

*Рахманов С.Р.***МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЯ ОПРАВКИ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ****Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр**

Рассмотрена задача о параметрических колебаниях для выбранной модели системы «труба – оправка – стержень» механизма удержания оправки стана холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ). Разработана расчетная схема и составлено дифференциальное уравнение движения изображающей точки стержня оправки стана ХПТ. Проведено комплексное исследование динамики стержня механизма удержания оправки стана ХПТ. Параметрические процессы механизма удержания оправки стана представлены системой дифференциальных уравнений, в виде уравнений Матье-Хилла. Установлены области динамической устойчивости механизма удержания оправки и построена карта параметрической устойчивости механической системы. Математическая модель динамических процессов достоверно описывает параметрические явления в механизме и определяет амплитудно-частотные характеристики стержневой системы за время реализации всего технологического процесса пильгерной прокатки трубы на стане ХПТ. Результаты моделирования динамических процессов указывают на необходимость снижения колебаний стержня оправки стана ХПТ до допустимого уровня виброактивности системы. Математическое моделирование процессов пильгерной прокатки трубы-заготовки позволяет, на этапе проектирования технологических процессов, прогнозировать показатели разностенности готовых труб и назначать рациональные режимы эксплуатации стана ХПТ. Применение модернизированных центрователей на упругом основании, установленных со стороны механизмов подачи и поворота трубы-заготовки в очаг деформации стана ХПТ, приводит к стабилизации динамических процессов и повышению качества готовых труб. Достигнуто заметное снижение продольной и поперечной разностенности труб путем обеспечения устойчивости оправки в очаге деформации. Увеличение стойкости элементов механизма удержания стержня оправки обеспечивается в результате стабилизации уровня виброактивности системы.

**Ключевые слова:** стан, холодная прокатка, оправка, стержень, жесткость, поворот, подача, труба, сила прокатки, колебания, динамика, математическая модель, дифференциальное уравнение, устойчивость.

***Постановка проблемы***

Технологические процессы на станах холодной прокатки труб (ХПТ) предусматривают периодическую прокатку трубы-заготовки в калибрах валков подвижной рабочей и на оправке, которая удерживается на оси прокатки посредством стержневой системы, стационарных центрователей и упорно-регулирующего клинового механизма в очаге деформации [1].

Фирма SMS-Meer (Германия), начиная с конца семидесятых годов, а ОАО «ЭЗТМ» и АКХ «ВНИИМЕТМАШ» с конца девяностых

годов стали выпускать высокоскоростные современные станы различных типоразмеров с торцевой загрузкой трубы-заготовки.

Станы ХПТ последних моделей снабжены механизмами, которые, по требованию технологического процесса, могут осуществлять двойную подачу и двойной поворот. Некоторые высокоскоростные станы, например, стан КРВ 18 НМРК фирмы SMS-Meer, имеют возможность совершать так называемую непрерывную подачу трубы-заготовки и непрерывный поворот трубы со стержнем оправки. Указанная непрерыв-

ность механической системы стана в данном случае носит чисто условный характер. Поскольку рабочий конус всегда зажат валками во время прокатки, то практически повернуть и подавать трубу-заготовку вперед невозможно. С другой стороны, при высокой быстроходности стана, например, при частоте движения рабочей клетки равной  $350 \text{ мин}^{-1}$ , время открытия зева подачи или зева поворота калибра составляет тысячные доли секунды.

При включении приводов механизмов подачи и поворота на постоянное вращение все элементы кинематической цепи от двигателя до рабочего конуса в рабочих фазах движения валков испытывают определенную упругую деформацию, а при переходе валков в фазы холостого хода эту упругую деформацию реализуют в виде нежелательной подачи и поворота рабочего конуса, освобожденного калибрами.

Высокочастотное чередование рабочих и холостых фаз разворота валков и калибра в комплексе зрительно создают видимость непрерывности подачи и поворота.

С момента разработки технологии пильгерной прокатки труб и создания первых станов ХПТ известны два способа загрузки очередной трубы-заготовки в стан по линии прокатки – боковой и торцевой. Некоторые первые образцы зарубежных станов имели торцевую загрузку, однако в силу некоторых причин превалировала боковая, как конструктивно более простая. Кроме того, повышение требований к качеству поверхности труб, особенно внутренней, стимулировало боковую загрузку, поскольку при каждой загрузке очередной заготовки имелась возможность осмотра оправки с целью контроля налипания металла или появления трещин, что в период частых вариаций режимами обжатий (калибровками) и использования технологических смазок, является более приемлемым.

Недостатки боковой загрузки трубы-заготовки, кроме потери производительного времени (для перезарядки нужно остановить прокатку, извлечь и снова через полость очередной заготовки вернуть оправку в рабочий конус), отрицательно влияют на качество прокатываемых труб, особенно на точность размеров (по длине всей трубы). Дело в том, что для извлечения оправки из конуса его необходимо обкатать, т.е. произвести несколько двойных ходов клетки при выключенной подаче. В результате обкатки толщина стенки рабочего конуса, по сравнению с остальной частью трубы, подвергается утончению.

Кроме того, повышенные требования к точ-

ности размеров труб стали соизмеримыми с изменением размеров инструментов под действием их теплового расширения. В связи с этим остановки стана на перезарядку стали нежелательными, поскольку приводили к местному утончению стенки за счет обкатки и местному изменению размеров труб за счет изменения размеров технологических инструментов, вызванных нежелательным охлаждением во время остановки.

Названные недостатки и наличие современной элементной базы побудили изготовителей вернуться на новом качественном уровне к модернизации существующих, разработке и изготовлению новых современных станов ХПТ с системой торцевой загрузки трубы-заготовки.

На схеме (рис. 1,а) показан первый вариант (этап) торцевой загрузки трубы-заготовки, реализованный, например, на стане КРВ25VМR фирмы SMS-Meer. Загрузка трубы-заготовки 1 начинается после открытия заднего патрона стержня оправки 7 путем надевания ее на стержень 4 и перемещения до переднего 5 закрытого патрона стержня. Далее, закрывается патрон стержня и открывается передний патрон стержня (без остановки прокатки). Патрон поворота и подачи заготовки 5, находящийся в переднем положении своего хода, освобождает место очередной заготовке, которая трайбаппаратом или толкателем подается за патрон стержня 7. Патрон поворота и подачи трубы-заготовки 5 индивидуальным сервоприводом ускоренно возвращается назад. В это время процесс прокатки останавливается, поскольку из-за отвода патрона поворота и подачи заготовки 5 прекратилась подача. При этом может быть остановлен главный привод.

Далее, пропустив заготовку через себя (при открытых кулачках), патрон поворота и подачи заготовки 5 останавливается у заднего конца заготовки, происходит реверс его движения, он захватывает заготовку своими кулачками и продвигает ее до упора в торец недокатанной предыдущей заготовки. После этого включается подача и главный привод, если он был отключен, и продолжается процесс прокатки.

Рассматриваемый вариант предусматривает остановку процесса пильгерной прокатки на время отвода патрона заготовки из переднего в заднее положение на длину очередной трубы-заготовки. При отключении главного привода обкатка рабочего конуса не происходит, стабильность теплового режима металла и инструмента нарушается за счет паузы в процессе прокатки.

Второй вариант реализации процесса хо-

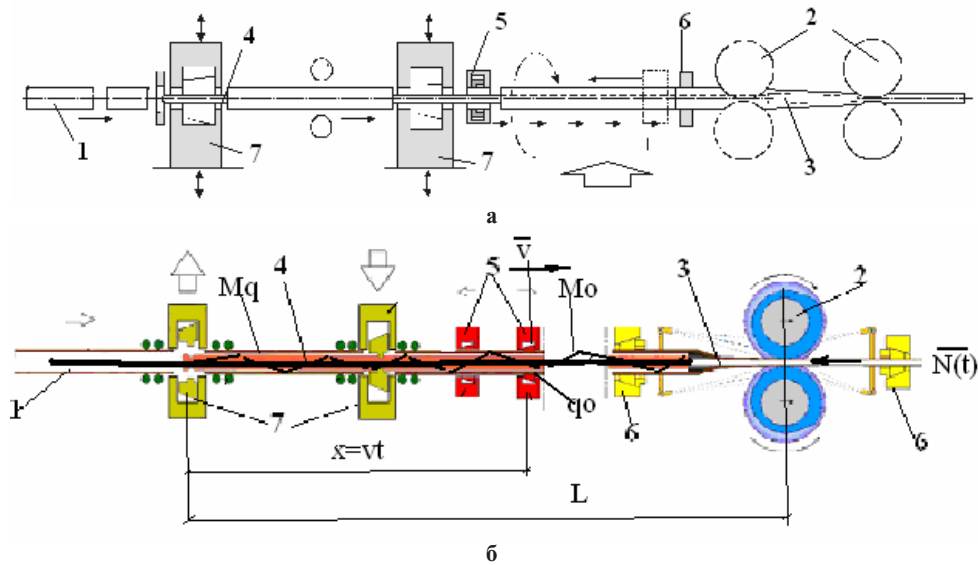


Рис. 1. Стан холодной пильгерной прокатки труб с осевой загрузкой трубных заготовок и расчетная схема механизма удержания оправки стана ХПТ б): 1 – трубная заготовка (гильза); 2 – валки рабочие; 3 – оправка; 4 – стержень оправки; 5 – патроны подачи трубы; 6 – патроны поворота трубы; 7 – патроны удержания стержня оправки

лодной пильгерной прокатки (рис. 1,б) отличается тем, что механизм подачи и поворота состоит из двух патронов подачи и поворота заготовки, каждый из которых захватывает заготовку не за задний конец, а за наружную поверхность. Патроны поворота и подачи работают каждый в своей зоне ответственности (по длине трубы-заготовки).

Первый патрон подачи и поворота 5, пройдя свой рабочий участок, уступает процесс подачи и поворота трубы-заготовки второму патрону подачи и поворота, а за время его работы занимает исходное положение для очередного перехвата трубы-заготовки. Процесс прокатки при этом не прерывается. Очередная заготовка подается трайбаппаратом с подпором в торец прокатываемой заготовки до тех пор, пока она не будет захвачена механизмом подачи и поворота, работающего безостановочно, чем и достигается непрерывность процесса прокатки.

Такая работа двух патронов подачи и поворота создает условия для непрерывности процесса прокатки, что устраняет отмеченные выше недостатки боковой и торцевой загрузки по первому варианту. Непрерывный процесс прокатки реализован, например, на стане последней модели фирмы SMS-Meer. Похожее решение реализовано на отечественных станах ХПТ, последних моделей (например, стан ХПТ 6-20 АКХ «ВНИИМЕТМАШ»).

Опыт эксплуатации высокоскоростных станов ХПТ как отечественных, так и зарубежных

производителей показывают, что дальнейшая интенсификация технологических процессов пильгерной прокатки труб и повышение качества обрабатываемого на станах продукта преимущественно обусловлены особенностями динамики механизмов станов (в частности механизма удержания оправки на оси прокатки трубы).

На устойчивые условия формирования процесса пильгерной прокатки трубы отрицательно влияют как виброактивность оборудования со стороны механизмов периодического поворота и подачи трубы-заготовки в стан ХПТ, так и в частности колебания системы «труба» заготовка – оправка – стержень».

Виброактивность систем механизма удержания стержня оправки во многом определяет условия формирования геометрии готовых труб и приводит к существенному снижению стойкости базового оборудования линии стана ХПТ [2]. На оправку и стержень, с некоторой циклическостью загрузки трубы-заготовки в очаг деформации стана, действуют определенные статические и большие динамические нагрузки. Это в ряде случаев приводит к неожиданной потере устойчивости стержня оправки в пределах упругости механической системы. Согласно условиям, изложенным в работе [3], уход оправки от расчетного положения обуславливает проявление неконтролируемой разности готовых труб.

**Формулирование цели исследования**

Обеспечение динамической устойчивости стержня оправки в очаге деформации требует исключения определенных условий и режимов пильгерной прокатки труб, обуславливающих возникновение различного рода нежелательных параметрических колебательных явлений в рассматриваемой механической системе.

Исследованию механизмов поворота и подачи стана ХПТ посвящены ряд теоретических и экспериментальных работ [3–4], где дается определенный анализ сил, действующих на стержень оправки, указаны возможные условия ухода оправки от расчетного положения рабочего конуса и приведены условия возникновения зон неустойчивого функционирования механизма удержания оправки.

Поскольку данные работы охватывают лишь исследования различных моделей очага деформации, механических систем рабочей клетки, поворотного-подающего комплекса и не касаются вопросов динамики механизма удержания оправки, то комплексное исследование параметрической устойчивости стержня представляется актуальным.

В данной работе рассмотрены результаты исследования параметрической устойчивости стержня механизма удержания оправки стана ХПТ с учетом нестационарного воздействия со стороны очага деформации и прокатываемой трубы, что отличает ее от известных решений [5–6].

Расчетная схема рассматриваемой динамической системы выбрана с учетом технологических особенностей пильгерной прокатки, что отражает воздействие усилия прокатки, инертные характеристики системы и распределенную нагрузку трубы-заготовки, перемещающейся вдоль стержня со скоростью подачи в очаг деформации  $V$  (рис. 1,б).

Приведенная расчетная схема достаточно близка к реальному технологическому процессу прокатки на стане ХПТ с осевой загрузкой трубы-заготовки в линию стана и очевидно глубже отображает динамические явления во всех системах механизма удержания стержня оправки [4].

**Изложение основного материала исследования**

Рассматриваемые поперечные колебания стержня механизма удержания оправки стана ХПТ, следуя принятой расчетной схеме (рис. 1) согласно [6], описываются дифференциальным уравнением:

$$EI_z \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + m_0 \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + N(t) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \begin{cases} q(x,t), & 0 \leq x \leq vt; \\ 0, & vt < x \leq \ell, \end{cases} \quad (1)$$

где  $y(x,t)$  – динамический прогиб стержня механизма удержания оправки стана ХПТ;  $EI_z$  – изгибная жесткость стержня оправки;  $q(x,t)$  – интенсивность нагружения стержня прокатываемой трубой-заготовкой;  $m_0$  – погонная масса стержня оправки;  $v$  – скорость подачи трубы в очаг деформации стана по циклу прокатки трубы.

Дифференциальное уравнение поперечных колебаний (1) для рассматриваемой динамической модели механизма удержания оправки составлено с учетом инерции стержня оправки, изменяющегося осевого составляющего силы прокатки и интенсивности воздействия прокатываемой трубы.

При некоторых допущениях принимаем во внимание то, что частота изменения силы прокатки с некоторыми допущениями совпадает с частотой изменения разностенности трубы-заготовки. Следовательно, есть достаточное основание предполагать, что в первом приближении можно принять условия, описанные в работе [3–4]. Многочисленные экспериментальные исследования энергосиловых параметров стана ХПТ 32 показывают, что осевая составляющая силы прокатки, действующая на стержневую систему носит преимущественно периодический характер и соответствует принятому гармоническому закону:

$$N(t) = N_0 + N_1 \cos(\omega t), \quad (2)$$

где  $N_0$  – статическая составляющая силы прокатки гильзы на стане;  $N_1$  и  $\omega$  – соответственно динамическая составляющая силы пильгерной прокатки гильзы и частота ее изменения.

Тогда дифференциальное уравнение поперечных колебаний стержня оправки (1) с учетом (2) переписывается в виде:

$$EI_z \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + m_0 \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + (N_0 + N_1 \cos(\omega t)) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \begin{cases} q(x,t), & 0 \leq x \leq vt; \\ 0, & vt < x \leq \ell. \end{cases} \quad (3)$$

Решение дифференциального уравнения движения стержня механизма удержания оправки стана запишем в виде разложения в ряд Фурье по фундаментальным функциям задачи с учетом синусоидальной формы поперечных колебаний системы:

$$y(x,t) = \sum_{k=1}^n f_k(t) \sin\left(\frac{k\pi x}{\ell}\right), \quad (4)$$

где  $f_k(t)$  – искомая функция времени, подлежащая определению в ходе решения задачи;

$\sin\left(\frac{k\pi x}{\ell}\right)$  – фундаментальная синусоидальная

функция поперечных колебаний шарнирно закрепленного по концам стержня оправки;  $\ell$  – приведенная длина стержня оправки стана.

Для решения дифференциального уравнения вынужденных колебаний механической системы (3) распределенную нагрузку  $q(x,t)$ , воздействующую в процессе пильгерной прокатки со стороны трубы-заготовки на стержень, аналогично раскладываем тоже в ряд Фурье. Отметим, что фундаментальные функции для стержня оправки в наиболее распространенной в литературе [5–6] форме имеют вид:

$$q(x,t) = \sum_{k=1}^n b_k \sin\left(\frac{k\pi x}{\ell}\right); \quad b_0 = 0, \quad (5)$$

где принято во внимание условие, что интенсивность распределенной нагрузки прокатываемой трубы-заготовки определено есть нечетная функция  $q(x,t) = -q(-x,t)$ .

После разложения распределенной нагрузки (5) в ряд и выполнения процедуры интегрирования окончательно находим:

$$b_k = \frac{2q_0}{k\pi} \left(1 - \cos\left(\frac{k\pi \nu t}{\ell}\right)\right). \quad (6)$$

Применив алгоритм решения задачи, согласно процедуре Бубнова-Галеркина [6], учитывая свойство ортогональности форм собственных колебаний стержня, подставляем (6) в правую часть дифференциального уравнения (3). Опустив соответствующие знаки суммы, окончательно интегрируя полученное, после преобразований дифференциальное уравнение движения стержня оправки стана представим в виде:

$$\frac{EI \left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^4 + (N_0 + N_1 \cos(\omega t)) \left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^2}{m_0} f_k(t) + \frac{d^2 f_k(t)}{dt^2} = \frac{2q_0}{k\pi m_0} \left[1 - \cos\left(\frac{k\pi \nu t}{\ell}\right)\right]. \quad (7)$$

Для удобства анализа параметрических явлений и исследования динамических процессов в рассматриваемой механической системе стана ХПТ, дифференциальные уравнения поперечных колебаний стержня оправки (9) далее представим в форме классических задач динамической устойчивости деформируемых систем.

Обозначая частоту колебаний стержня оправки в виде  $\Omega_k$ , введя другие общепринятые в литературе параметры:

$$\omega_k^2 = \left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^4 \frac{EI}{m_0}; \quad N_k = \left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^2 EI_z; \\ \Omega_k = \omega_k \sqrt{1 - N_0/N_k} \quad (8)$$

в уравнение (7), согласно [6], соответственно получаем:

$$\frac{d^2 f_k(t)}{dt^2} + \omega_k^2 \left[1 - \frac{N_0 + N_1 \cos(\omega t)}{N_k}\right] f_k(t) = \frac{2q_0}{k\pi m_0} \left[1 - \cos\left(\frac{k\pi \nu t}{\ell}\right)\right], \quad (9)$$

где  $N_k$  – эйлерова критическая сила;  $\omega_k$  – частота свободных поперечных колебаний стержня оправки.

После подстановки параметров принятой динамической модели системы и упрощений дифференциальных уравнений (9) получаем уравнения в виде классических уравнений Матъе-Хилла. Данные уравнения удовлетворяют начальным условиям задачи в постановке Коши, граничным условиям поставленной задачи и обобщенной математической модели системы:

$$\frac{d^2 f_k(t)}{dt^2} + \Omega_k^2 [1 - 2\mu_k \cos(\omega t)] f_k(t) = \frac{2q_0}{k\pi m_0} \left[1 - \cos\left(\frac{k\pi \nu t}{\ell}\right)\right]; \quad k = 1, \bar{n}, \quad (10)$$

где  $\Omega_k$  – частота свободных колебаний стержня оправки, нагруженного статической составляющей усилия прокатки  $P_0$  трубы-заготовки

на стане ХПТ;  $\mu_k = \frac{N_1}{2[N_k - N_0]}$  – коэффициент

динамического возбуждения стержня оправки стана ХПТ.

Коэффициент динамического возбуждения  $\mu_k$  и частота свободных колебаний стержня оправки  $\Omega_k$  определяются из условия взаимного изменения, как технологических параметров очага деформации при пильгерной прокатке, так и параметров стержня оправки стана ХПТ.

Дифференциальное уравнение (10) составлено и представлено в виде известных параметрических уравнений Матъе-Хилла. Полученная математическая модель с достаточно высокой степенью точности и корректно описывает динамику механизма удержания оправки стана ХПТ. Численное решение дифференциального уравнения (10) реализовано методом Рунге-Кутты с применением программного продукта Matcad, что позволяет оценить динамические перемещения изображающей точки стержня оправки для одной из наиболее распространенных гармонических форм колебаний механизма удержания оправки.

Кривые, приведенные на рис. 2 и рис. 3, наиболее полно описывают динамические процессы, происходящие в системе механизма удержания оправки стана ХПТ разных типоразмеров без учета (1) и с учетом (2) опыта использования группы роликовых центрователей.

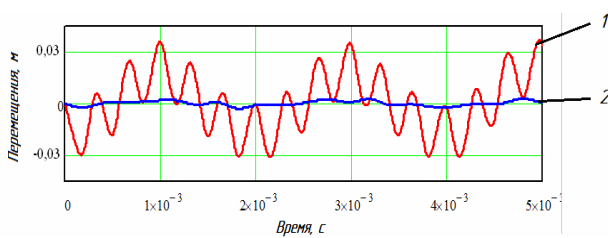


Рис. 2. Параметрические колебания стержня оправки высокоскоростного стана KPW 25VMR без центрователей 1) и с центрователями 2) (труба заготовка диаметром 19×1,2, сталь 12X18H10T)

Карта устойчивости стержня оправки стана ХПТ при поперечных колебаниях механической системы, согласно [6–7] и уравнению (10), представлена на рис. 4 в виде классической параметрической диаграммы Айнса-Стретта.

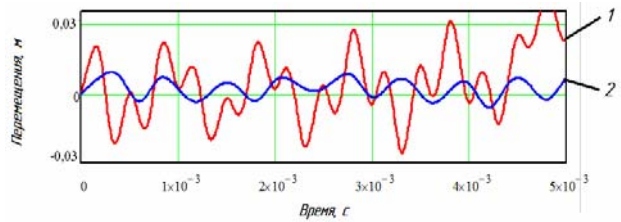


Рис. 3. Параметрические колебания стержня оправки отечественного стана ХПТ 15-45 без центрователей 1) и с роликовыми центрователями 2) (заготовка диаметром 25×1,6, титан Gr2)

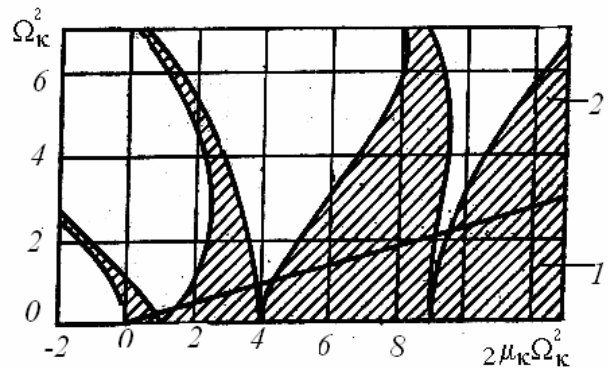


Рис. 4. Диаграмма параметрической устойчивости Айнса-Стретта для обобщенной динамической модели стержня оправки стана ХПТ: 1 – зоны динамической устойчивости стержня оправки; 2 – зоны динамической неустойчивости системы

Математическая модель системы с высокой степенью достоверности описывает виброактивность системы и существенно уточняет поведение стержня оправки станов ХПТ.

Диаграмма устойчивости функционирования стержня оправки для рассматриваемой обобщенной динамической модели колебаний системы позволяет проанализировать реальные области параметрической устойчивости стержня оправки стана ХПТ и оценить поведение самой оправки в очаге деформации и может быть использовано при назначении режимов прокатки трубы-заготовки.

Выбор рациональных режимов пильгерной прокатки трубы-заготовки на стане ХПТ следует осуществить с помощью карты устойчивости (заштрихованные области). Очевидно, что учет интенсивности воздействия прокатываемой трубы-заготовки, подаваемой со скоростью  $V$  в очаг деформации, является определяющим параметром в рамках выбранной динамической модели стержневой системы механизма удержания оп-

равки стана ХПТ.

Возможность моделирования режимов пильгерной прокатки гильз на этапе проектирования технологических процессов существенно отличает полученные результаты от результатов ранее известных работ в области исследования динамической устойчивости и виброактивности стержневой системы механизма удержания оправки станом ХПТ.

Следует отметить, что изменение конструкции крепления стержня оправки в каретке упорно-регулирующего механизма посредством клинового механизма приводит к некоторой стабилизации уровня виброактивности стержня и систем удержания оправки стана ХПТ.

Для обеспечения динамической устойчивости механической системы рекомендуем на высокоскоростном стане ХПТ использовать центрователи (люнеты) стержневой системы механизма удержания оправки конструкции ООО «НПФ «Восток Плюс» регулируемой жесткости в количестве не менее семи штук. Центрирующие суппорта оснащены четырьмя удлиненными роликами (рабочая длина одного ролика на одном суппорте должна быть не менее 100–120 мм), расположенными в шахматном порядке по вертикали и рычажным механизмом пропорционального сближения роликов по оси прокатки. Усилия прижатия роликов к стержню или трубе-заготовке обеспечиваются давлением в гидроцилиндре привода рычагов.

#### **Выводы**

Проведено исследование динамики стержня механизма удержания оправки стана ХПТ. Математическая модель задачи представлена дифференциальными уравнениями вынужденных колебаний системы «труба – оправка – стержень» в виде уравнений параметрической устойчивости Матъе-Хилла.

Математическая модель динамических процессов достоверно описывает параметрические явления в механизме и определяет амплитудно-частотные характеристики стержневой системы за время реализации всего технологического процесса пильгерной прокатки трубы на стане ХПТ. Результаты моделирования динамических процессов указывают на необходимость снижения виброактивности систем стержня оправки стана ХПТ до допустимого уровня колебаний в очаге деформации.

Математическое моделирование процессов пильгерной прокатки трубы-заготовки позволяет, на этапе проектирования технологических процессов, прогнозировать показатели разно-

стенности готовых труб и назначать рациональные режимы эксплуатации стана ХПТ.

Применение модернизированных центрователей на упругом основании, установленных со стороны механизмов подачи и поворота трубы-заготовки в очаг деформации стана ХПТ, приводит к стабилизации динамических процессов и повышению качества готовых труб. Достигнуто заметное снижение продольной и поперечной разностенности труб путем обеспечения устойчивости оправки в очаге деформации.

Увеличение стойкости элементов механизма стержня системы удержания оправки обеспечивается в результате стабилизации уровня виброактивности системы.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Холодная прокатка труб / З.А. Кофф, П.М. Соловейчик, В.А. Алешин, М.И. Гриншпун. – Свердловск: Металлургиздат, 1962. – 431 с.
2. Гриншпун М.И., Соколовский В.И. Станы холодной прокатки труб. – М.: Машиностроение, 1967. – 239 с.
3. *Технология* трубного производства: Учебник для вузов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интермет – Инжиниринг, 2002. – 640 с.
4. Фролов В.Ф., Данченко В.Н., Фролов Я.В. Холодная пильгерная прокатка труб. – Днепропетровск: Пороги, 2005. – 255 с.
5. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. – М.: Гостехиздат, 1956. – 630 с.
6. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. – М.: ГНТИ, 1957. – 546 с.

Поступила в редакцию 05.10.2016  
Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Ахундов В.М.

**МОДЕЛЮВАННЯ КОЛИВАНЬ СТЕРЖНЯ  
ОПРАВЛЕННЯ СТАНУ ХОЛОДНОЇ ПІЛЬГЕРНОЇ  
ПРОКАТКИ ТРУБ****Рахманов С.Р.**

Розглянуто задачу про параметричні коливання для обраної моделі системи «труба – оправлення – стержень» механізму утримання оправки стану холодної пільгерної прокатки труб (ХПТ). Розроблено розрахункову схему і складено диференціальне рівняння руху яка відображає точки стержня оправлення стану ХПТ. Проведено комплексне дослідження динаміки стержня механізму утримання оправки стану ХПТ. Параметричні процеси механізму утримання оправки стану представлені системою диференціальних рівнянь, у вигляді рівнянь Мат'є-Хілла. Встановлено області динамічної стійкості механізму утримання оправки і побудована карта параметричної стійкості механічної системи. Математична модель динамічних процесів достовірно описує параметричні явища в механізмі і визначає амплітудно-частотні характеристики стержневої системи за час реалізації всього технологічного процесу пільгерної прокатки труби на стані ХПТ. Результати моделювання динамічних процесів вказують на необхідність зниження коливань стержня оправлення стану ХПТ до допустимого рівня віброактивності системи. Математичне моделювання процесів пільгерної прокатки труби-заготовки дозволяє, на етапі проектування технологічних процесів, прогнозувати показники різностійкості готових труб і призначати раціональні режими експлуатації стану ХПТ. Застосування модернізованих центровачів на пружній основі, встановлених з боку механізмів подачі і повороту труби-заготовки в осередок деформації стану ХПТ, призводить до стабілізації динамічних процесів і підвищення якості готових труб. Досягнуто помітне зниження поздовжньої і поперечної різностійкості труб шляхом забезпечення стійкості оправлення в осередку деформації. Збільшення стійкості елементів механізму утримання стержня оправлення забезпечується в результаті стабілізації рівня віброактивності системи.

**Ключові слова:** стан, холодна прокатка, оправлення, стержень, жорсткість, поворот, подача, труба, сила прокатки, коливання, динаміка, математична модель, диференціальне рівняння, стійкість.

**MODELING OF VIBRATIONS OF MANDREL BAR IN  
COLD PILGER MILL****Rakhmanov S.R.**

The problem of parametric oscillations for the selected model of the «tube-mandrel-rod» system of the mechanism for retaining the mandrel of the cold pipe-rolling mill (HPT) is considered. A design scheme has been developed and a differential equation of motion of the representative point of the mandrel bar of the mandrel of the HPT mill has been compiled. A complex study of the dynamics of the rod of the mechanism for retaining the mandrel of the HPT mill is carried out. Parametric processes of the holding mechanism of the mandrel mill are represented by a system of differential equations, in the form of Mathieu Hill equations. The regions of dynamic stability of the retaining mechanism of the mandrel are established and a map of the parametric stability of the mechanical system is constructed. The mathematical model of dynamic processes reliably describes parametric phenomena in the mechanism and determines the amplitude-frequency characteristics of the rod system during the time of realization of the entire technological process of pellet rolling of the pipe at the HPT mill. The results of simulation of dynamic processes indicate the need to reduce the oscillations of the mandrel bar of the CPT mill to the permissible level of the system's vibroactivity. Mathematical modeling of the process of pellet rolling of the pipe-billet allows, at the design stage of technological processes, to predict the indices of the difference in finished pipes and to assign rational operating conditions for the HPT mill. The use of modernized aligners on an elastic base, installed from the side of the mechanisms of feeding and turning of the billet pipe into the center of deformation of the HPT mill, leads to the stabilization of the dynamic processes and the improvement of the quality of the finished pipes. A significant decrease in the longitudinal and transverse differences in the pipes was achieved by ensuring the stability of the mandrel in the deformation zone. The increase in the durability of the elements of the mechanism of retention of the mandrel bar is ensured as a result of stabilization of the vibroactivity level of the system.

**Keywords:** camp, cold rolling, mandrel, core, rigidity, turn, giving, pipe, force of rolling, fluctuation, loudspeaker, mathematical model, differential equation, stability.