

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ В ЛИНИИ ПРИВОДА ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ В ПРОЦЕССЕ ЕЁ РАБОТЫ

Показано, что в процессе работы клетки коэффициент динамичности на шпиндельном и моторном участках периодически существенно изменяется за счет износа сочленяемых элементов и развития зазоров. Установленные закономерности позволяют прогнозировать максимальные динамические нагрузки в линии привода.

#### Состояние вопроса.

Коэффициент динамичности является важным параметром, который используется для оценки уровня динамических перегрузок, для сравнительного анализа динамичности главных линий прокатных клетей, а также для определения максимальных динамических нагрузок. Зная закономерности изменения коэффициента динамичности  $K$  в период захвата заготовки валками в зависимости от различных факторов легко определить максимальную пиковую нагрузку:  $M_{max. дн.} = K \cdot M_{ст}$ , где  $M_{ст}$  – момент, действующий в установившемся режиме прокатки. Величина  $M_{ст}$  достаточно точно определяется по известным зависимостям с использованием данных измерений, например штатными приборами мощности, потребляемой электродвигателем, или тока, напряжения и частоты вращения его вала.

В работах [1÷4] и других для прокатных станов приводятся формулы для расчета в простых случаях величины  $K$ . Отмечается, что на  $K$  существенное влияние оказывают угловые зазоры в линии главного привода. При этом зависимости даются для двухмассовой системы. В одной из последних работ [5] авторы рассматривают гипотетический случай, когда в двухмассовой беззазорной системе возможно достижение значения  $K=3$ . Получаемые по известным формулам величины  $K$  представляют собой оценочные предельные значения, однако по ним не удается установить количественный и качественный характер изменения коэффициента динамичности, а следовательно, и максимальной динамической нагрузки в процессе работы клетки.

#### Постановка задачи.

Для повышения точности расчетного определения коэффициента динамичности главную линию привода прокатной клетки представляют в виде рядной трехмассовой системы. Это особенно относится к линиям, содержащим редуктор. Расчетная схема таких систем состоит из момента инерции электродвигателя  $Q_1$ , редуктора  $Q_2$  и валковой системы  $Q_3$ , остальные несущественные массы распределяются между ними. Приведенную жесткость  $C_{12}$  участка между двигателем и редуктором обозначим как соответствующую моторному участку, жесткость  $C_{23}$  между редукто-

ром и валковой системой прокатной клетки – соответствующую шпindelному участку.

Экспериментальные исследования показывают, что в таких клетях переходный процесс и коэффициент динамичности на моторном  $K_m$  и шпindelном  $K_{ш}$  участках существенно различается [6]. Однако более важным фактом является то, что в одной и той же клетке  $K_m$  и  $K_{ш}$  в разные периоды измерений и работы изменяются в значительных пределах. Установлено, что по сравнению с такими факторами, как отклонение скорости прокатки, температуры металла, толщины полосы и др., влияние угловых зазоров в линии привода на динамику переходного процесса и коэффициент динамичности является определяющим. Вклад зазоров в динамическую составляющую максимальной пиковой нагрузки в ряде клетей достигает 200÷400% [7]. Угловые зазоры порождаются износом контактирующих поверхностей сочленяемых деталей. Наряду с собственно износом они определяют техническое состояние оборудования, т.е. ту его сторону, которая отражается на уровне динамических нагрузок.

В работе поставлена задача показать на основе компьютерного моделирования характер изменения коэффициента динамичности на шпindelном ( $K_{ш}$ ) и моторном ( $K_m$ ) участках от технического состояния (зазоров) оборудования, изменяющегося в процессе эксплуатации стана.

#### **Предпосылки.**

В настоящее время на основании лабораторных и натуральных исследований установлена следующая модель размыкания угловых зазоров к моменту захвата полосы валками [4,8–10]. В сочленении валок–шпindel на основе шарнира Гука в течение одного оборота создаются условия для кратковременного размыкания зазора. Этому способствует также режим работы, когда скорость подхода полосы к валкам превышает горизонтальную составляющую окружной скорости валков в точке касания полосы. Имеются данные измерений, свидетельствующие о том, что на участке двигатель – редуктор также происходит размыкание углового зазора [4,11].

Суммарный износ сочленяемых деталей на каждом из участков составляет угловой люфт  $\delta_0$ , т.е. максимальное значение, которое может принять зазор  $\delta$ . Исследования показывают, что люфт, как правило, не размыкается на всю величину, а только на некоторую часть, которую назовем угловым зазором  $\delta$ . Именно эта его составляющая приводит к увеличению динамических нагрузок и коэффициента динамичности.

#### **Анализ.**

Опыт исследований показывает, что зазор на шпindelном участке  $\delta_{ш}$  оказывает влияние на динамику и коэффициент динамичности как участка валки – редуктор, так и моторного участка, т.е. на всю линию привода. Зазор на моторном участке влияет только на динамику этого участка. Поэтому коэффициент динамичности на шпindelном участке следует рас-

смаивать, как одномерную функцию  $K_{ш}$  ( $\delta_{ш}$ ), а на моторном участке, как двумерную функцию  $K_M$  ( $\delta_{ш}$ ,  $\delta_M$ ). Функции  $K_{ш}$  и  $K_M$  определяли при разных значениях  $\delta_{ш}$  и  $\delta_M$  путем численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих упругие колебания в трехмассовой электро-механической линии привода с учетом колебаний в упругой системе клетки.

Рассмотрим характер их поведения, во многом типичный для прокатных станов (рисунок). Моделирование и данные для графика рисунка получены с участием Н.И.Подобедова.

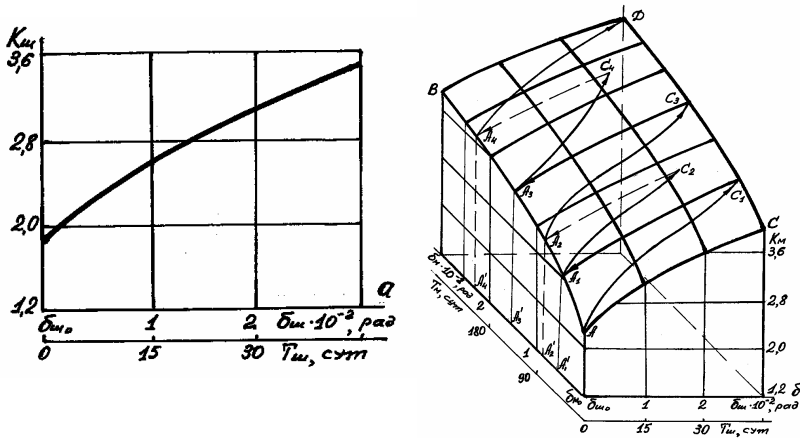


Рисунок. Типичная зависимость коэффициента динамичности на шпиндельном  $K_{ш}$  (а, слева) и моторном  $K_M$  (б, справа) участках от зазора ( $\delta_{ш}$ ) и ( $\delta_M$ ) во время эксплуатации клетки.

Зависимость  $K_{ш}$  ( $\delta_{ш}$ ) тривиальная: чем больше зазор  $\delta_{ш}$ , тем больше коэффициент динамичности (рисунок, а). Интенсивность увеличения  $K_{ш}$  зависит от упруго-массовых параметров линии привода, преимущественно от жесткости шпиндельного участка  $C_{23}$ .

Функция  $K_M$  ( $\delta_{ш}$ ,  $\delta_M$ ), построенная впервые, более сложная (рисунок, б). Значение  $K_M$  в точке А соответствует случаю некоторых минимальных, т.е. технологических, зазоров на обоих участках, необходимых для монтажа сочленяемых деталей,  $\delta_{ш0}$ ,  $\delta_{M0}$ . Кривая АС отображает зависимость  $K_M$  только от зазора  $\delta_{ш}$  на шпиндельном участке, т.е. при  $\delta_M = \delta_{M0}$ . Кривая АВ отображает зависимость  $K_M$  от зазора  $\delta_M$  на моторном участке, когда зазор на шпиндельном участке отсутствует или имеет минимальное (монтажное) значение  $\delta_{ш0}$ . Обе кривые соответствуют крайним случаям, если бы износ (зазор) развивался только на одном из участков. В общем случае коэффициент динамичности изменяется в сторону увеличения, начиная от точки А, по любой кривой, лежащей на поверхности АВДС. Однако здесь

необходимо учесть характер изменения во времени зазоров, имеющий общую закономерность для прокатных клетей.

Известно, что основным зазорообразующим элементом на шпиндельном участке является износ бронзовых вкладышей в сочленении валок – шпиндель [4]. Поэтому можно принять, что зазор  $\delta_{\text{ш}}$  определяется износом вкладышей. Срок их службы (периодичность замены по причине износа) на широкополосных станах горячей прокатки составляет от 15 суток до 2÷3 месяцев [12]. Соответственно этому увеличивается их износ и угловой зазор  $\delta_{\text{ш}}$ . Поскольку износ бронзы носит, как правило, плавный характер, то плавно изменяется и кривая  $K_{\text{м}}(\delta_{\text{ш}}(T_{\text{ш}}))$ , где  $T_{\text{ш}}$  – время работы вкладышей.

Процесс увеличения углового зазора на моторном участке более медленный, так как обусловлен медленным равномерным увеличением износа зубчатых зацеплений муфт и редуктора. Техническое обслуживание редуктора, например, на ШПС проводится один раз в 6÷12 месяцев. Поэтому кривая  $K_{\text{м}}[\delta_{\text{м}}(T_{\text{м}})]$ , где  $T_{\text{м}}$  – время работы клетки, изменяется более «полого», чем  $K_{\text{м}}[\delta_{\text{ш}}(T_{\text{ш}})]$ . На рисунке графики построены с учетом времени работы прокатной клетки и интенсивности износа и роста угловых зазоров.

В рассматриваемой клетки срок службы вкладышей составляет в среднем 45 суток, а обслуживание редуктора осуществляется через 9 месяцев. Полагаем, что износ на обоих участках равномерный. При таких условиях получаем следующую модель изменения коэффициента динамичности на моторном участке во время эксплуатации клетки, начиная с точки  $A$ . По времени точке  $A$  соответствует техническое состояние оборудования, например, после капитального ремонта клетки и установки новых бронзовых вкладышей. Поскольку  $\delta_{\text{ш}}$  увеличивается быстрее, чем  $\delta_{\text{м}}$ , коэффициент динамичности  $K_{\text{м}}$  возрастает по некоторой кривой  $AC_1$ . В точке  $C_1$ , где  $K_{\text{м}}(C_1)=4,2$ , ввиду достижения допустимого износа бронзовых вкладышей производится их замена на новые. В результате техническое состояние шпиндельного участка восстанавливается до точки  $A_1$  на рисунке, б, т.к. за время  $\Delta T = 45$  сут. на моторном участке также произошло увеличение зазора до некоторой величины  $\delta_{\text{м}1}$ . Техническое состояние этого участка соответствует точке  $A'_1$ , при этом  $K_{\text{м}}=K_{\text{м}}(\delta_{\text{м}1}(A_1)) = 2,8$ . Дальнейшее увеличение коэффициента динамичности  $K_{\text{м}}$  начнется с точки  $A_1$ .

В зависимости от общей ситуации на стане и, в частности, в рассматриваемой отдельно взятой клетки, возможны различные варианты изменения коэффициента динамичности на моторном участке. Например, бронзовые вкладыши заменили на 10 суток раньше среднего срока их службы по причине повышенного износа из-за ухудшения работы системы подачи смазки или исходя из срока проведения очередного планово-предупредительного ремонта. До этого момента коэффициент  $K_{\text{м}}$  изменялся по некоторой кривой  $A_1C_2$ . После установки новых вкладышей тех-

ническое состояние участка двигатель – редуктор стало соответствовать точке  $A'_2$ . Коэффициент  $K_M$  снова уменьшился с  $K_M(C_2) = 4,2$  до  $K_M(A_2) = 3,0$ , однако в целом увеличился по сравнению с значением в точке  $A$ . Если следующая замена вкладышей производится через 45 суток (120 суток работы клетки), коэффициент  $K_M$  достигнув значения в точке  $C_3$   $K_M(C_3) = 4,6$ , уменьшится до  $K_M(A_3) = 3,4$ . Один из дальнейших вариантов изменения  $K_M$  показан в виде кривой  $A_3C_4A_4D$  на поверхности  $ABDC$ .

При отсутствии на стане экстремальных ситуаций (поломка оборудования, нарушение поступления смазки в сочленяемые узлы и др.) и при условии стабильной работы процесс изменения  $K_M$  периодически повторяется в сторону медленного увеличения вдоль оси  $\delta_m$  и более быстрого вдоль оси  $\delta_{ш}$ . Максимального значения  $K_M$  достигает в точке  $D$ . Здесь сочетается наихудшее техническое состояние (в части износа и зазоров) сочленяемых элементов моторного и шпиндельного участков. После планового капитального ремонта линии главного привода, в частности, редуктора и зубчатых муфт и установки новых вкладышей в шпиндели, техническое состояние оборудования восстанавливается в исходное состояние, соответствующее точке  $A$ . В клетях, где замена бронзовых вкладышей по причине износа более частая, например, 15 суток, переход из точек  $A_i$  к точкам  $C_i$  и возврат к точкам на прямой  $AB$  осуществляется чаще.

В рассматриваемой клетке наименьшее значение  $K_M = 2,2$  (точка  $A$ ), наибольшее  $K_M = 5,3$  (точка  $D$ ). Как видим, величина коэффициента динамичности в процессе эксплуатации прокатной клетки существенно изменяется, что подтверждают неоднократные измерения, выполненные в разные периоды её работы [13]. Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования подтверждают, что пределы этого изменения в наибольшей степени зависят от технического состояния оборудования главной линии, которое определяется износом сочленяемых деталей и формируемыми вследствие этого угловыми зазорами. Из всех технологических факторов на широкополосных станах наибольшее влияние на  $K$  оказывает момент сил технологического сопротивления  $M_{ст}$  в установившемся режиме (момент прокатки). Известно, что при наличии в системе зазоров, чем меньше  $M_{ст}$ , тем больше коэффициент динамичности.

Момент  $M_{ст}$  в черновых клетях может значительно изменяться за счет марки стали и ширины слябов между плавками. Так, на стане 1680 при существующем режиме распределения обжатий по клетям пределы изменения  $M_{ст}$  за счет ширины составляют  $20 \div 30$  %, а коэффициента динамичности  $K_M$  в рассматриваемой клетке, например, в точке  $C_2$ , в пределах  $3,8 \div 4,5$ . Здесь следует отметить, что представленная на рисунке (б) поверхность построена для одного постоянного значения статического момента, поэтому она имеет пологий вид. В действительности из-за изменения  $M_{ст}$ , обусловленного прокаткой полос разной ширины, толщины и др., эта поверхность имеет своеобразный рельеф со скачкообразными изменениями  $K_M$  в виде кусочных поверхностей-лоскутов, расположенных на

разных уровнях. Поэтому с целью повышения точности расчет коэффициента динамичности и максимальных нагрузок (рисунок, б) следует производить с учетом изменения, в частности, ширины прокатываемой полосы и марки стали.

Характер изменения кривых  $K_{ш}(\delta_{ш})$  и  $K_{м}(\delta_{ш}, \delta_{м})$  зависит от конструктивных параметров линии привода. Чем более рационально выбраны её параметры (в частности, чем больше отношение собственных частот  $n=\beta_2/\beta_1$  [7]), тем более пологие эти зависимости, т.е. тем меньше влияние угловых зазоров на динамику. В клетях, с «плохими» параметрами, т.е. когда  $n=1,2\div 1,6$ , влияние зазоров на динамику переходного процесса более существенное, рассмотренные кривые изменяются более круто (в предположении одинаковой интенсивности развития зазоров в двух последних случаях). В клетях с безредукторным приводом валков через шестеренную клеть (большинство чистовых клетей широкополосных станов) отличие коэффициентов динамичности на участках валковая система шестеренная клеть и шестеренная клеть – двигатель незначительное [7]. Поверхность  $K_{м}(\delta_{ш}, \delta_{м})$ , где в качестве  $\delta_{м}$  берется угловой зазор на участке двигатель – шестеренная клеть, более пологая. Вклад технологических факторов в коэффициент динамичности в ряде чистовых клетей, например, горбообразный характер нарастания момента сил технологического сопротивления, становится одного порядка с вкладом зазоров [14]. Поэтому при сохранении общей закономерности поведения функции  $K_{м}(\delta_{ш}, \delta_{м})$  при её исследовании с целью повышения точности необходимо учитывать пределы возможного разброса температуры, толщины и ширины полосы и скорости прокатки.

Построение подобных зависимостей для прокатных клетей имеет большое практическое значение при условии, что обслуживающим персоналом ведется учет времени работы клетки в целом и наработки шпинделей, в частности, а также фиксируется время и объем ремонтных воздействий. Во-первых, они дают наглядное представление о фактическом характере изменения динамичности участков линии привода во время эксплуатации клетки. Во-вторых, позволяют делать количественные оценки и прогнозировать динамические нагрузки в зависимости от предполагаемого (ожидаемого) изменения технического состояния оборудования и на этом основании принимать решение о более рациональной загрузке клетки (клетей в многоклетевых станах). В-третьих, повысить точность определения максимальных динамических нагрузок на каждом участке и учета их при расчетах на прочность и долговечность оборудования.

### **Заключение.**

Изменение технического состояния оборудования прокатной клетки в процессе её эксплуатации, обусловленное износом сочленяемых деталей и порождаемыми угловыми зазорами, существенно влияет на величину и характер изменения коэффициента динамичности, следовательно, и динамических нагрузок. Периодичность увеличения коэффициента динамич-

ности на шпиндельном участке  $K_{ш}$  согласуется с периодом замены бронзовых вкладышей: к концу срока их службы  $K_{ш}$  достигает наибольшего значения, после их замены на новые  $K_{ш}$  уменьшается до исходного уровня.

Поскольку коэффициент динамичности на моторном участке  $K_m$  зависит от углового зазора на шпиндельном  $\delta_{ш}$  и моторном  $\delta_m$  участках, закономерности его увеличения заключаются в следующей периодичности:

– сравнительно быстрое увеличение вдоль оси  $\delta_{ш}$  по мере износа бронзовых вкладышей, как основного зазорообразующего элемента, затем скачкообразное уменьшение  $K_m$  до некоторого уровня, превышающего предыдущий исходный при восстановлении технического состояния шпиндельного участка путем замены бронзовых вкладышей;

– более медленное увеличение вдоль оси  $\delta_m$  по мере износа зубчатых зацеплений муфт и редуктора.

Установленные закономерности и особенности изменения коэффициента динамичности на участках линии привода в процессе работы прокатной клетки углубляют и уточняют знания об условиях нагруженности оборудования в процессе его эксплуатации.

1. *Кожевников С.Н.* Динамика нестационарных процессов в машинах. – Киев: Наукова думка, 1986. – 288 с.
2. *Динамика* и прочность прокатного оборудования / Ф.К.Иванченко, П.И.Полухин, И.Я.Тылкин, В.П.Полухин. – М.: Металлургия, 1970. – 486 с.
3. *Wright J.* Mill drive system to minimize torque amplification. – *Iron and Steel Engineer.* 1976. V.53. №7. – P. 56–60.
4. *Динамика* процессов прокатки / С.Л.Коцарь, В.А.Третьяков, А.Н.Цупров, Б.А.Поляков.– М.: Металлургия, 1997. – 255 с.
5. *Оценка* предельных нагрузок в трансмиссиях металлургических машин / Р.Ш.Адамия, Г.В.Кошакашвили, В.М.Лобода, С.А.Мебония // *Сталь.* – №3. – 2004. – С.49–51.
6. *Веренев В.В.* Учет динамических процессов при выборе места установки предохранительного устройства в главной линии от перегрузки // *Защита металлургических машин от поломок.* – Мариуполь. – 1998. – Вып.№3. – С.25–29.
7. *Динамические* перегрузки в приводах клеток широкополосных станов / В.В.Веренев, В.И.Большаков, Ю.Н.Белобров, И.А.Бобух // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1999. – № 1. – С.72–75.
8. *Смирнов В.В., Яковлев Р.Я.* Механика приводов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1977. – 216 с.
9. *Исследование* формирования угловых зазоров в шпиндельном соединении прокатного стана / А.А.Восканьянц, С.Д. Гарцман, А.А. Филатов и др. // *Сб. научн.тр. «Машины и агрегаты металлургического производства».* – М.: ВНИИМетмаш., – 1984. – С.114-148.
10. *Веренев В.В., Большаков В.И.* Особенности проявления зазоров в главных линиях прокатных клеток // *Защита металлургических машин от поломок.* – Мариуполь, 1999. – Вып. № 4. – С.26–36.

11. *Большаков В.И., Вернев В.В.* Особенности идентификации динамической модели главного привода листопрокатного стана // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 1998. – Вып. №3. – С.30–34.
12. *Анализ причин аварий оборудования листопрокатных станов и меры по их предупреждению / Крисанов А.Ф., Кузерман В.Ф., Виноградов Б.Н. и др. // Обзорная информация, ин-т "Черметинформация", 1985. – 36 с.*
13. *Вернев В.В.* Связь ударных нагрузок с техническим состоянием прокатной клетки // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* – 2003. – Вып.6. – С.366–371.
14. *Вернев В.В., Большаков В.И., Подобедов Н.И.* Влияние особенностей изменения момента технологического сопротивления на динамику главных приводных линий чистовых клетей // *Защита металлургических машин от поломок.* Мариуполь. – 1998. – Вып. № 3. – С.35–39.

*Статья рекомендована к печати чл.-корр.НАН Украины  
В.И.Большаковым*