

С. Р. Рахманов /к. т. н./
Национальная металлургическая академия
Украины

В. Н. Чернов, В. М. Струс, Д. Ю.
Гармашов /к. т. н./
ИНТЕРПАЙП НИКО-ТЬЮБ

К вопросу стабилизации процессов прошивки трубной заготовки путем модернизации главного привода стана винтовой прокатки труб

Построена динамическая модель главного привода стана винтовой прокатки труб с учетом особенностей поведения шарниров шпинделя и механизма установки рабочих валков. Составлено дифференциальное уравнение движения линии главного привода прошивного стана и приведено его численное решение. Рассмотрена модель системы с применением программного продукта Solid Works IT Simulation X. Сформулированы основные условия возникновения динамических явлений в линии привода и механизме установки рабочих валков прошивного стана. Показано, что нестабильная динамика системы является одной из основных причин несоответствия результатов известных теоретических и экспериментальных исследований станом винтовой прокатки труб. Установлены главные причины возникновения параметрических колебаний в приводе рабочей клетки стана винтовой прокатки труб, механизме установки рабочих валков в связи с образованием разностенности труб. Определены области устойчивости функционирования системы в зависимости от режимов эксплуатации и угла подачи рабочих валков с учетом пространственного положения элементов шпиндельного устройства. Получены необходимые и достаточные устойчивые условия совместного устойчивого функционирования элементов приводной линии. Для стабилизации процессов прошивки трубной заготовки предложена схема модернизации элементов главного привода и механизма установки угла подачи рабочих валков. (Ил. 10. Табл. 1. Библиогр.: 4 назв.)

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

The dynamic model of the main drive of a camp of screw rolling of pipes taking into account features of behavior of hinges of a spindle and the mechanism of installation of working rolls is constructed. It is made differential the equations of the movement of the line of the main drive of a parsing camp and his numerical decision is provided. The model of system with use of the Solid Works IT Simulation X software product is considered. The main conditions of emergence of the dynamic phenomena in the line of the drive and the mechanism of installation of working rolls of a parsing camp are formulated. It is shown that unstable dynamics of system is the main reason for discrepancy of results of the known theoretical and pilot studies of camps of screw rolling of pipes. The main reasons of emergence of parametrical fluctuations are installed in the drive of a working cage of a camp of screw rolling of pipes, the mechanism of installation of working rolls and formations of a of pipes. Areas of stability of functioning of system depending on the modes of operation and the angle of giving of working rolls taking into account the spatial provision of elements of the spindles device are defined. Necessary and sufficient steady conditions of joint steady functioning of elements of the driving line are received. For stabilization of processes of an insertion of pipe preparation the scheme of modernization of elements of the main drive and mechanism of installation of an angle of giving of working rolls is offered.

Key words: *unevenness of the course, dynamics, drive, roll, fluctuations, spindle, hinge, Cardan, insertion, preparation, camp, pipe, inertia moment, rigidity, drum, installation mechanism, stability.*

Введение

Повышение производительности современных трубопрокатных агрегатов (ТПА) сдерживается уровнем скоростных и силовых режимов прошивки трубных заготовок на станах винтовой прокатки труб.

Режимы прошивки трубных заготовок на тягелонагруженных станах винтовой прокатки труб представляют собой многофакторную комплексную задачу взаимосвязи процессов прошивки и машины для ее реализации [1; 2]. В мировой и отечественной практике производ-

ства бесшовных труб неоднократно предпринимались попытки увеличения темпов работы приводов станом винтовой прокатки. Следует отметить, что при этом данные процессы, как правило, сопровождаются не только существенным повышением динамических нагрузок, но и заметным снижением устойчивости процесса прокатки бесшовных труб [3].

Результаты исследования динамики станом винтовой прокатки труб, которые в большинстве своем в несколько иной постановке учитывают влияние элементов привода, и изменения

угла подачи рабочих валков на процессы прошивки трубной заготовки обобщены и представлены в работе [1].

В силу изложенного проведение исследований, направленных на выбор рациональных режимов эксплуатации и стабилизацию динамических характеристик линии привода тяжело-нагруженных станов винтовой прокатки труб, представляется весьма актуальными.

Постановка задачи

Для установления одного из механизмов образования разностенности прошиваемых гильз и влияния главного привода стана (стана винтовой прокатки труб) на процесс прошивки трубной заготовки проведем предварительный анализ конструкции данной механической системы.

Привод валков рабочей клетки стана винтовой прокатки труб включает электродвигатель с главной муфтой 1, шестеренную клетку-редуктор 2, универсальные телескопические шпиндели 3 на базе стационарных карданных шарниров и рабочие валки 4, установленные в барабанах механизма установки валков и станины стана 5. Угол подачи рабочих валков устанавливается механизмом разворота барабанов 6. Верхняя линейка 7 и нижняя линейка 8 удерживают, соответственно, трубную заготовку и оправку на оси прокатки. Угловая скорость рабочих валков определяется тахогенераторами 9 (рис. 1) [2; 3].

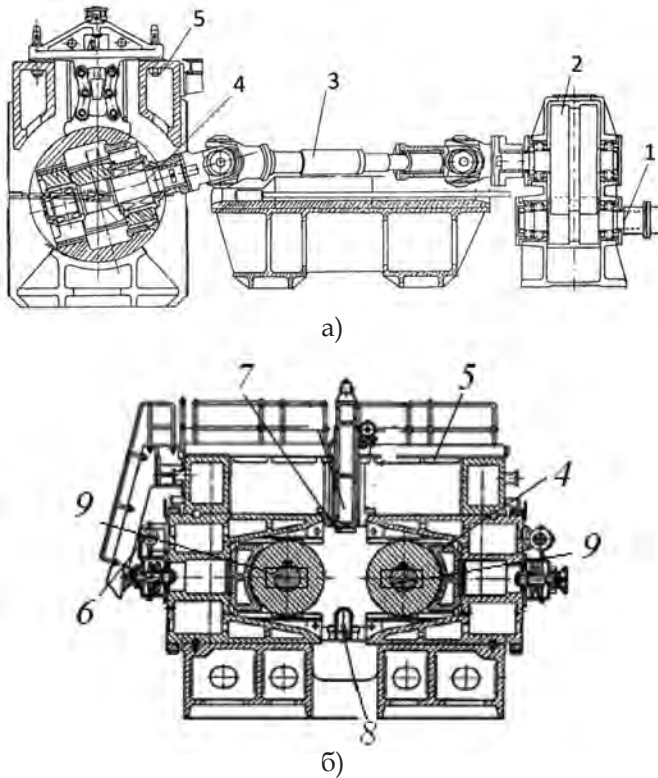


Рис. 1. Главный привод (а) и рабочая клетка (б) прошивного стана ТПА

Заметим, что фиксация рабочих валков в пределах требуемого угла подачи по существующей схеме их монтажа в рабочей клетке недостаточна. Характерно, что не исключена возможность возбуждения колебаний в цепи трансмиссии главного привода. Возникают 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 реакций соответственно в шарнирах шпинделя и подшипниковых опорах рабочих валков. Угловая скорость вращения приводных элементов обладает определенной степенью наведенной неравномерности, вследствие наличия в цепи привода рабочих валков шпинделя на основе карданной передачи [1; 4]. Известно, что изменение скорости прокатки в осевом направлении зависит от изменения составляющей относительной скорости и угла наклона рабочего валка. Отметим, что при реализации технологического процесса прошивки трубной заготовки сила сопротивления периодически изменяется, 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 сопротивления изменяется величина угловой скорости привода $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ и соответственно угла подачи рабочих валков периодически на некоторую величину $\Delta\beta$.

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 исследования (сопоставимые данные отчета ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЮБ») представлены на рис. 2–4.

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 неустойчивый периодический характер динамических явлений в линии главного привода и некоторые причины возникновения неравномерности хода рабочих валков на прошивных станах ТПА 350.

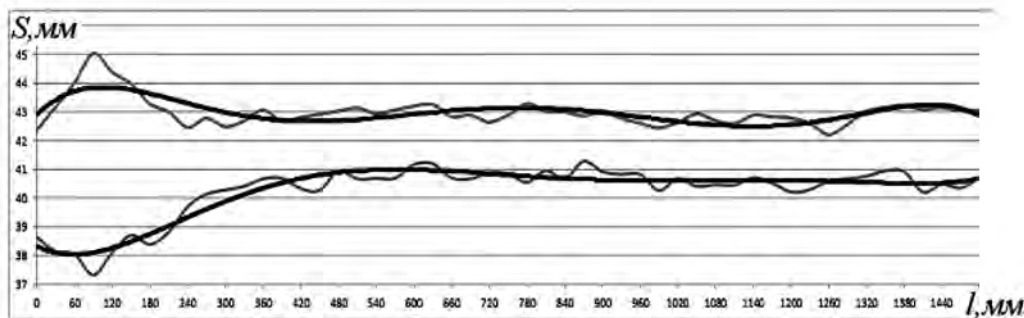


Рис. 2. Толщинометрия (продольная разностенность) патрубка трубы-гильзы после первого прошивного стана ТПА 350 (заготовка сталь 13ГМФ, диаметр 250 мм – готовая труба 325×15,9 мм)

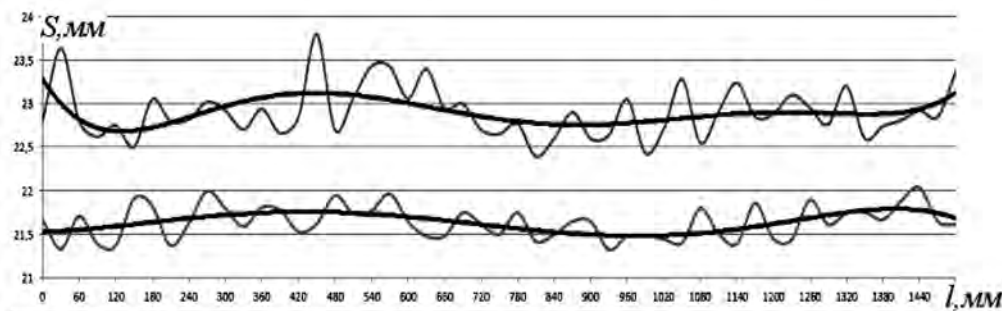


Рис. 3. Толщинометрия (продольная разностенность) патрубка трубы-гильзы после второго прошивного стана ТПА 350 (заготовка сталь 13ГМФ, диаметр 250 мм – готовая труба 325×15,9 мм)

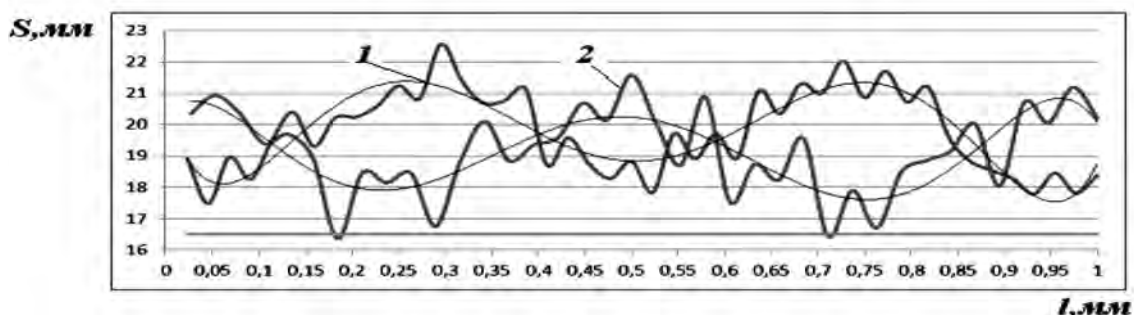


Рис. 4. Толщинометрия (поперечная разностенность) патрубка трубы-гильзы после второго прошивного стана ТПА 350 (заготовка сталь 13ГМФ, диаметр 250 мм – готовая труба 325×15,9 мм)

Метод решения задачи

Далее переходим к исследованию влияния динамики привода рабочих валков 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 барабане рабочей клетки. При этом необходимо и достаточно проверить выполнение условия ухода всей механической системы от параметрического резонанса. При этом величина критической угловой скорости валков и частота колебаний механизма установки барабана с валками должны подчиняться условию:

$$\omega_{кр} = \sqrt{C/I} \gg \frac{d\varphi}{dt} \tag{1}$$

где I и C – соответственно, момент инерции масс системы и крутильная жесткость линии

разворота валков совместно с барабаном в рабочей клетки; $\varphi(t)$ – закон вращательного движения ведомого вала шпиндельного устройства главного привода стана.

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, возникающий в плоскости, перпендикулярной к угловой скорости поворота оси валка, приводит к циклическому изменению давления металла на рабочие валки и крутящего момента привода. 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, со-

ответствующий гироскопическому моменту рабочих валков амплитуды δM [1; 4]. 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.

Уравнение движения элементов главного привода прошивного стана содержит характерное возмущение (правая часть) с частотой, совпадающей с частотой периодических коэффициентов левой части уравнения, что оказывает определяющее значение на возникновение неустойчивого решения, растущего со временем. Это, в свою очередь, приводит к нарушению устойчивости процесса прошивки заготовок. Тогда уравнение вращательного движения элементов главного привода стана, содержащее шпиндельное устройство с карданными шарнирами переменной структуры, имеет вид:

$$(I_0 + I_1 i^2) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + I_1 i \frac{di}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = M_\partial - M_c - \delta M i, \quad (2)$$

где I_0 – приведенный к ведущему валу момент инерции масс привода; I_1 – момент инерции рабочих валков, приведенный к ведомому валу; M_∂ – движущий момент главного привода, линейно зависящий от угловой скорости $\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}$; i – переменное в течение цикла передаточное отношение пространственного шпиндельного устройства.

Передаточное отношение пространственной карданной передачи шпиндельного устройства главного привода, согласно [4], определяется:

$$i = AB \left(1 + tg^2(\varphi) \right) / \left[A^2 tg^2(\varphi) + (B + C tg^2(\varphi))^2 \right], \quad (3)$$

где

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

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

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

Здесь γ_1, γ_2 – угол между ведущим валом и промежуточным и угол между промежуточным и ведомым соответственно, $\gamma_j \leq 20^\circ, j = 1, 2$; $\theta_{ш}$ – угол, 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 (рис. 5).

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

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

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

$$i = 1 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos(2\varphi) + \varepsilon_3 \sin(2\varphi). \quad (4)$$

Движущий момент главного привода в основном определяется естественной механической характеристикой электродвигателя главного привода стана. Механическая характеристика для электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения определяется в виде:

$$M_\partial = M_\partial^0 - k \left(\omega_0 - \frac{d\varphi}{dt} \right), \quad (5)$$

где ω_0 – угловая скорость идеального холостого хода главного привода прошивного стана; k – тангенс угла наклона статической характеристики двигателя к оси вектора угловой скорости.

После подстановок и преобразований уравнение (1) приводится к следующему параметрическому виду:

$$\left\{ I_0 + I_1 \left[1 - 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + 2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos(2\varphi) + 2\varepsilon_3 \sin(2\varphi) \right] \right\} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + I_1 \left[-2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \sin(2\varphi) + 2\varepsilon_3 \cos(2\varphi) \right] \frac{d\varphi}{dt} + k \left(\frac{d\varphi}{dt} - \omega_0 \right) = \delta M \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos(2\varphi) + \varepsilon_3 \sin(2\varphi) \right]. \quad (6)$$

Дифференциальное уравнение движения линии привода рабочих валков (6) в данном случае определенно отличается от известного параметрического уравнения Матье, поскольку периодические коэффициенты не малы. Исследование дифференциального уравнения (6) по-



Рис. 5. Расчетная схема главного привода прошивного стана ТПА с возможными отклонениями элементов привода и рабочего валка от проектных положений

звляет установить некоторые основные причины возникновения параметрических колебаний оси рабочего валка, которые, в свою очередь, существенно влияют на динамику главного привода прошивного стана (винтовой прокатки труб) (рис. 6).

Анализ полученных результатов показывает, что возникающие при этом параметрические колебания в системе являются основной причиной несоответствия результатов экспериментальных и известных теоретических исследований [1; 4] станов винтовой прокатки труб. Однако необходимо отметить, что в силу того, что дифференциальное уравнение движения масс цепи разворота валка, вместе с барабаном и другими элементами рабочей клетки, вследствие наличия периодической составляющей силы реакций в шарнирных опорах имеют гармонические коэффициенты, то системе присущи определенные чередующиеся области параметрической устойчивости системы.

Переходим к исследованию уточненной динамической модели линии привода рабочих валков прошивного стана ТПА. Для исследования динамики крутильной системы главного

привода 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 k_1 и k_2 и демпфирующими элементами b_1 и b_2 (рис. 7).

Передаточные элементы шарниров шпинделя отражают неравномерность хода в соединениях элементов главного привода прошивного стана. С учетом принятых условий привод рабочих валков прошивного стана моделируется соответствующими инерционными элементами, узлами типа «пружина – демпфер» и передаточными элементами шарниров шпинделя переменной структуры. Принципиальная схема типа «Карданный вал» и динамическая модель главного привода рабочих валков прошивного стана ТПА с универсальными шпинделями приведена на рис. 8.

Формируем исходные данные для исследования выбираем согласно [1, 3]. В качестве примера рассматриваем расчет главного привода ра-

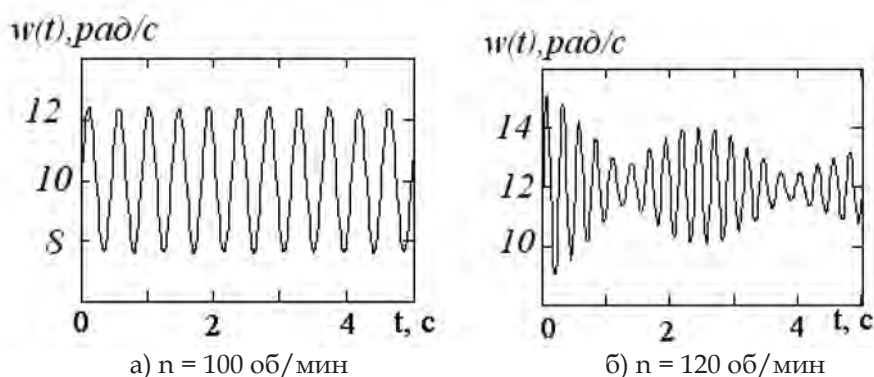


Рис. 6. Динамика линии привода прошивного стана ТПА 350: $n=100...120$ об/мин; $\gamma_1 = 7^\circ$; $\gamma_2 = 4^\circ$; $\theta_p = 8^\circ$; $\psi_p = 12^\circ$

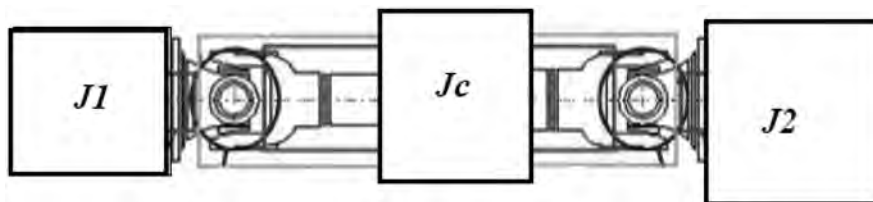


Рис. 7. Модель главного привода рабочих валков прошивного стана ТПА со шпинделями типа «Карданный вал» (на примере Cardan Shaft)

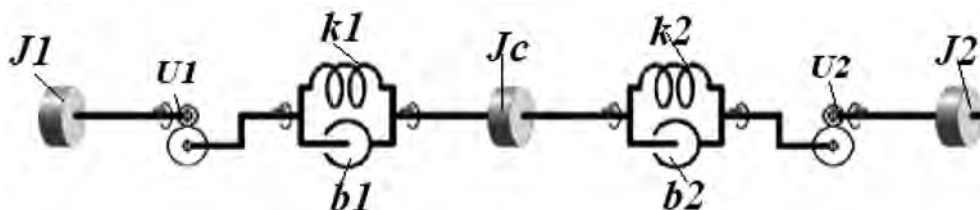


Рис. 8. Динамическая модель привода рабочих валков прошивного стана ТПА со шпинделями типа «Карданный вал»

ТРУБНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

бочих валков с универсальными шпинделями прошивного стана ТПА 350. Для исследования главного привода рабочих валков прошивного стана ТПА 350 исходные исходные параметры системы 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.

Оценку динамического состояния прошивного стана на основе исследования динамической модели привода рабочих валков далее удобно производить путем построения амплитудно-частотной характеристики механической системы.

Расчетные величины собственных частот и форм колебаний модели динамической системы линии главного привода прошивного стана ТПА 350 представлены в табл. 1.

Параметры устойчивого функционирования элементов многомассовой приводной линии и рабочих валков прошивного стана трубопрокатного агрегата в этом случае определяются на основе известных предпосылок математической теории параметрической устойчивости и асимптотических методов исследования дифференциальных уравнений. В зависимости от режимов эксплуатации станом, величины угла подачи и пространственного расположения элементов шпиндельного устройства главной трансмиссии из уравнения (5) определены области параметрической устойчивости системы. Например, в настоящее время при прошивке труб из заготовок диаметром 250 мм на прошивном стане ТПА 350, с учетом модернизации оборудования главного привода и рабочей клетки, тех-

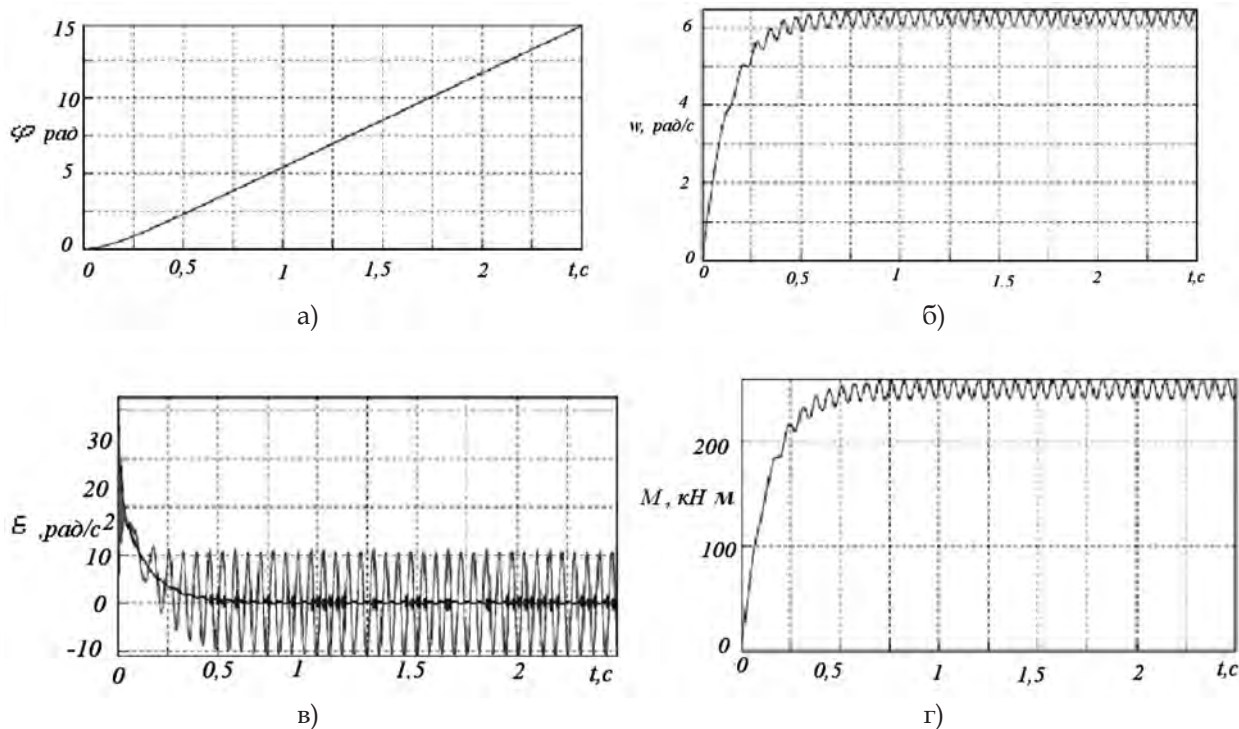


Рис. 9. Угловое перемещение карданного вала (а), угловая скорость карданного вала (б), угловое ускорение карданного вала (в) и крутящий момент на выходе карданного вала шпинделя привода (г) прошивного стана ТПА 350

Таблица 1

Собственные частоты и формы колебаний динамической модели

No.	Value	f [Hz] (undamped)	f [Hz] (damped)	D [-]	Time Constant [s]
f1	-0.11061±0.058399 i	0.019907	0.0092945	0.88432	9.0407
f2	-113.44±559.18 i	90.809	88.996	0.19882	0.0088153
f3	-600.21±1342.2 i	234.01	213.62	0.40822	0.0016661
f4	-314.83±1832.4 i	295.91	291.64	0.16933	0.0031763

нологическим процессом предусмотрена установка угла подачи рабочих валков $8^{\circ}30' \dots 11^{\circ}30'$.

Применением рекомендуемых величин угла подачи ($9^{\circ}30' \dots 10^{\circ}30'$) и соответствующей частоты вращения главного привода (80...110 об/мин) на первом прошивном стане ТПА может быть достигнуто заметное снижение уровня неравномерности хода механической системы и уровня динамических процессов, что приводит к повышению качества гильз. В этом случае одновременно наблюдается существенное снижение уровня динамичности элементов линии привода прошивного стана ТПА и всех механизмов системы удержания оправки.

Экспериментальными исследованиями главного привода и характерных условий функционирования рабочей клетки прошивного стана ТПА 350 установлено, что угол подачи рабочих валков целесообразно выдержать 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 регулировки передаточного отношения) по стабилизации уровня динамичности тяжелонагруженной механической системы «линия привода – рабочий валок – трубная заготовка». Опыт эксплуатации двух прошивных станков 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 хода привода валков рабочей клетки стана винтовой прокатки труб с универсальными телескопическими шпинделями осуществляется путем модернизации шарнирных узлов карданной передачи шпинделей со стороны рабочих валков. Узлы

шарниров шпинделей главного привода стана выполнены в виде съемных элементов, а именно полумуфт 2 и вилок 1 с корончатыми зубьями на торцах, имеющих возможности дискретного поворота по отношению друг – другу (рис. 10). Отметим, что с неприводной стороны рабочие валки прошивного стана оснащены соответствующими датчиками угловой скорости типа тахогенератор или более современными датчиками.

После модернизации механической системы настройка устойчивого рабочего хода привода валков рабочей клетки прошивного стана ТПА осуществляется следующим образом.

На холостом ходу стана (без трубной заготовки) производится запись угловой скорости вращения валков соответствующих ветвей привода рабочих валков. При выявлении рассогласования в угловых скоростях вращения валков производится настройка хода главного привода прошивного стана путем дискретного поворота вилок шарниров шпинделей по ходу вращения до полного устранения рассогласования угловых скоростей вращения рабочих валков стана. Далее производится контрольная прошивка трубной заготовки, выполняется запись угловых скоростей вращения валков под технологической нагрузкой. При необходимости аналогичным образом производится более тонкая настройка хода привода и рабочих валков стана.

Выводы

1. Составлено дифференциальное уравнение движения линии привода стана винтовой прокатки труб с учетом переменности передаточного отношения и пространственного расположения карданной передачи и величины угла подачи рабочих валков.

2. Проведено исследование уточненной динамической модели линии привода рабочих валков прошивного стана ТПА на базе программного продукта Solid Works IT Simulation X «Кар-

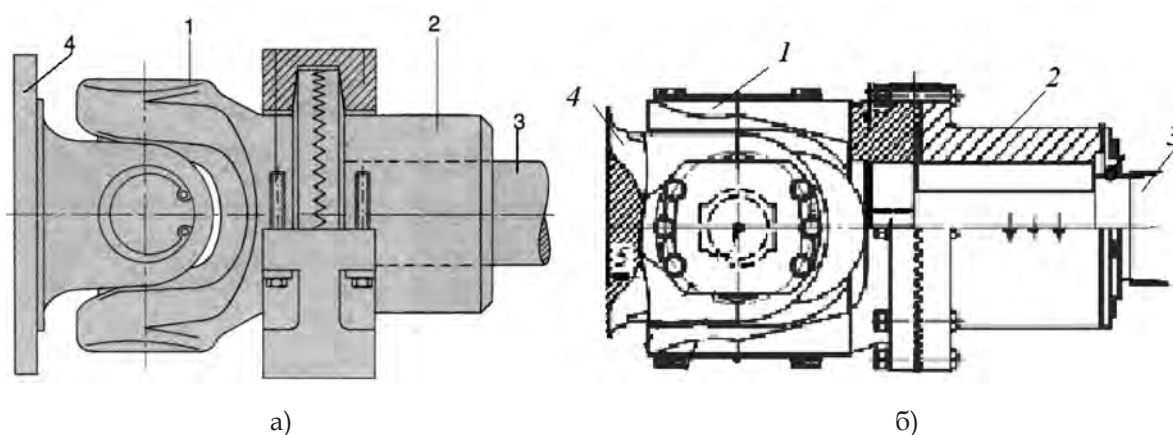


Рис. 10. Адаптивная модель (а) и модернизированный шарнирный узел (б) универсального шпиндельного устройства прошивного стана ТПА с возможностью относительного поворота вилок

данный вал». При этом главный привод прошивного стана ТПА с универсальными шпинделями представлен в виде трех масс J_1 ; J_c и J_2 , соединенных между собой упругими звеньями k_1 и k_2 и демпфирующими элементами b_1 и b_2 .

Путем моделирования динамических процессов определены области устойчивости функционирования системы в зависимости от режимов эксплуатации стана, величины угла подачи трубной заготовки в рабочие валки стана и пространственного расположения элементов шпиндельного устройства главного привода стана.

3. Показано, что параметрические угловые колебания элементов главного привода системы являются одной из причин несоответствия результатов экспериментальных и теоретических исследований станов винтовой прокатки труб [1].

Установлены ряд условий возникновения неравномерности хода рабочих валков и порождения разностенности прокатываемых труб.

4. Определены области устойчивого (рационального) функционирования линии привода рабочих валков прошивного стана путем исследования динамических моделей механической системы.

Для регулирования неравномерности хода рабочих валков предложена схема модернизации шарнирных узлов карданной передачи универсальных шпинделей главного привода прошивных станов ТПА.

5. Результаты работы применимы на аналогичных станах винтовой прокатки.

Библиографический список

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

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.

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

4. Кожевников С. Н. Карданные передачи / С. Н. Кожевников, П. Д. Перфильев. – К.: Техніка, 1978. – 263 с.

Поступила 26.05.2016

