Э}}$ и условие, позволяющее выбрать рациональную скорость захвата полосы в каждой клетке, при которой коэффициент динамичности не превысит наперёд заданное значение.

1. *Большаков В.И.* Исследование нелинейных электромеханических систем приводов прокатных станов с упругими связями на электронных моделях. Автореф. канд. дисс., Днепропетровск, ДМетИ, 1966. – 18 с.
2. *Большаков В.И.* Технологические нагрузки листопркатных станов // Динамика металлургических машин. Труды ИЧМ. Т. XXXI. – М.: Металлургия, 1969. – С.64–67.
3. *Кожеевников С.Н., Большаков В.И.* Взаимодействие упругих механических систем станины и привода машин при нагружении // В сб. «Теория механизмов и машин», – Вып. 10. – Харьков: ХГУ, 1970. – С.3–8.
4. *Веренев В.В., Большаков В.И., Подобедов Н.И.* Моделирование взаимодействия линии главного привода и упругой системы клетки. / Захист металургійних машин від поломок : Зб. наук. пр. – Вип. 5, – Маріуполь. – 2000. – С.34 – 42.
5. *Скичко П.Я., Леена И.И., Веренев В.В.* Инженерная оценка влияния податливости клетки на технологические нагрузки и частотные характеристики листовых станов . Листопркатное производство. ИЧМ МЧМ СССР, сб. №3. – М.: Металлургия, 1974. – С.57–61.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук В.А.Носковым