Некоторые особенности процесса прошивки трубной заготовки на прошивном стане

S. R. Rakhmanov /Cand. Sci. (Tech.)/

NPF «VOSTOK PLUS», Dnipro, Ukraine
e-mail: npfvostokpius@gmail.com

Some peculiarities of the process of the pipe purse firmware on the firmware

Цель. Проведение исследований, направленных на выбор рациональных режимов прошивки трубной заготовки путем стабилизации динамических характеристик силовой линии привода тяжело нагруженных прошивных станков ТПА.

Методика. Рассмотрена динамика силовой линии прошивного стана трубопрокатного агрегата (ТПА) с учетом особенностей поведения шарниров шпинделя и механизма установки рабочих валков.

Результаты. Составлено дифференциальное уравнение движения линии главного привода прошивного стана и приведено его численное решение. Рассмотрена адаптированная трехмассовая динамическая модель системы и получено решение задачи с применением программного продукта Solid Works IT Simulation X. Сформулированы основные условия возникновения неустойчивых динамических явлений в силовой линии и механизме установки рабочих валков прошивного стана. Показано, что нестабильная динамика системы является одной из основных причин несоответствия результатов известных теоретических, экспериментальных исследований и толщинометрии труб на прошивных станках ТПА 350.

Научная новизна. Установлены главные причины возникновения параметрических колебаний в приводе рабочей клетки прошивного стана, механизме установки рабочих валков в связи с механизмом образования разностенности труб. Определены области устойчивости функционирования системы в зависимости от режимов эксплуатации и угла подачи рабочих валков с учетом пространственного положения элементов шпиндельного устройства. Сформированы необходимые и достаточные устойчивые условия совместного устойчивого функционирования элементов силовой линии прошивного стана.

Практическая значимость. Для стабилизации процессов прошивки трубной заготовки предложена схема модернизации шпинделей главного привода и механизма установки рабочих валков прошивного стана № 1 ТПА 350. Результаты работы применимы на аналогичных станках винтовой прокатки. (Ил. 9. Библиогр.: 10 назв).

Ключевые слова: прошивка, заготовка, стан, труба, неравномерность хода, разностенность, динамика, привод, валок, колебания, шпиндель, кардан, шарнир, момент инерции, жесткость, барабан, механизм установки, устойчивость.

DOI: 10.33101/s001-1700087840

Введение. Повышение производительности современных трубопрокатных агрегатов (ТПА) сдерживается уровнем скоростных и силовых режимов прошивки трубных заготовок на прошивных станках.

Режимы прошивки трубных заготовок на тяжело нагруженных прошивных станках ТПА представляют собой многофакторную комплексную задачу взаимосвязи процессов прошивки и машины для ее реализации [1; 2]. В мировой и отечественной практике производства бесшовных труб неоднократно предпринимались определенные попытки увеличения темпов работы приводов станков винтовой прокатки. Следует отметить, что

при этом данные процессы, как правило, сопровождаются не только существенными динамическими нагрузками, но и заметным снижением устойчивости процесса прошивки трубной заготовки [3].

Многочисленные исследования динамики прошивных станков в большинстве своем, как правило, не учитывают влияние переменной структуры трансмиссии и изменения угла подачи рабочих валков на процессы прошивки трубной заготовки. Ряд значимых работ в данном направлении обобщены и представлены в [3].

В силу изложенного, проведение исследований, направленных на выбор рациональных ре-

жимов прошивки трубной заготовки путем стабилизации динамических характеристик силовой линии привода тяжело нагруженных прошивных станов ТПА, представляются весьма актуальными.

Постановка задачи. Для установления одного из механизмов образования разностенности прошитых гильз и влияния параметров главной силовой линии стана на процесс прошивки трубной заготовки проведем предварительный анализ особенностей функционирования с учетом конструкции данной механической системы.

Привод валков рабочей клетки стана винтовой прокатки труб включает электродвигатель 4 с главной муфтой, шестеренную клетку-редуктор 3, универсальные телескопические шпиндели 2 на базе стационарных карданных шарниров и рабочие валки 1, установленные в двух барабанах 9 механизма установки валков 6 и станины стана 5 с двумя шинодержателями 7 и 8 (рис. 1а) [1; 2].

а)

б)

в)

Рис. 1. Главный привод (а), рабочая клетка (б) и разрушенный шпиндель прошивного стана № 1 ТПА 350 (в)

Заметим, что нежесткая фиксация рабочих валков в пределах установленного угла подачи по существующей схеме их монтажа в рабочей клетки невозможна. При этом не исключена возможность возбуждения значительных колебаний по всей цепи трансмиссии главного привода. Возникают определенные условия, когда происходит синхронный разворот и движение барабанов с валками в противоположных друг к другу направлениях. Крутильные колебания в цепи разворота рабочих валков порождаются преимущественно изменением соотношений сил соответственно в шарнирах шпинделя и подшипниковых опорах рабочих валков, что порождает значительные динамические нагрузки. Угловая скорость вращения приводных элементов обладает определенной степенью наведенной неравномерности, вследствие наличия в цепи привода рабочих валков шпинделя на основе карданной передачи [3]. Известно, что изменение скорости прошивки зависит от изменения составляющей относительной скорости и угла наклона рабочего валка. Отметим, что при реализации технологического процесса прошивки трубной заготовки сила сопротивления периодически изменяется гармонически, соответственно достигая поочередно максимальной и минимальной величины.

При этом рабочий валок и его привод разворота в барабане на требуемый угол подачи испытывают периодически изменяющийся момент от динамических и осевых слагаемых сил сопротивления. Под воздействием данных сил и сил сопротивления периодически изменяется величина угловой скорости привода и, соответственно, угол подачи рабочих валков в барабанах.

Для исследования влияния неравномерности хода рабочих валков на процессы прошивки проводим толщинометрию (измерение поперечной и продольной разностенности) «выброшенных» из потока труб-гильз после первого и второго прошивных станов ТПА 350 (заготовка – сталь 13ГМФ, заготовка диаметром 250 мм, готовая труба – 325×15,9 мм). Результаты обработки толщинометрии гильз, полученных после прошивного стана № 1 ТПА 350, представлены на рис. 2 (данные ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ») [2; 10].

Анализ результатов толщинометрии указывает на совместимость характера распределения разностенности гильз с параметрами неравномерности хода рабочих валков на соответствующих прошивных станах ТПА 350.

Результаты толщинометрии указывают на устойчивый периодический характер параметрических явлений в силовой линии и некоторые причины возникновения неравномерности хода рабочих валков на прошивном стане № 1 ТПА 350.

Рис. 2. Толщинометрия (продольная разностенность) темплетта трубы-гильзы после прошивного стана ТПА 350 (заготовка сталь 13ГМФ, диам. 250 мм – готовая труба 325×15,9 мм)

В силу гармонического изменения и разности скоростей рабочих валков ($V_1 \neq V_2$) в зоне их взаимодействия с прошиваемой заготовкой оправкой и линейками направление центра скоростей ΔV знакопеременно смещается вверх и вниз в вертикальной плоскости очага деформации, прижимая гильзу к линейкам, образует соответствующие полости $a, б, в$ и $г$ в теле гильзы (рис. 3а). Это приводит к искажению реального очага деформации и неустойчивости при формировании исходной стенки гильзы и является одной из причин образования наведенной разностенности труб.

Метод решения задачи. Далее переходим, в первую очередь, к исследованию влияния динамики силовой линии прошивного стана на процесс прошивки трубной заготовки. Характерно то, что изменение угла подачи рабочих валков определяется, соответственно, моментом инерции масс системы и крутильными жесткостями элементов линии разворота валков в барабанах рабочей клетки. Для этого необходимо и достаточно проверить выполнение условия ухода всей механической системы от параметрического резонанса. При этом в первом приближении величина критической угловой скорости валков и частота

параметрических колебаний механизма установки барабана с валками должны подчиняться условию отхода от резонанса. Соответственно, момент инерции масс системы, крутильная жесткость линии разворота валков совместно с барабаном в рабочей клетке и угловая скорость движения трансмиссии с шпиндельным устройством силовой линии прошивного стана должны отличаться.

Отметим, что ось барабана рабочего валка во время прошивки трубной заготовки определенно совершает гармонические колебания. При этом вектор угловой скорости перпендикулярен оси прокатки. Гироскопический момент пары сил, возникающей в плоскости, перпендикулярной к угловой скорости поворота оси валка, приводит к циклическому изменению давления металла на рабочие валки и крутящего момента силовой линии прошивного стана. Таким образом, в ходе выполнения технологического процесса главный привод, кроме обычного (квазистатического) сопротивления деформации металла M_c , испытывает зависящий от угловой скорости (по характеру возникновения) момент сил сопротивления, соответствующий гироскопическому моменту δM рабочих валков. Следовательно, если период возмущения рассматриваемой системы совпадает с периодом изменения угловой скорости главного привода, то при большой амплитуде гироскопического момента рабочих валков, достаточной для преодоления момента сил трения в цепи привода поворота, происходит ее периодическая раскачка.

Используя методики [5; 9], переходим к составлению дифференциальных уравнений движения трехмассовой динамической модели силовой линии прошивного стана ТПА.

Уравнения движения для выбранной трехмассовой модели силовой линии прошивного стана ТПА (рис. 4б) содержат характерные силовые возмущения (правые части) с частотой, совпадающей с частотой периодических коэффициентов левой части уравнения, что оказывает определяющее значение на возникновение неустойчивого реше-

Рис. 3. Характер распределения скоростей на катающих радиусах рабочих валков (а) и формирования полостей в очаге деформации при прошивке трубной заготовки (б): 1, 2 – рабочие валки; 3, 4 – линейки; 5 – оправка; 6 – гильза

Рис. 4. Схема главного привода прошивного стана ТПА с возможными отклонениями элементов от проектных положений (а) и адаптированная трехмассовая динамическая модель механической системы (б)

ния, растущего со временем. Это, в свою очередь, приводит к нарушению устойчивости процесса прошивки заготовок. Тогда дифференциальные уравнения вращательного движения для трехмассовой модели элементов силовой линии прошивного стана, содержащего шпиндельное устройство переменной структуры, имеют вид:

$$B = \cos(\gamma_1) \left[1 + \operatorname{tg}^2(\theta_{us} - \delta_p) \cos^2(\gamma_2) \right];$$

$$C = \sin^2(\gamma_2) \operatorname{tg}(\theta_{us} - \delta_p).$$

Здесь γ_1, γ_2 – угол между ведущим валом и промежуточным и угол между промежуточным и ведомым соответственно, $\gamma_j \leq 20^\circ, j = 1, 2$; θ_{us} – угол,

$$\begin{cases} (I_{01} + I_1 i^2) \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + I_1 i \frac{di}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi_1}{dt} \right)^2 + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_{d1} - M_{c1} - \delta M_1 i; \\ I_c \frac{d^2 \varphi_c}{dt^2} - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_c) + c_{23}(\varphi_c - \varphi_3) = 0; \\ (I_{02} + I_2 i^2) \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} + I_2 i \frac{di}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi_2}{dt} \right)^2 - c_{23}(\varphi_c - \varphi_3) = M_{d2} - M_{c2} - \delta M_2 i, \end{cases} \quad (1)$$

где φ_1, φ_c и φ_2 – углы закручивания масс при колебаниях;

I_{01} и I_{02} – приведенный к ведущему валу момент инерции масс ветвей привода;

I_c – момент инерции шпиндельного устройства;

I_1, I_2 – соответственно моменты инерции рабочих валков, приведенных к ведомому валу привода;

c_{12} и c_{23} – жесткости элементов трансмиссии;

M_{d1} и M_{d2} – движущий момент главного привода, линейно зависящий от угловой скорости $\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}$;

M_{c1} и M_{c2} – моменты сил технологического сопротивления;

δM_1 и δM_2 – гироскопические моменты от разворота барабанов с валками;

i – передаточное отношение конструкции шпиндельного устройств.

Передаточное отношение пространственной карданной передачи шпиндельного устройства главного привода согласно [3; 6], определяется:

$$i = AB \left(1 + \operatorname{tg}^2(\varphi) \right) / \left[A^2 \operatorname{tg}^2(\varphi) + (B + C \operatorname{tg}^2(\varphi))^2 \right], \quad (2)$$

где

$$A = \cos(\gamma_2) \left[1 + \operatorname{tg}^2(\theta_{us} - \delta_p) \right];$$

на который смещена вторая вилка промежуточного вала относительно первой в сторону вращения шпинделя; δ_p – угол, на который отклонен ведомый вал от плоскости, проведенной через ведущий и промежуточный валы.

Учитывая порядок возрастания коэффициентов A, B, C , можно принять:

$$A = 1 + \varepsilon_1, \quad B = 1 + \varepsilon_2, \quad C = \varepsilon_3, \quad \text{где } \varepsilon_j < 1, j = 1, 2, 3.$$

При этом выражение (3) можно упростить и представить в виде:

$$i = 1 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos(2\varphi) + \varepsilon_3 \sin(2\varphi). \quad (3)$$

Движущий момент силовой линии прошивного стана в основном определяется естественной механической характеристикой электродвигателя главного привода [5; 7].

После подстановок и преобразований уравнение (1) приводится к следующему параметрическому виду. Дифференциальные уравнения движения силовой линии привода рабочих валков в данном случае определенно отличается от известного параметрического уравнения Матье [6; 8], поскольку периодические коэффициенты не малы. Численное решение системы дифференциальных уравнений (1) в постановке базовой задачи Коши с применением пакета стандартных программ путем математического моделирования позволяет установить некоторые основные

причины возникновения параметрических колебаний оси рабочих валков, которые, в свою очередь, существенно влияют на процессы прошивки трубной заготовки на прошивном стане (рис. 5).

Анализ полученных результатов показывает, что возникающие при этом параметрические колебания в системе являются основной причиной несоответствия результатов экспериментальных и известных теоретических исследований [3] прошивных станов. Однако необходимо отметить, что в силу того, что дифференциальные уравнения движения масс механической системы, цепи разворота валков в барабанах и других элементах рабочей клетки вследствие наличия периодической составляющей силы реакций в опорах имеют гармонические коэффициенты, то системе присущи определенные чередующиеся области параметрической устойчивости системы.

Для сравнительного анализа динамических моделей исходной механической системы переходим к исследованию динамической модели линии привода рабочих валков прошивного стана ТПА с применением ИТ-технологий. Для исследования динамики силовой линии прошивного стана воспользуемся программным продуктом Solid Works IT Simulation X. Модель главного привода рабочих валков прошивного стана ТПА с универсальными шпинделями типа «Карданный вал» представлена упрощенной расчетной схемой в виде трех масс J_1 ; J_c и J_2 , соединенных между собой упругими звеньями c_{12} и c_{23} и демпфирующими элементами b_1 и b_2 (рис. 6).

Передаточные элементы шарниров шпинделя отражают неравномерность хода в соединениях элементов главного привода прошивного ста-

на. С учетом принятых условий привод рабочих валков прошивного стана моделируется соответствующими инерционными элементами, узлами типа «пружина – демпфер» и передаточными элементами шарниров шпинделя переменной структуры.

Формируем исходные данные для исследования, выбираем пример расчета главного привода рабочих валков с универсальными шпинделями прошивного стана ТПА 350. Для исследования главного привода рабочих валков прошивного стана ТПА 350 исходные данные сформированы в соответствии с требованиями встроенной в программный продукт Solid Works IT Simulation X динамической модели «Карданный вал». В результате численного расчета получены: характер изменения углового перемещения карданного вала, угловой скорости карданного вала, углового ускорения карданного вала и крутящий момент на месте соединения карданного вала шпинделя главного привода с рабочими валками прошивного стана ТПА 350.

Параметры устойчивого функционирования элементов силовой линии и рабочих валков прошивного стана ТПА в этом случае определяются на основе известных предпосылок математической теории параметрической устойчивости и асимптотических методов исследования дифференциальных уравнений (1). В зависимости от режимов эксплуатации прошивных станов, величины угла подачи и пространственного расположения элементов шпиндельного устройства главной трансмиссии из системы дифференциальных уравнений (1) можно определить области параметрической устойчивости системы. Напри-

Рис. 5. Динамика линии привода прошивного стана № 1 ТПА 350 (заготовка сталь 13ГМФ, диам. 250 мм – готовая труба 325×15,9 мм) $n = 60$ об./мин)

Рис. 6. Адаптивная и динамическая модель привода рабочих валков прошивного стана ТПА со шпинделями типа «Карданный вал» (на примере расчета Cardan Shaft)

мер, при прошивке труб из заготовок диаметром 250 мм на прошивном стане № 1 ТПА 350 с учетом требуемой модернизации оборудования главного привода и рабочей клетки технологическим процессом предусмотрена установка угла подачи рабочих валков $10^{\circ}30' \dots 12^{\circ}30'$.

Оценку динамического состояния прошивного стана № 1 ТПА 350 на основе исследования трехмассовой динамической модели привода рабочих валков далее удобно производить путем построения амплитудно-частотной характеристики механической системы. Для сопоставления полученных результатов сравниваем поведение компьютерной модели с аналитической моделью силовой линии прошивного стана ТПА с универсальными шпинделями типа «Карданный вал».

Полученные результаты указывают на достоверность принятых моделей силовой линии прошивного стана ТПА.

Применением рекомендуемых величин угла подачи ($9^{\circ}30' \dots 12^{\circ}30'$) и соответствующей частоты вращения главного привода (60...120 об./мин) на прошивном стане № 1 ТПА 350 может быть достигнуто заметное снижение уровня неравномерности хода валков механической системы и уровня динамических процессов, что приводит к повышению качества гильз. В этом случае одновременно наблюдается снижение уровня динамичности элементов силовой линии и всех базовых механизмов прошивного стана № 1 ТПА.

Экспериментальное исследование хода рабочих валков прошивного стана № 1 ТПА 350 посредством энкодеров (резолверов), установленных на их осях, и регистрирующей аппаратуры на базе автоматических цифровых преобразователей (АЦП) представлены на рис. 7.

Рис. 7. Замеры хода рабочих валков прошивного стана № 1 ТПА 350:

1, 2 – энкодеры (резолверы), установленные на осях рабочих валков, 3 – регистрирующая аппаратура на базе цифровых преобразователей

Результаты обработки угловых скоростей рабочих валков прошивного стана № 1 ТПА 350 представлены на осциллограмме (рис. 8).

Из рис. 8 видно, что угловые скорости рабочих валков прошивного стана № 1 ТПА 350 носят знакопеременный характер и существенно отличаются как по амплитудам, так и по фазам. Это приводит к неравномерности распределения полей скоростей по всему очагу деформации при прошивке трубной заготовки и образованию введенной разностенности гильзы [2; 10].

Рис. 8. Осциллограмма угловых скоростей рабочих валков прошивного стана № 1 ТПА 350:

1 – угловая скорость первого валка;
2 – угловая скорость второго валка

Экспериментальными исследованиями силовой линии и характерных условий функционирования рабочей клетки прошивного стана № 1 ТПА 350 установлено, что угол подачи рабочих валков целесообразно выдерживать в пределах $9^{\circ}30' \dots 10^{\circ}30'$.

Подчеркнем то, что дальнейшее увеличение углов подачи рабочих валков и повышение частоты вращения линии привода требует введения дополнительных мер (например, использования конструкции шпинделей с возможностью регулирования передаточного отношения) по стабилизации уровня динамичности тяжело нагруженной механической системы «линия привода – рабочий валок – трубная заготовка». Опыт эксплуатации двух прошивных станов ТПА 350 указывает на необходимость установки и в дальнейшем надежной фиксации рабочих валков с барабанами в проемах станины стана в пределах требуемой величины угла подачи соответствующими механизмами.

Регулирование неравномерности вращения привода валков рабочей клетки прошивного стана № 1 осуществляется путем модернизации шарнирных узлов телескопических универсальных шпинделей со стороны рабочих валков. Узлы шарниров шпинделей стана выполнены в виде съемных элементов, а именно полумуфт и вилок

с корончатыми зубьями на торцах, имеющих возможности дискретного поворота по отношению друг к другу (рис. 9).

Отметим, что с неприводной стороны рабочие валки прошивного стана оснащены соответствующими датчиками угловой скорости типа тахогенераторы или более современными датчиками (энкодерами, резолверами) (рис. 7).

После модернизации механической системы настройка устойчивого рабочего хода привода валков рабочей клетки прошивного стана ТПА осуществляется следующим образом. На холостом ходу прошивного стана (без трубной заготовки) производится запись угловой скорости соответствующих вращений валков. При выявлении

рассогласования в угловых скоростях вращения валков производится настройка хода главного привода прошивного стана путем дискретного поворота вилок шарнира одного из шпинделей по ходу вращения до полного устранения рассогласования угловых скоростей вращения рабочих валков. Далее производится прошивка трубной заготовки, выполняется контрольная запись угловых скоростей вращения валков под технологической нагрузкой и последующая толщинометрия труб после прошивки трубной заготовки на прошивном стане № 1. При необходимости аналогичным образом производится более тонкая настройка хода самого привода и рабочих валков прошивного стана.

Рис. 9. Модернизированный универсальный шпindel прошивного стана № 1 ТПА 350 с возможностью регулировки неравномерности хода

Выводы

1. Составлены дифференциальные уравнения движения элементов силовой линии прошивного стана ТПА с учетом изменения во времени пространственного расположения и передаточного отношения карданной передачи силовой линии и величины угла подачи рабочих валков. Приведено численное решение системы дифференциальных уравнений движения силовой линии прошивного стана ТПА.

2. Проведено исследование динамической модели линии привода рабочих валков прошивного

стана № 1 ТПА на базе программного продукта Solid Works IT Simulation X «Карданный вал». При этом динамическая модель главного привода прошивного стана № 1 ТПА с универсальными шпинделями представлен в виде трех масс J_1 ; J_c и J_2 , соединенных между собой упругими звеньями c_{12} и k_{23} с демпфирующими элементами b_1 и b_2 . Путем моделирования динамических процессов определены области устойчивости функционирования механической системы в зависимости от режимов эксплуатации стана, величины угла подачи трубной заготовки в рабочие валки и про-

странственного расположения элементов шпиндельного устройства силового прошивного стана.

3. Показано, что параметрические угловые колебания элементов главного привода механической системы являются одной из причин несоответствия результатов экспериментальных и теоретических исследований прошивных станов. Установлены условия возникновения неравномерности хода рабочих валков и механизм порождения наведенной разностенности прокатываемых труб.

4. Определены области устойчивого (рационального) функционирования линии привода рабочих валков прошивного стана ТПА путем исследования различных динамических моделей механической системы. Для регулирования неравномерности хода рабочих валков предложена схема модернизации шарнирных узлов универсальных шпинделей главного привода прошивных станов ТПА.

5. Результаты работы применимы на аналогичных станах винтовой прокатки.

Библиографический список / References

1. Соловейчик П. М. Трубопрокатные агрегаты с автомат станом / П. М. Соловейчик. – М.: Металлургия, 1967. – 160 с.

Soloveychik P. M. *Truboprokatnye agregaty s avtomat stanom*. Moscow, Metallurgiya, 1967, 160 p.

2. Данченко В. Н. Технология трубного производства: учебник для вузов / В. Н. Данченко, А. П. Коликов, Б. А. Романцев, С. В. Самусев. – М.: Интермет-Инжиниринг, 2002. – 640 с.

Danchenko V. N., Kolikov A. P., Romantsev B. A., Samusev S. V. *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva*. Moscow, Intermet-Inzhiniring, 2002, 640 p.

3. . Потапов И. Н. Новая технология винтовой прокатки / И. Н. Потапов, П. И. Полухин. – М.: Металлургия, 1975. – 343 с.

Potapov I. N., Polukhin P. I. *Novaya tekhnologiya vintovoy prokatki*. Moscow, Metallurgiya, 1975, 343 p.

4. Мандельштам Л. И. Лекции по теории колебаний / Л. И. Мандельштам. – М.: Наука, 1972. – 470 с.

Mandel'shtam L. I. *Lektsii po teorii kolebaniy*. Moscow, Nauka, 1972, 470 p.

5. Иванченко Ф. К. Динамика и прочность металлургического оборудования / Ф. К. Иванченко, П. И. Полухин, М. А. Тылкин и др. – М.: Металлургия, 1970. – 488 с.

Ivanchenko F. K., Polukhin P. I., Tylkin M. A. *Dinamika i prochnost' metallurgicheskogo oborudovaniya*. Moscow, Metallurgiya, 1970, 488 p.

6. Кожевников С. Н. Карданные передачи / С. Н. Кожевников, П. Д. Перфильев. – Киев: Техника, 1978. – 263 с.

Kozhevnikov S. N., Perfil'ev P. D. *Kardannye peredachi*. Kiev, Tekhnika, 1978, 263 p.

7. Кожевников С. Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / С. Н. Кожевников. – К.: Наукова думка, 1986. – 286 с.

Kozhevnikov S. N. *Dinamika nestatsionarnykh protsessov v mashinakh*. Kiev, Naukova dumka, 1986, 286 p.

8. Пановко Я. Г. Основы прикладной теории упругих колебаний / Я. Г. Пановко. – М.; Л.: ГНТИ, 1957. – 546 с.

Panovko Ya. G. *Osnovy prikladnoy teorii uprugikh kolebaniy*. Moscow, Leningrad, GNTI, 1957, 546 p.

9. Вышинский В. Т. Исследование и особенности упрощения динамических моделей рядных механических цепей / В. Т. Вышинский // Теория и практика металлургии. – 1999. – № 6. – С. 35–37.

Vyshinskiy V. T. *Issledovanie i osobennosti uproshcheniya dinamicheskikh modeley ryadnykh mekhanicheskikh tsepey*. Teoriya i praktika metallurgii. 1999, no. 6, pp. 35–37.

10. Столетний М. Ф. Точность труб / М. Ф. Столетний, Е. Д. Клемперт. – М.: Металлургия, 1975. – 239 с.

Stoletniy M. F., Klempert E. D. *Tochnost' trub*. Moscow, Metallurgiya, 1975, 239 p.

Мета. Проведення досліджень, спрямованих на вибір раціональних режимів прошивки трубної заготовки шляхом стабілізації динамічних характеристик силової лінії привода важконавантажених прошивних станів ТПА.

Методика. Розглянуто динаміку силової лінії прошивного стану трубопрокатного агрегату (ТПА) з урахуванням особливостей поведінки шарнірів шпинделя і механізму установки робочих валків.

Результати. Складено диференціальне рівняння руху лінії головного привода прошивного стану і наведено його чисельне рішення. Розглянуто адаптовану тримасову динамічну модель системи і отримано рішення задачі із застосуванням програмного продукту Solid Works IT Simulation X. Сформульовано основні умови виникнення нестійких динамічних явищ у силовій лінії і механізмі установки робочих валків прошивного стану. Показано, що нестабільна динаміка системи є однією з основних причин невідповідності результатів відомих теоретичних, експериментальних досліджень і товщинометрії труб на прошивних станах ТПА 350.

Наукова новизна. Встановлено головні причини виникнення параметричних коливань у приводі робочої кліті прошивного стану, механізм установки робочих валків у зв'язку з механізмом утворення різностінності труб. Визначено ділянки стійкості функціонування системи залежно від режимів експлуатації та кута подачі робочих валків з урахуванням просторового положення елементів шпиндельного пристрою. Сформовано необхідні і достатні стійкі умови спільного сталого функціонування елементів силової лінії прошивного стану.

Практична значущість. Для стабілізації процесів прошивки трубної заготовки запропоновано схему

модернізації шпинделів головного приводу і механізму установки робочих валків прошивного стану № 1 ТПА 350. Результати роботи застосовні на аналогічних станах гвинтової прокатки.

Ключові слова: прошивка, заготівля, стан, труба, нерівномірність ходу, різностінність, динаміка, привід, валок, коливання, шпиндель, кардан, шарнір, момент інерції, жорсткість, барабан, механізм установки, стійкість.

Purpose. Conducting research aimed at choosing the rational modes of flashing the tubular billet by stabilizing the dynamic characteristics of the drive power line of heavy duty piercing mills TPA.

Methodology. The dynamics of the power line of the piercing mill of the pipe-rolling unit (TPA) is considered, taking into account the peculiarities of the behavior of the spindle hinges and the mechanism for setting the work rolls.

Findings. The differential equation of motion of the line of the main drive of the piercing mill is composed and its numerical solution is given. An adapted three-mass dynamic model of the system is considered and a solution is obtained using the software Solid Works IT Simulation X. The basic conditions for the occurrence of unstable dynamic phenomena in the field line and the installation mechanism of the piercing mill rolls are formulated. It is shown that the unstable dynamics of the system is one of the main reasons for the discrepancy between the results

of well-known theoretical, experimental studies and pipe thickness measurement at TPA 350 piercing mills.

Originality. The main causes of the emergence of parametric oscillations in the drive of the working stand of the piercing mill, the installation mechanism of the work rolls in connection with the mechanism of formation of the thin-wall thickness of pipes are established. The areas of stability of the system's functioning are determined depending on the operating modes and the angle of feed of the work rolls, taking into account the spatial position of the elements of the spindle device. The necessary and sufficient stable conditions for the joint stable functioning of the power line elements of the piercing mill are formed.

Practical value. To stabilize the processes for flashing the tubular billet, a scheme has been proposed for upgrading the spindles of the main drive and the mechanism for installing the work rolls of the piercing mill No. 1 of TPA 350. The results are applicable to similar helical rolling mills.

Key words: firmware, billet, mill, pipe, uneven stroke, varying thickness, dynamics, drive, roll, oscillations, spindle, cardan, hinge, moment of inertia, rigidity, drum, installation mechanism, stability

Рекомендована к публикации
д. т. н. В. Ф. Балакиным

Поступила 25.03.2019