

Рахманов С. Р.

Зданевич С. С.

Поворотний В. В.

*Национальная
металлургическая
академия Украины*

Rakhmanov S. R.

Zdanevich S. S.

Povorotnyy V. V.

*National Metallurgical
Academy of Ukraine*

УДК 621.774. 38

ДИНАМИКА МЕХАНИЗМА УДЕРЖАНИЯ ОПРАВКИ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Рассмотрена задача о колебаниях системы «труба – оправка – стержень» стана холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ). Составлена расчетная схема и дифференциальное уравнение продольных колебаний оправки со стержнем с учетом периодического воздействия со стороны очага деформации и переменности во времени массы рассматриваемой механической системы. Представлено численное решение задачи и анализ нестационарной динамики системы «труба – оправка – стержень». Установлены некоторые особенности динамики механизма удержания оправки стана ХПТ. Предложена конструкция модернизированного роликового центрователя стержня оправки стана ХПТ.

Ключевые слова: пильгерная прокатка, труба, стан ХПТ, динамика, колебания, оправка, стержень, дифференциальное уравнение, переменная масса, продольная жесткость, центрователь стержня, люнет, задача Коши, разностенность труб.

Введение. Технологические процессы формирования холоднокатаных труб, прокатываемых на современных станах холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ), с заданными геометрическими характеристиками и требуемыми свойствами диктуют необходимые и достаточные условия функционирования механизмов поворота и подачи трубной заготовки в очаг деформации стана. Для реализации устойчивых технологических процессов пильгерной прокатки трубной заготовки и в частности стабилизации виброактивности стержня механизма удержания оправки в конструкциях ряда современных станом ХПТ отечественного и зарубежного производства используются многочисленные удерживающие, направляющие, центрирующие, упорные и регулировочные механизмы [1, 2] (рис. 1а).

Постановка задачи. Стержень с оправкой при реализации процесса прокатываемой со стороны трубной заготовки воспринимают значительные статические и изменяющиеся во времени нестационарные динамические нагрузки. Так как стержень механизма оправки имеет значительную гибкость и определенную массу, то в рассматриваемой механической системе возникают значительные по величине и

изменяющиеся во времени нестационарные динамические нагрузки, которые обуславливают его продольные колебания вдоль оси прокатки трубы по соответствующим гармоническим формам. Отметим, что оправка совместно со стержнем механизма ее удержания совершает продольные колебания в очаге деформации в направлении оси прокатки. Рабочий конус оправки уходит от проектного положения калибра, что, зачастую, вызывает ненормированную технологическими инструкциями продольную и поперечную разностенности трубы. Интенсивность периодического воздействия очага деформации на оправку, изменение во времени массы прокатываемой трубы и параметров опорных узлов роликовых центрователей стержня оправки, рядном установленных вдоль оси прокатки, значительно усложняет корректное составление математической модели и анализ динамических процессов.

Пути дальнейшей интенсификации технологического процесса и вопросы повышения качества прокатываемых холоднокатаных труб всемерно диктуют необходимые условия совершенствования конструкций всех базовых механизмов фиксации, удержания стержня на оси прокатки.



Характерно, что настройка рабочего положения оправки в очаге деформации осуществляется соответствующими патронами зажима, поворота, подачи и промежуточными роликовыми центрователями (люнетами), установленными по всей длине рабочего желоба и рам стана ХПТ [3, 4].

Цель работы. Целью работы является формирование научно-обоснованных предложений по совершенствованию конструкции механизма удержания оправки со стороны механизмов подачи трубы-заготовки в очаг деформации стана ХПТ в процессе пильгерной прокатки труб. Данный подход обуславливает детальное исследование влияния различных параметров процесса пильгерной прокатки труб (влияние параметров очага деформации и изменения во времени массы прокатываемой трубы-заготовки) на виброактивность выбранной модели механической системы стана ХПТ и на качество готового изделия.

Метод решения задачи. Далее в работе в качестве объекта исследования рассмотрена развитая динамическая и математическая модели «труба – оправка – стержень» отечественных станов ХПТ и быстроходных зарубежных станов КРВ.

Решение поставленной задачи обуславливает некоторое уточнение выбранной расчетной схемы (рис. 1б) и, в связи с этим, дальнейшее развитие математической модели исследуемой системы «труба – оправка – стержень», наиболее точно отражающей динамические процессы, происходящие в исходной механической системе.

Данная работа отличается от известных [3, 4] комплексным подходом к исследованию периодических динамических процессов с последующим учетом переменных во времени инертных характеристик прокатываемой трубы и изменяющихся во времени технологических нагрузок, действующих на оправку со стороны очага деформации.

Исследование развитой динамической модели «труба – оправка – стержень» стана ХПТ позволяет проанализировать нестационарное динамическое состояние стержневой системы механизма удержания оправки в течение всего цикла прокатки трубной заготовки. Следовательно, на основании вышеизложенного, возможно решить задачу по выработке обоснованных рекомендаций по эксплуатации стана и принятию необходимых технических решений по комплексной модернизации механизмов стана ХПТ.

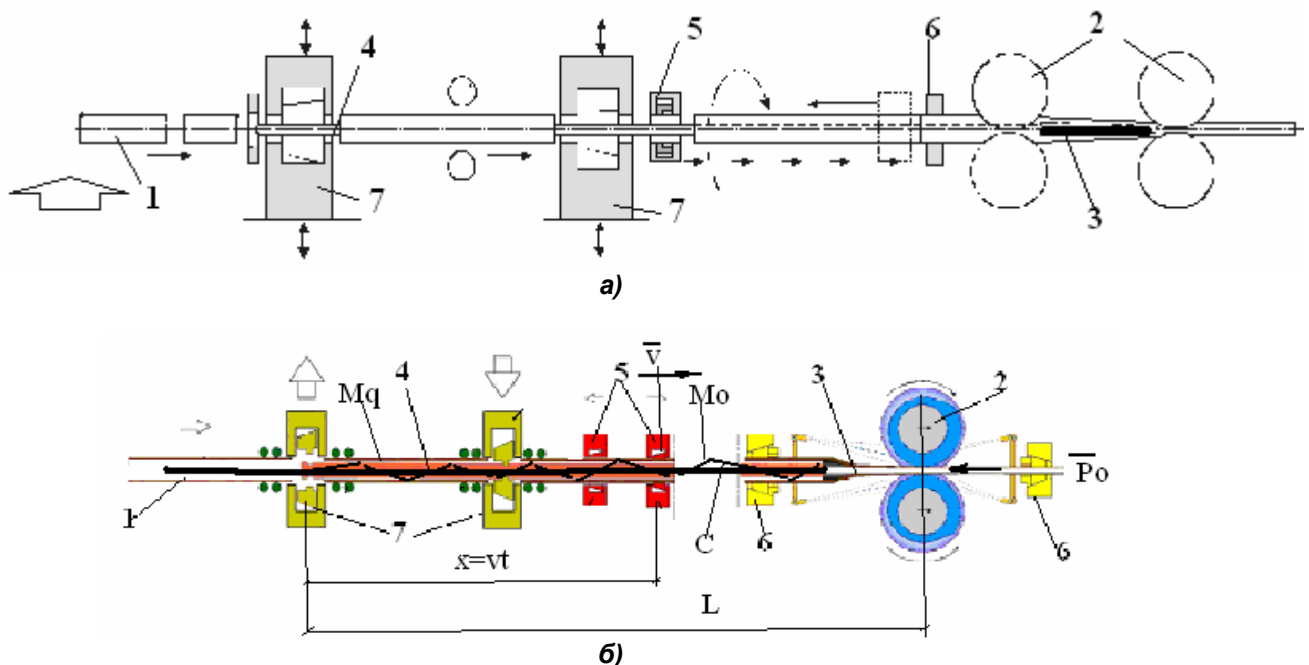
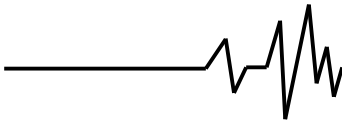


Рис. 1. Схема модернизированного высокоскоростного стана холодной пильгерной прокатки труб КРВ 25VМR с системой торцевой загрузки трубы-заготовки а) и расчетная схема механизма удержания оправки со стержнем б): 1 – труба-заготовка (гильза); 2 – валки рабочие; 3 – оправка; 4 – стержень оправки; 5 – патроны подачи трубы; 6 – патроны поворота трубы; 7 – патроны удержания стержня оправки



В качестве расчетной схемы вынужденных продольных колебаний сложной механической системы примем стержень механизма удержания оправки стана ХПТ постоянного сечения с шарнирными опорами на концах и упругими опорами (центрователями, люнетами) между ними (рис. 1б). Стержень совместно с прокатываемой гильзой со стороны очага деформации подвергается воздействию гармонического составляющего осевого усилия процесса пильгерной прокатки $\vec{P}_0 \sin(\omega t)$. Характерно, что в процессе подачи трубы-заготовки по стержню массы M_0 длиной l в очаг деформации с заданной условно постоянной (равномерной) скоростью \vec{V} вдоль оси прокатки механизмом подачи дискретно перемещается прокатываемая гильза массы M_q .

Переходим к изложению решения задачи о вынужденных продольных колебаниях оправки стана ХПТ со стержневой системой ее удержания с учетом переменности во времени массы системы. Учитывая переменность во времени массы системы для построения корректной математической модели стана и последующего анализа динамического состояния оправки со стержнем, в процессе прокатки трубной заготовки, воспользуемся соответствующим уравнением продольного движения оправки в постановке базовой задачи И.В. Мещерского [4, 5].

В предположении того, что внутреннее трение в системе по сравнению с циклическими технологическими $P_0 \sin(\omega t)$ и нестационарными динамическими нагрузками незначительно, согласно [3, 4], приходим к дифференциальному уравнению продольного движения оправки в виде:

$$M(t) \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{dM(t)}{dt} \frac{dx(t)}{dt} + F(t) = P_0 \sin(\omega t), \quad (1)$$

где $x(t)$ – продольное перемещение оправки в очаге деформации вдоль оси прокатки; $M(t)$ – переменная во времени масса системы «труба – оправка – стержень» с учетом исходной массы стержня оправки M_0 ; ω – частота изменения вынуждающей силы (без учета скольжения металла равна угловой скорости вращения кривошипного колеса главного привода стана ХПТ).

Силу упругости стержня оправки в направлении оси прокатки принимаем, в пределах принятых допущений, по линейному закону Гука $F(t) = cx(t)$. Здесь c – приведенная эквивалентная продольная жесткость стержня с оправкой и всеми механизмами удержания оправки на оси прокатки стана ХПТ.

Отметим, что переменность во времени массы механической системы вызывает пропорциональное изменение инертности всего механизма удержания оправки, что во многом определяет характер развития нестационарных динамических процессов.

Базируясь на результатах исследований [4,5], принимаем во внимание линейный закон изменения (уменьшения) массы системы с учетом изменения во времени массы подвижной части стана в виде:

$$M(t) = M_0 - M_q \frac{x}{l} \Big|_{x=vt} = M_0(1 - \gamma t), \quad (2)$$

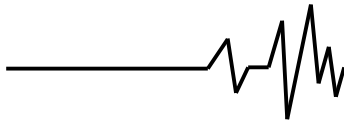
где $\gamma = \frac{M_q v}{M_0 l}$ – скорость изменения массы

механической системы ($\gamma \leq 0$ – масса механической системы с течением времени дискретно уменьшается); $M_q = m_q l$ – масса прокатываемой гильзы; v – скорость подачи гильзы по стержню оправки за один двойной ход клетки; $M_0 = m_0 l$ – начальная масса механической системы.

Базируясь на фундаментальных исследованиях вопросов динамики тела переменной массы, исходя из постановки задачи И. В. Мещерского [4, 5], в принятом приближении решения поставленной задачи в уравнении (1) учитываем реактивную слагаемую инерционной нагрузки от действия прокатываемой трубы, механизмов подачи и поворота трубы $\frac{dM(t)}{dt} \frac{dx(t)}{dt} = M_0 \gamma \frac{dx(t)}{dt}$.

Следовательно, для анализа соответствующей части уравнения (1) и реактивной инерционной нагрузки формируем задачу Коши с учетом определенных начальных условий [6, 7].

Тогда дифференциальное уравнение продольных колебаний оправки со стержнем (1) с учетом закона изменения во времени массы системы (2) в принятой постановке задачи приобретает вид:



$$\begin{cases} M_0(1 + \gamma t) \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + M_0 \gamma \frac{dx(t)}{dt} + cx(t) = P_0 \sin(\omega t) H(t); \\ x(0) = x_0; \quad \frac{dx(0)}{dt} = v_0. \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая действие реактивной составляющей, разделив части уравнения (3) на M_0 переходим к исследованию нестационарной динамики механической системы.

$$\begin{aligned} (1 + \gamma t) \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \gamma \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) &= \\ &= \frac{P_0 \sin(\omega t)}{M_0} H(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где $H(t)$ – импульсная функция Хэвисайда; $\omega_0^2 = c / M_0$ – квадрат частоты свободных колебаний оправки с механизма ее удержания

Решаем дифференциальное уравнение (4) при заданных начальных условиях задачи. Неоднородное дифференциальное уравнение (4) составлено и представлено в форме задачи Коши, что с достаточной высокой степенью точности описывает вынужденные колебания механизма удержания оправки стана ХПТ. Далее для достоверности разработанной математической модели решение дифференциального уравнения (4) реализуем численно методом Рунге – Кутты для наиболее распространенной первой формы колебаний системы «труба – оправка – стержень».

Выполним уточненный расчет на базе разработанной математической модели задачи о вынужденных колебаниях оправки со стержнем на примере исследования стана КРВ 25 (рис. 16). Для этого примем следующие исходные данные для стана КРВ 25 (труба по маршруту 28x2,5→19x1,5, материал – Gr2): $P_0 = 18000 \dots 20000 \text{ Н}$; $\omega = 8 \dots 25 \text{ рад/с}$; $l = 16 \text{ м}$; $v = 1,2 \text{ м/с}$; $M_0 = m_0 l$; $m_0 = 2 \text{ кг/м}$; $M_q = m_q l$; $m_q = 3 \text{ кг/м}$; $c = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$; $t \in [0; 0,5] \text{ с}$.

Результаты численного анализа дифференциального уравнения (5) продольных колебаний оправки совместно со стержнем механизма ее удержания при прокатке трубы по маршруту 28x2,5→19x1,5, материал – титан Gr2, на стане КРВ 25 представлены на рисунке 2.

Расчетные кривые, приведенные на рисунке 2, указывают на крайне неудовлетворительные нестационарные условия функционирования оправки со стержнем за время процесса прокатки трубной

заготовки на стане КРВ 25. Амплитуда продольных колебаний оправки достигает 0,037 м, что, безусловно, приводит к уходу оправки от проектного положения в калибре и образованию повышенной разностенности прокатываемых труб.

Таким образом, при нестационарном воздействии со стороны очага деформации соответствующим образом меняется поведение системы «труба – оправка – стержень».

Далее исследуем влияние изменения во времени массы механической системы на коэффициент динамичности на примере расчета динамики механизма удержания оправки высокоскоростного стана КРВ 25.

Расчеты свидетельствуют о том, что в системе «труба – оправка – стержень» с учетом снижения массы механической системы первый максимум коэффициента динамичности меньше двух, а последующие максимумы меньше первого. Откуда следует, что ближе к концу процесса прокатки трубы происходит определенная стабилизация динамики системы «труба – оправка – стержень». Полученные данные совпадают с результатами ряда исследований быстроходного стана КРВ 25 [4].

Используя разработанную математическую модель и элементы современных информационных технологий, на этапе проектирования технологического процесса переходим к исследованию динамики механизма удержания оправки от скорости дискретной подачи трубной заготовки, массы узлов механической системы; осевой составляющей силы прокатки трубы, интенсивности воздействия трубной заготовки, частоты вращения стержня оправки и жесткости элементов механической системы стана ХПТ.

Результаты комплексных исследований показывают, что математическая модель процессов достоверно и в достаточной мере описывает нестационарные динамические явления в системе «труба – оправка – стержень». Следует подчеркнуть, что амплитудно-частотные характеристики динамических процессов при продольных колебаниях за время реализации всего технологического процесса прокатки трубной заготовки на станах превышают допустимый уровень динамичности механической системы.

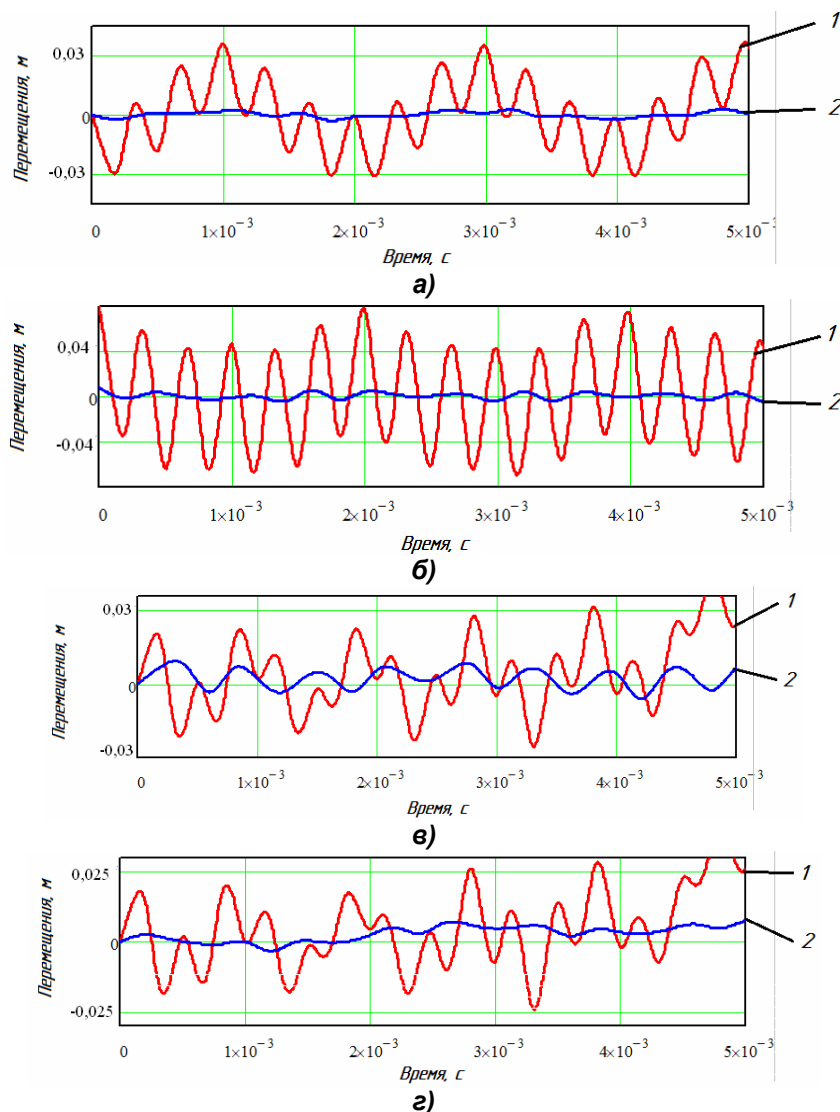
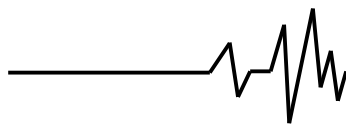


Рис. 2. Вынужденные продольные колебания оправки со стержнем на стане KPW 25VMR: 1 – колебания стержня оправки без центрователей; 2 – колебания стержня оправки с модернизированными роликовыми центрователями: а) – труба по маршруту $28 \times 2,5 \rightarrow 19 \times 1,5$ материал – Gr2; б) – труба по маршруту $25 \times 2,0 \rightarrow 16 \times 0,9$, материал – 12X18H10T; в) – труба по маршруту $20 \times 1,2 \rightarrow 12 \times 0,9$ материал – ПТ-7М; г) – труба по маршруту $16 \times 1,2 \rightarrow 10 \times 0,8$ материал – Gr10

Исследование динамики механизма удержания оправки указывает на то, что реализация интенсивных технологических процессов приводит к повышенной виброактивности системы, что влечет за собой образование гильз повышенной разностенности. Очевидно, что учет интенсивности воздействия очага деформации и переменности массы системы являются определяющими параметрами в рамках выбранной динамической модели механизма удержания оправки ряда отечественных станов ХПТ и быстроходного стана KPW 25.

Разностенность готовых труб обусловлена динамическими процессами в дальнейшем носит сложный и трудноустраняемый характер.

Для снижения виброактивности системы рекомендуется использовать регулируемые роликовые центрователи (люнеты) стержневой системы механизма удержания оправки конструкции ООО «НПФ «Восток Плюс» (рис. 3) в количестве не менее семи штук с удлиненными роликами (суммарная рабочая длина роликов на одном центрователе равна $120 \div 140$ мм), установленные вдоль оси прокатки.

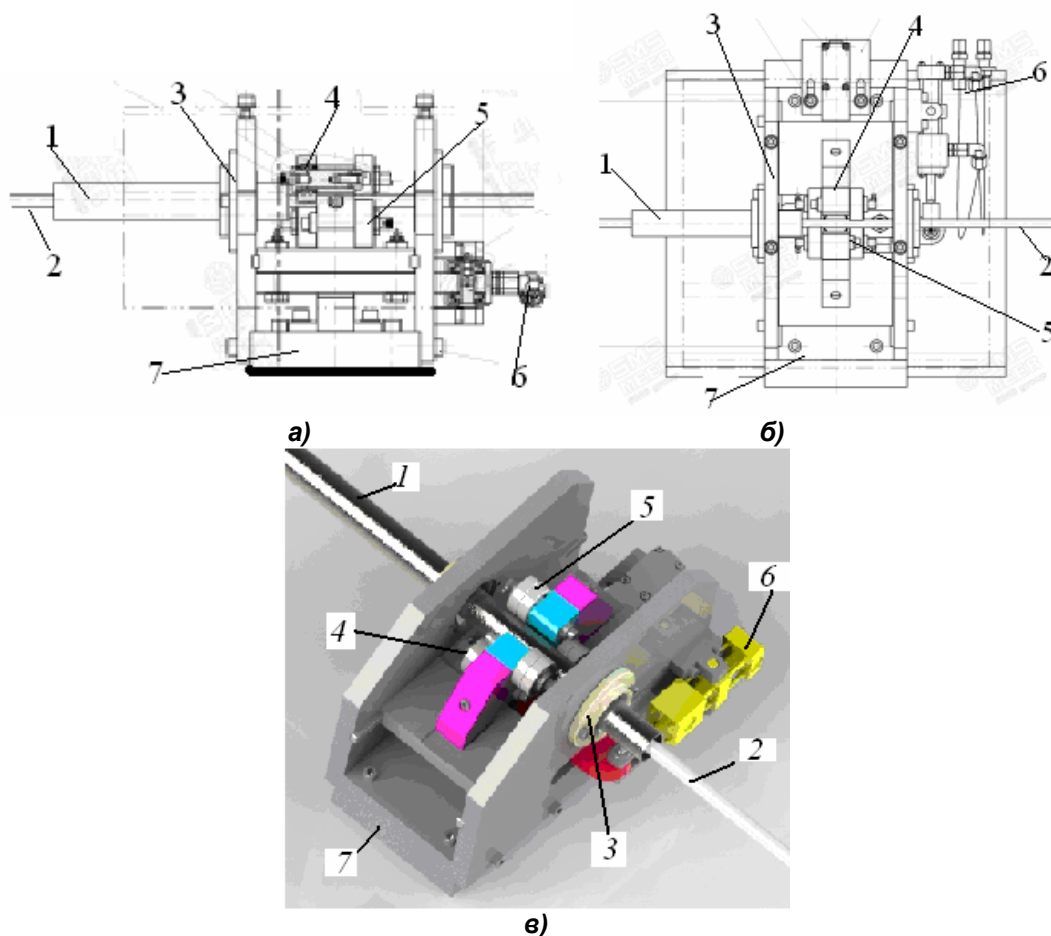
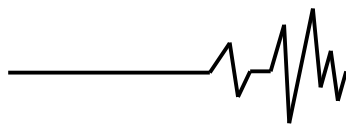


Рис. 3. Роликовый центрователь (люнет) стержневой системы механизма удержания оправки конструкции ООО «НПФ «Восток Плюс»: 1 – труба-заготовка; 2 – стержень оправки; 3.– проводка; 4 – ролики верхние; 5 – ролики нижние; 6 – гидропривод перемещения траверсы подвижных роликов; 7 – основание

Возможность проведения комплексного математического моделирования режимов пильгерной прокатки трубы-заготовки на этапе проектирования технологических процессов существенно отличает полученные результаты от результатов ранее известных работ [1, 2], по исследованию механизма удержания оправки отечественных тихоходных станов ХПТ и быстроходного стана КРВ 25.

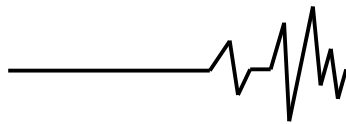
Выводы

Разработана расчетная схема и составлена математическая модель продольных колебаний оправки со стержнем механизма ее удержания вдоль оси прокатки в рамках рассматриваемой нестационарной динамической системы «труба – оправка – стержень» отечественных станов ХПТ и быстроходного стана КРВ 25. Учтены переменность во времени масса системы, циклическая технологическая нагрузка,

действующая со стороны очага деформации и параметры механизма удержания оправки станом ХПТ и КРВ 25.

Получено численное решение дифференциального уравнения продольных колебаний оправки со стержнем методом Рунге – Кутты на примере расчета стана КРВ 25 (труба по маршруту 28x2,5→19x1,5, материал – Gr2). Получены данные, которые позволяют в комплексе оценить продольные колебания оправки в очаге деформации с учетом переменности во времени массы механической системы

Путем комплексного математического моделирования вынужденных нестационарных колебаний механизма удержания оправки, на этапе назначения технологических процессов прокатки трубной заготовки, установлены рациональные режимы прокатки трубы-заготовки на стане и построен прогноз показателей качества выпускаемых труб, исходя из величины допустимого уровня виброактивности упругой



системы механизма удержания оправки. Например, при производстве труб на стане КРВ 25 (труба по маршруту 28x2,5→19x1,5, материал – Gr2) расчетным путем определено, что скорость прокатки на стане не должна превышать 2,2 м/с.

Полученные результаты достаточно близки с данными промышленных испытаний стана КРВ 25 [1, 2], что указывает на высокую достоверность разработанной математической модели механической системы.

Для стабилизации динамики стержневой системы механизма удержания оправки рекомендуется вдоль оси прокатки установить модернизированные роликовые центрователи (люнеты) с удлиненными роликами.

Список использованных источников

1. 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.
2. Фролов В.Ф. Холодная пильгерная прокатка труб / В.Ф. Фролов, В.Н. Данченко, Я.В. Фролов; Гос. предпр. "Научно-исследовательский трубный институт им. Я.Е. Осады, Нац. металлург. акад. Украины. - Днепропетровск: Пороги, 2005. - 255 с.
3. Бессонов А.П. Основы динамики механизмов с переменной массой звеньев. – М.: Наука, 1967. – 279 с.
4. Cveticanin L. Dynamics of Machines with Variable Mass/ L. Cveticanin. Taylor & Francis Ltd, – 1998. – 300 p.
5. Ольшанский В.П. Метод ВБК в расчетах нестационарных колебаний осцилляторов/ В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский// – Харьков: Мисдрук, 2014. – 264 с.

Список источников в транслитерации

1. Danchenko V.N. Tekhnologiya trubnogo proizvodstva. Uchebnik dlya vuzov. /V.N. Danchenko, A. P. Kolikov, B.A. Romantsev, S.V. Samusev // – M.: Internet - Inzhiniring, 2002. – 640 s.
2. Frolov V.F. Kholodnaya pilgernaya prokatka trub / V.F. Frolov, V.N. Danchenko, Ya.V. Frolov; Gos. predpr. "Nauchno-issledovatel'skiy trubnyy institut im. Ya.Ye. osady, Nats. Metallurg. Akad. Ukrainy. – Dnepropetrovsk: Porogi, 2005. – 255 s.
3. Bessonov P. Osnovy dinamiki mekhanizmov s peremennoy massoy zvenyev. – M.: Nauka, 1967. – 279 s.

4. Cveticanin L. Dynamics of Machines with Variable Mass/ L. Cveticanin. Taylor & Francis Ltd, – 1998. – 300 p.

5. Olshanskiy V.P. Metod VBK v raschetakh nestatsionarnykh kolebaniy ostillyatorov / V.P. Olshanskiy, S. Olshanskiy // – Kharkov: Miskdruk, 2014. – 264 s.

ДИНАМІКА МЕХАНІЗМУ УТРИМАННЯ ОПРАВКИ СТАНУ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ

Анотація. Розглянуто задачу про коливання системи «труба – оправлення – стрижень» стану холодної пильгерної прокатки труб (ХПТ). Складено розрахункова схема і диференціальне рівняння поздовжніх коливань оправки зі стрижнем з урахуванням періодичного впливу з боку вогнища деформації і змінності в часі маси розглянутої механічної системи. Представлено чисельне рішення задачі і аналіз нестационарної динаміки системи «труба – оправлення – стрижень». Встановлено деякі особливості динаміки механізму утримання оправки стану ХПТ. Запропоновано конструкцію модернізованого роликового центрователя стрижня оправки стану ХПТ.

Ключові слова: пильгерна прокатка, труба, стан ХПТ, динаміка, коливання, оправлення, стрижень, диференціальне рівняння, змінна маса, поздовжня жорсткість, центрователь стрижня, люнет, задача Коші, разностенность труб.

THE DYNAMICS OF THE MANDREL RETAINING MECHANISM COLD ROLLING TUBES

Annotation. The task about fluctuations of system "a pipe – a mandrel – a core" a camp of cold pilger rolling of pipes (CPT) is considered. The settlement scheme and the differential equation of longitudinal fluctuations of a mandrel with a core taking into account periodic influence from the center of deformation and variability in time of mass of the considered mechanical system is made. The numerical solution of a task and the analysis of non-stationary dynamics of system "a pipe – a mandrel – a core" is submitted. Some features of dynamics of the mechanism of deduction of a mandrel of a camp of CPT are established. The design of the modernized roller sentry of a core of a mandrel of a camp of CPT is offered.

Key words: pilger rolling, pipe, camp of CPT, loudspeaker, fluctuation, mandrel, core, differential equation, variable weight, longitudinal rigidity, sentry of a core, lunette, Cauchy's task.