**Рахманов С.Р.**

к.т.н., доцент

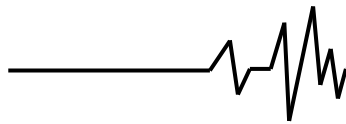
**Зданевич С.В.**

к.т.н., доцент

*Национальная  
металлургическая  
академия Украины***Rakhmanov S.****Zdanevich S.***National Metallurgical  
Academy of Ukraine***УДК 621.774.38****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-8****КОМПЛЕКСНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ  
МЕХАНИЗМА УДЕРЖАНИЯ  
ОПРАВКИ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
СТАНА**

Приведены результаты исследования динамики механизма удержания оправки автоматического стана ТПА, Определена величина осевой силы, воздействующего на оправку и стержневую систему механизма ее удержания. Разработаны развитые модели механизма удержания оправки, что позволило установить характер развития динамических процессов на выходной стороне автоматическом стане с учетом силовых параметров процесса продольной прокатки гильзы и параметров выходной стороны автоматического стана. Разработаны математические модели механизма удержания оправки с учетом параметров технологического процесса и инертности прокатываемой гильзы. Решение системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами реализовано численно с использованием метода Рунге-Кутты для соответствующих динамических моделей механизма удержания оправки на примере расчета автоматического стана ТПА 350. Уточнена картина формирования динамических процессов в механизме удержания оправки при реализации всего технологического процесса производства труб на автоматическом стане, с учетом переменного воздействия со стороны очага деформации и изменения массы прокатываемой гильзы. Для различных динамических моделей реализованы численные решения задач, что позволило выбрать необходимые технологические и динамические параметры механической системы, назначить устойчивые режимы прокатки гильз на автоматическом стане ТПА 350. Показано, что уточненное решение задачи для трех развитых динамических моделей механической системы существенно отличается от ранее известных математических моделей. Установлено, что динамика механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350 эквивалентно формирует механизм образования разностенности труб. Предложен механизм стабилизации динамики механизма удержания оправки путем разъединения секций выходной стороны стана.

**Ключевые слова:** трубопрокатный агрегат, автоматический стан, рабочая клеть; гильза, труба, оправка, стержень, динамика, переменная масса, динамическая модель, дифференциальные уравнения, численный метод; колебания, виброактивность, разностенность

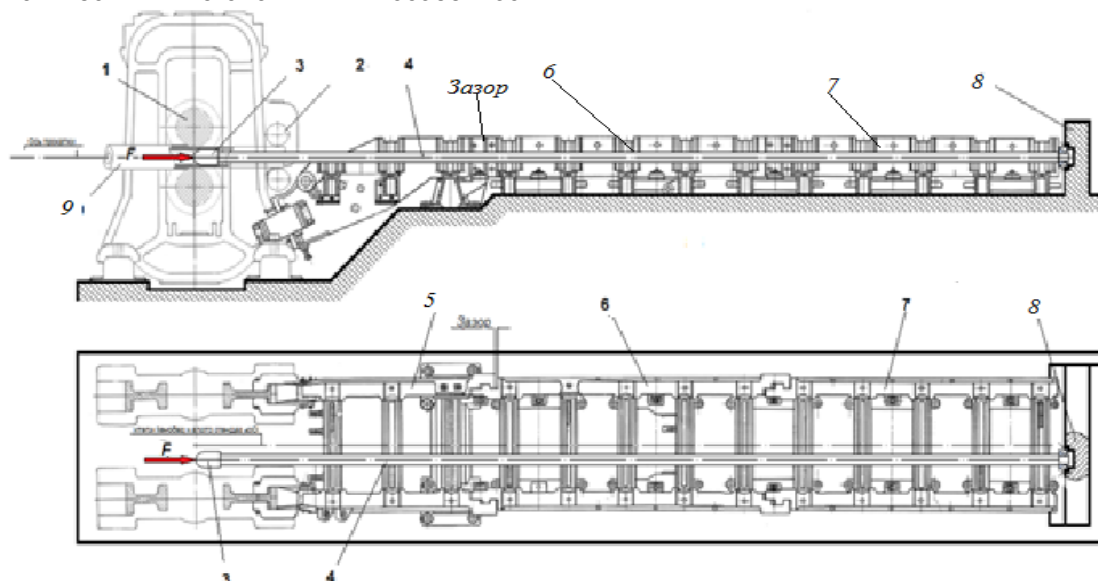


Одним из существенных показателей при производстве горячекатаных бесшовных труб на технологической линии трубопрокатного агрегата (ТПА) является разностенность гильз, прокатываемых на автоматических станах, определяющих качество готовой продукции. Требования, предъявляемые современными стандартами к горячекатаным трубам, показывают, что по точности геометрических размеров продукцию, выпускаемую на отечественных ТПА с автоматическими станами, необходимо довести до уровня мировых стандартов. В условиях конкуренции ряд отраслей промышленности выдвигают высокие требования к точности геометрических размеров и качеству готовых труб [1, 2].

Опыт эксплуатации ТПА с автоматическими станами и особенности

технологии производства горячекатаных бесшовных труб показывают, что гильзы, прокатываемые на стане обладают разностенностью, наведенной со стороны механизма удержания оправки (рис. 1). При этом разностенность гильз, прокатанная на двух прошивных станах, устраняется частично или не устраняется вообще при выполнении последующих технологических операций на автоматическом стане ТПА, либо на остальных станах технологического цикла.

Интенсификация технологического процесса производства труб на ТПА с автоматическим станом осуществляется путем увеличения частоты вращения рабочих валков и линейной скорости прокатки гильз, что требует предварительной оценки уровня динамической нагруженности механической системы «гильза – оправка – стержень».



**Рис. 1. Механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350: 1 – валок; 2 – ролики обратной подачи; 3 – оправка; 4 – стержень механизма удержания оправки; 5, 6, 7 – секции рабочего стола; 8 – упорная головка; 9 – гильза**

Отклонение стержня оправки от исходной оси прокатки влияет на условия формирования очага деформации автоматического стана. Динамика автоматического стана ТПА сопровождается значительными колебаниями массивного стержня механизма удержания оправки. Нарушение стабильности технологического процесса прокатки гильз на автоматическом стане в конечном итоге приводят к получению труб повышенной разностенности. При этом значительную часть продольной и поперечной разностенности готовых труб составляет изменения по толщине стенки гильз, что

обусловлено в основном динамикой стержня с оправкой в очаге деформации стана.

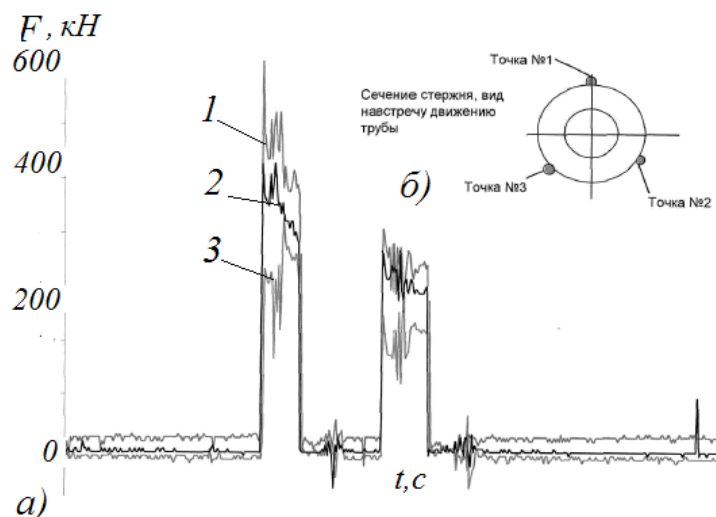
Переходим к исследованию динамики механизма удержания оправки автоматического стана ТПА.

Для наглядности дальнейших расчетов и представления динамики стержневой системы приведена осциллограмма механизма удержания оправки аналогичного ТПА 250, которая представлена в работах [3, 4]. Из осциллограммы экспериментальных осевых усилий на стержне оправки автоматического стана ТПА 250 следует, что динамическое взаимодействие стержневой системы механизма удержания



оправки с прокатываемой гильзой обусловлено существенными изменениями массы трубы, темпом прокатки, динамическими и энергосиловыми параметрами рассматриваемой механической системы. Расчетная величина силы, действующая на оправку и стержневую систему механизма удержания оправки при прокатке готовой трубы  $\varnothing 219 \times 8,5$  мм, сталь 10, составляет 368 кН. Для проверки достоверности полученных результатов воспользуемся результатами

экспериментальных исследований осевых усилий на стержень оправки (сечение стержня  $\varnothing 170 \times 11,4$  мм) автоматического стана ТПА 250 [4]. Осциллограмма экспериментальных исследований осевых усилий на стержне оправки автоматического стана ТПА 250 ОАО «ЧПТЗ» при прокатке гильз (труба готовая  $\varnothing 219 \times 8,5$  мм, сталь 10) приведена на рис. 2.



**Рис. 2. Осциллограмма осевых усилий (а) в контрольные точки (б) на стержне (сечением  $\varnothing 170 \times 11,4$  мм) оправки автоматического стана ТПА при прокатке гильз в два прохода (труба готовая  $\varnothing 219 \times 8,5$  мм, сталь 10) [4, 5]**

Следует отметить, что при принудительной подаче гильзы в калибры стана (предусмотрена подача гильзы пневматическим вталкивателем в очаг деформации) происходит значительное улучшение захвата гильзы рабочими валками. Захват гильзы валками автоматического стана, помимо всего прочего, существенно осложнен тем, что гильза, ударяясь о валок, одновременно взаимодействует с оправкой, находящейся в калибре, и всей стержневой системой механизма удержания оправки.

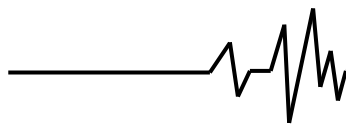
Сложившиеся условия прокатки труб на автоматическом стане, наряду со всеми другими, формируют начальные условия технологического процесса, сложное напряженно-деформированное состояние очага деформации и нестационарные динамические процессы в элементах выходной стороны стана в целом.

Среди совокупности факторов, определяющих нагрузки, действующие на все базовые элементы выходной стороны автоматического стана ТПА, наименее изученными являются значительные по величине и меняющиеся во времени кратковременные пиковые динамические силы,

вызываемые изменяющимся во времени взаимодействием гильзы с оправкой, особенно в период принудительной подачи гильзы. Характерно, что принудительная подача гильзы в очаг деформации автоматического стана пневматическим вталкивателем, по сути, формирует начальные условия прокатки и усугубляет динамические процессы в стержневой системе механизма удержания оправки.

Исследованию аналогичных динамических процессов взаимодействия гильзы с технологическими инструментами станов продольной прокатки посвящен ряд работ [3 – 5]. При этом математическая модель нелинейного процесса взаимодействия гильзы с валками и оправкой стана предложена в работе [5], линеаризация которой в дальнейшем позволила получить выражение для упрощенной формы соответствующего силового взаимодействия со стороны очага деформации.

Данная работа выполнена на основе дальнейшего развития расчетной схемы и уточнения математической модели механической системы. При этом сделана определенная попытка по установлению



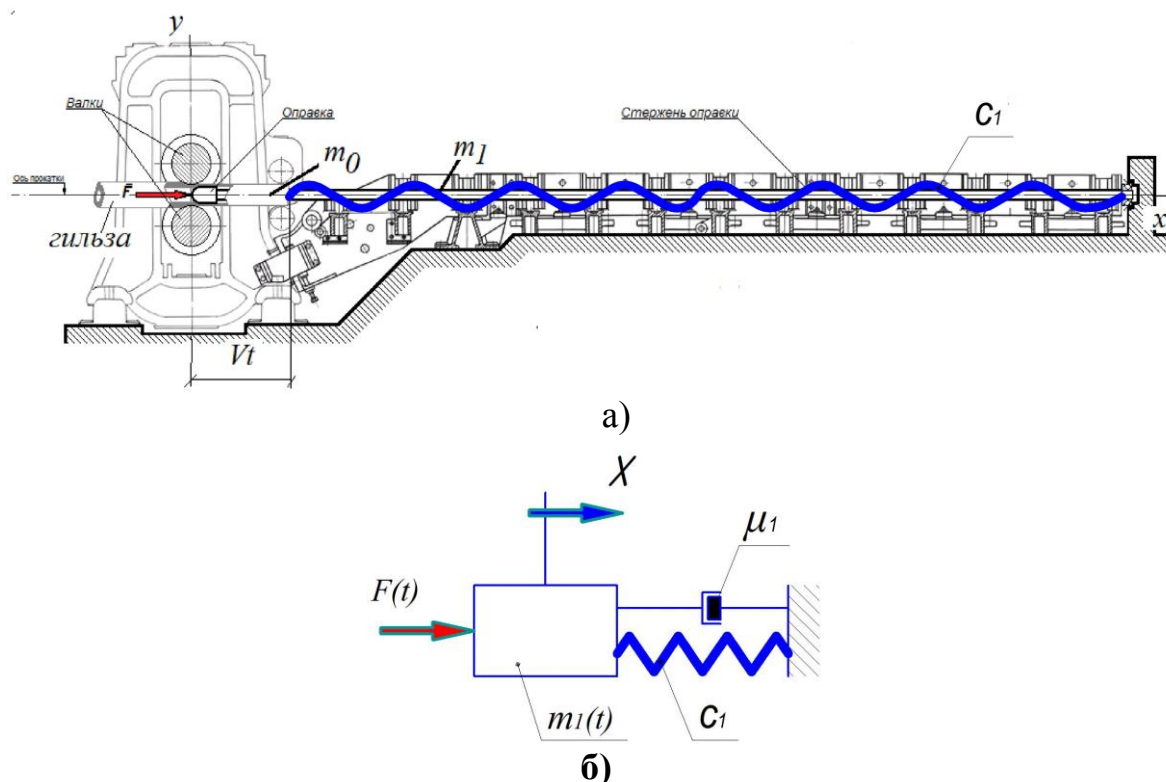
влияния динамических параметров системы с учетом меняющейся во времени массы прокатываемой гильзы на функционирование стержня оправки автоматического стана.

Составим дифференциальное уравнение продольного движения оправки со стержнем механизма удержания оправки автоматического стана с учетом переменности во времени массы гильзы (трубы).

Рассмотрим динамику механической системы «гильза (труба) – оправка – стержень» автоматического стана ТПА.

Проведем некоторое уточнение исходной расчетной схемы механизма удержания оправки автоматического стана. Переходим к составлению математических моделей механизма удержания оправки автоматического стана.

Расчетная схема механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350 для одномассовой динамической модели механической системы приведена на рисунке 3.



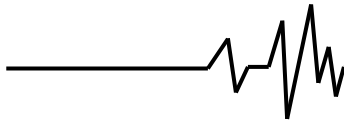
**Рис. 3. Расчетная схема (а) и одномассовая динамическая модель (б) механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350**

Для исследования динамических процессов и изменяющегося во времени взаимодействия прокатываемой гильзы со стержнем оправки автоматического стана воспользуемся фундаментальными законами динамики.

Экспериментальные исследования энергосиловых параметров очага деформации автоматического стана ТПА показывают, что осевая составляющая усилия прокатки, действующая на оправку и стержневую систему, носит преимущественно периодический характер и соответствует гармоническому закону  $F(t) = F_0 + F_1 \sin(\alpha t)$ .

Причем амплитуда  $F_1$  периодической составляющей усилия прокатки гильзы по сравнению с постоянной осевой составляющей технологической нагрузки являются сравнительно малыми. Тогда есть достаточно полное основание предположить, что в первом приближении можно принять условия, описанные в работах [2,4].

Динамика механизма удержания оправки с учетом переменности во времени присоединенной массы гильзы и параметров механической системы (выходной стороны стана) описываются, исходя из фундаментальной постановки задачи И.В. Мещерского [6].



$$m_1(t) \cdot \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + \frac{dm_1(t)}{dt} \cdot \frac{dx_1(t)}{dt} + c_1 x_1(t) = F_0 + F_1 \sin(\omega t), \quad (2)$$

где  $x_1(t)$  – перемещение оправки со стержнем по оси прокатки;  $m_1(t)$  – переменная во времени масса механической системы удержания оправки;  $c_1$  – жесткость стержня в направлении оси прокатки;  $F_0$  – постоянная осевая составляющая технологической нагрузки;  $F_1$  – амплитудное значение технологической нагрузки;  $\omega$  – частота изменения вынуждающей силы

Используя результаты ряда исследований [6,7], изменение с учетом переменности во времени массы подвижной трубы принимаем в виде

$$m_1(t) = m_1 + m_0 \frac{x}{l_0} \Big|_{x=Vt} = m_1(1 + \gamma t) \quad (3)$$

здесь  $\gamma = \frac{m_0}{m_1} \frac{V}{l_0}$  – параметр изменения массы (в силу того, что  $\gamma > 0$  масса

механической системы всегда линейно нарастает); где  $m_1$  – масса стержня механизма удержания оправки;  $m_0$  – масса прокатываемой гильзы;  $l_0$  – длина гильзы;  $V$  – скорость прокатки гильзы (перемещения по стержню).

Базируясь на фундаментальных исследованиях динамики тела переменной массы, исходя из постановки задачи И.В. Мещерского, далее согласно [6, 7] учитываем

реактивную слагаемую  $\frac{dm_1(t)}{dt} \cdot \frac{dx_1(t)}{dt}$  прокатываемой трубы в уравнении (8).

Тогда дифференциальное уравнение колебаний оправки со стержнем (2) в направлении оси прокатки с учетом закона изменения массы трубы (3) и сил сопротивления приобретает вид:

$$\begin{cases} m_1(1 + \gamma t) \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + (m_1 \gamma + \mu) \frac{dx_1(t)}{dt} + c_1 x_1(t) = F_0 + F_1 \sin(\omega t); \\ x_1(0) = x_{01} = 0; \quad \frac{dx_1(0)}{dt} = \frac{dx_{01}}{dt} = v_0. \end{cases} \quad (4)$$

Переходим к исследованию динамики механической системы при действии реактивной составляющей. Учитывая действие реактивной силы, переходим к решению

дифференциального уравнения (4). Разделив части уравнения (4) на  $m_1$  запишем:

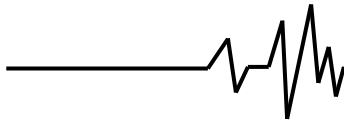
$$(1 + \gamma t) \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + \frac{m_1 \gamma + \mu}{m_1} \frac{dx_1(t)}{dt} + \omega_0^2 x_1(t) = \frac{F_0 + F_1 \sin(\omega t)}{m_1}, \quad (5)$$

где  $\omega_0^2 = c_1 / m_1$  – квадрат частоты свободных колебаний оправки со стержнем;  $\mu$  – коэффициент сопротивления механической системы.

Решение дифференциального уравнения (5) единственное, если выполняются условия устойчивости по соответствующим критериям асимптотических разложений [7]. Нарушение условий устойчивости решения

задачи может привести к нескольким нетривиальным результатам.

Неоднородное дифференциальное уравнение (5) составлено и представлено в форме Коши описывает вынужденные колебания оправки со стержнем вдоль оси прокатки. Используя метод Рунге – Кутты решение дифференциального уравнения (5) находим численно для одностепенной динамической модели системы «оправка – стержень».



Выполним расчет на базе математической модели задачи о вынужденных колебаниях оправки со стержнем. Для расчета примем следующие исходные данные автоматического стана ТПА 350:  $l_0 = 12$  м;  $v = 4$  м/с;  $m_1 = 1500$  кг;  $m_0 = 900$  кг;  $c = 46,6 \times 10^6$  Н/м;  $F_0 = 700$  кН;  $F_1 = 80$  кН;  $\mu = 1,336 \times 10^4$  Нс/м;  $t \in \left[0; \frac{l_0}{v}\right]$ .

Сравнение полученных результатов (рис. 4) с экспериментальными исследованиями стержня механизма удержания оправки указывают на необходимость уточнения динамической модели механической системы. Динамика одномассовой модели механической системы механизма удержания оправки приведена на рис. 4.

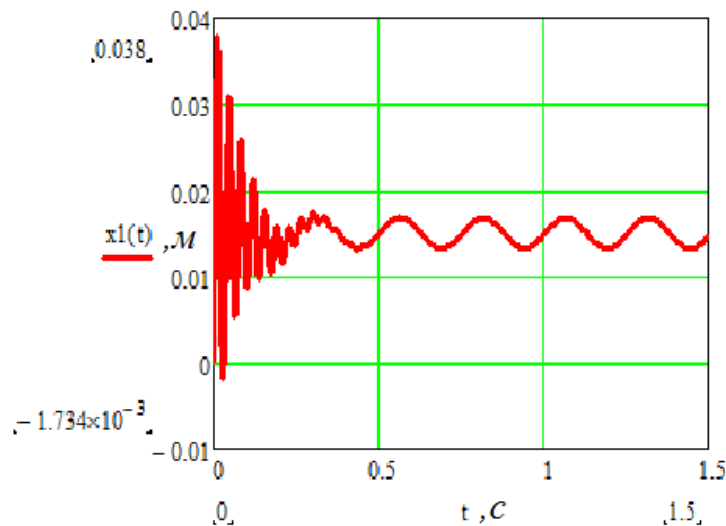
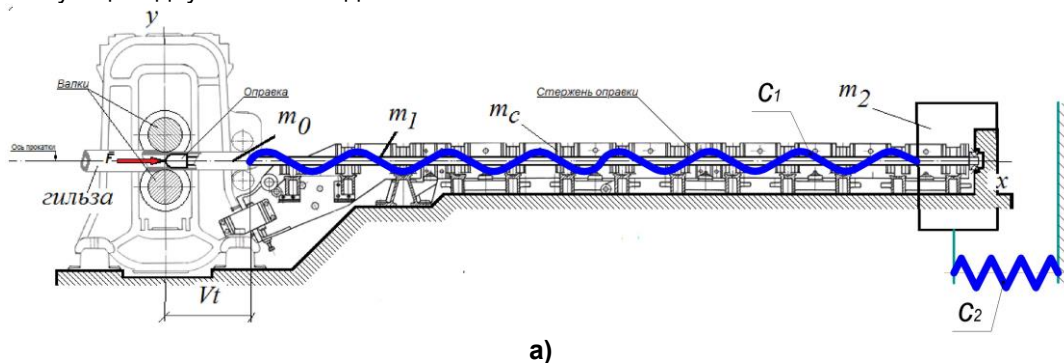


Рис. 4. Динамика механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350 на базе одномассовой модели механической системы

Из рис. 4 видно, что динамическая модель в не полной мере описывают динамику стержня оправки автоматического стана ТПА 350.

Уточненная расчетная схема механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350 и соответствующая двухмассовая динамическая

модель механической системы приведена на рисунке 5. Данная расчетная схема по своей сути достаточно близка к реальному технологическому процессу прокатки гильз на автоматическом стане, что позволяет глубже изучить динамические процессы в механизме удержания оправки.



а)



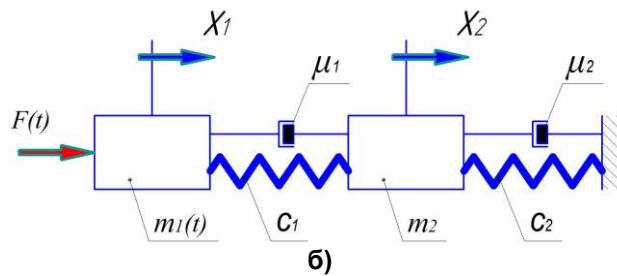
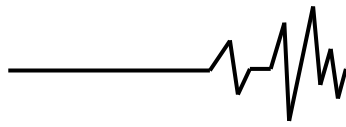


Рис. 5. Расчетная схема (а) и двухмассовой динамическая модель (б) механической системы механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350

Для рассматриваемой двухмассовой прокатки при определенных начальных динамической модели (рис.5) механической системы составляем дифференциальные уравнения движения масс в направлении оси

$$\begin{cases} m_1(1 + \gamma t) \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + (m_1 \gamma + \mu_1) \frac{dx_1(t)}{dt} + c_1(x_2(t) - x_1(t)) = F_0 + F_1 \sin(\omega t); \\ x_1(0) = x_{01} = 0; \quad \frac{dx_1(0)}{dt} = \frac{dx_{01}}{dt} = v; \\ m_2 \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} + \mu_2 \frac{dx_2(t)}{dt} - c_1(x_2(t) - x_1(t)) + c_2 x_2(t) = 0; \\ x_2(0) = x_{02} = 0; \quad \frac{dx_2(0)}{dt} = \frac{dx_{02}}{dt} = v; \end{cases} \quad (6)$$

где  $m_2$  – масса упорной головки механизма удержания оправки с учетом  $2/3$  массы стола  $m_c$ ;  $x_2(t)$  – перемещение упорной головки с частью стола в направлении оси прокатки;  $c_2$  – жесткость узла крепления упорной головки в направлении оси прокатки.

Результаты численного решения системы дифференциальных уравнений (6),

характеризующих продольные колебания оправки совместно со стержнем механизма ее удержания для случая прокатки труб  $\varnothing 325 \times 10$  мм, материал – сталь 20 на автоматическом стане ТПА 350 для двухмассовой динамической модели механической системы приведены на рисунке 6.

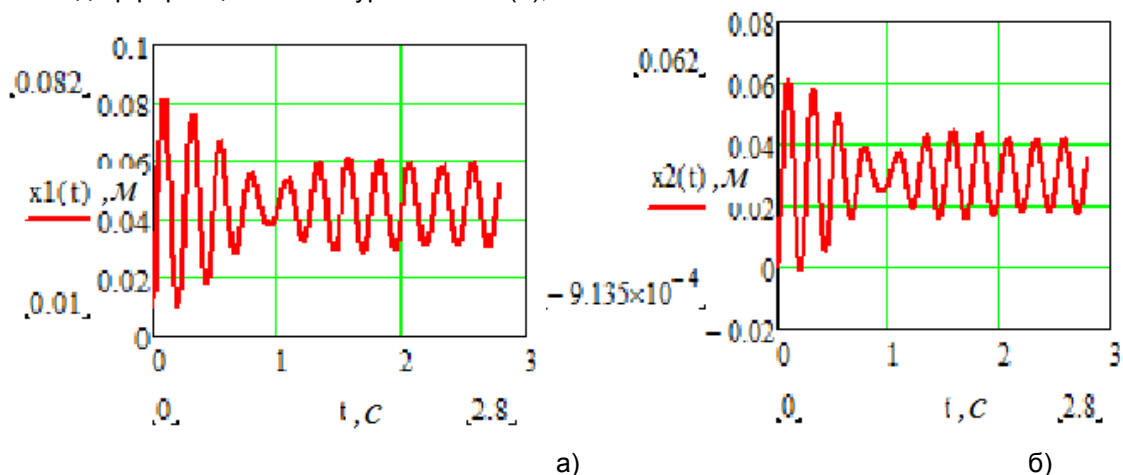
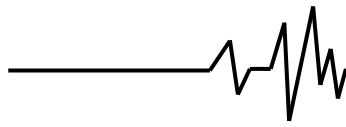


Рис. 6. Колебания механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350 на базе двухмассовой модели механической системы

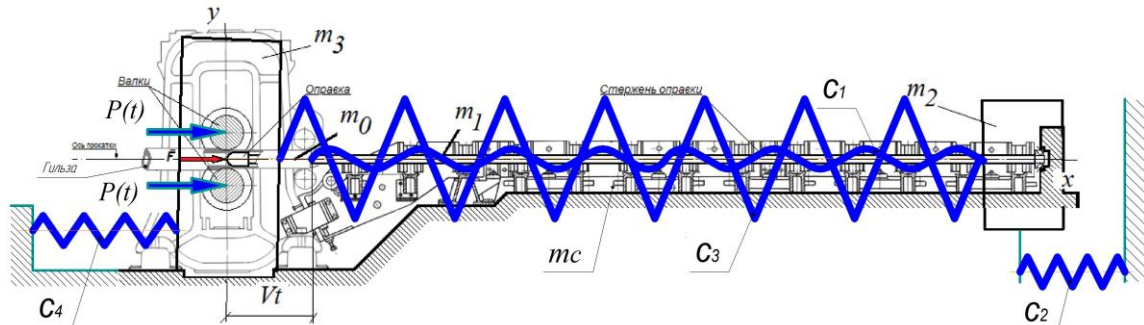
Сравнение полученных результатов с данными экспериментальных исследований [4,8] указывают на необходимость в дальнейшем совершенствовании динамической модели механической системы.



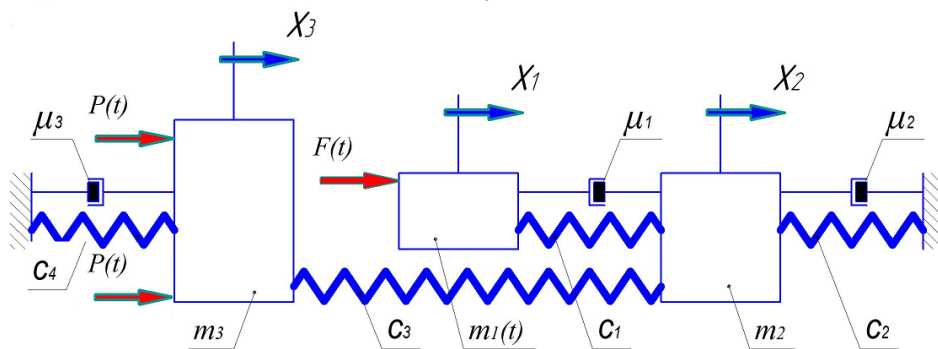
Далее переходим к составлению уточненной трехмассовой динамической модели механической системы.

Расчетная схема колебаний механизма удержания оправки автоматического стана ТПА

350 для уточненной трехмассовой динамической модели механической системы приведена на рисунке 7.



а)



б

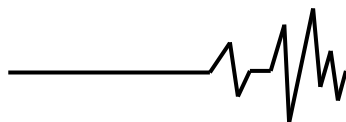
**Рис. 7. Расчетная схема (а) и трехмассовая динамическая модель (б) механической системы механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350**

Многочисленные экспериментальные исследования энергосиловых параметров очага деформации автоматического стана ТПА показывают, что силы прокатки, действующая на валок и подушки вдоль оси прокатки, носит преимущественно периодический характер соответствует гармоническому закону  $P(t) = P_0 + P_1 \sin(\omega t)$  [3,5].

Составляем дифференциальные уравнения для трехмассовой динамической модели механической системы. Математическая модель механизма удержания оправки в постановке задачи Коши приводится к системе трех дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1(1 + \gamma t) \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + (m_1 \gamma + \mu_1) \frac{dx_1(t)}{dt} + c_1(x_2(t) - x_1(t)) = F_0 + F_1 \sin(\omega t); \\ x_1(0) = x_{01} = 0; \quad \frac{dx_1(0)}{dt} = \frac{dx_{01}}{dt} = v; \\ m_2 \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} + \mu_2 \frac{dx_2(t)}{dt} - c_1(x_2(t) - x_1(t)) + c_2 x_2(t) = 0; \\ x_2(0) = x_{02} = 0; \quad \frac{dx_2(0)}{dt} = \frac{dx_{02}}{dt} = 0; \\ m_3 \frac{d^2 x_3(t)}{dt^2} + \mu_3 \frac{dx_3(t)}{dt} - c_3(x_3(t) - x_2(t)) + c_4 x_3(t) = 2(P_0 + P_1 \sin(\omega t)); \\ x_3(0) = x_{03} = 0; \quad \frac{dx_3(0)}{dt} = \frac{dx_{03}}{dt} = v; \end{array} \right. \quad (7)$$





где  $m_3$  – масса рабочей клетки;  $c_3$  – жесткость креплений секций переднего стола по оси прокатки;  $c_4$  – жесткость крепления рабочей клетки в направлении оси прокатки;  $x_3(t)$  – перемещение рабочей клетки автоматического стана в направлении оси прокатки

Численное решение системы дифференциальных уравнений (7) методом Рунге – Кутты позволяет оценить динамические перемещения центрирующего пояска оправки в очаге деформации и характер функционирования механической системы в направлении оси прокатки стана.

Результаты численного решения системы дифференциальных уравнений (7) продольных колебаний оправки совместно со стержнем механизма ее удержания при прокатке труб  $\varnothing 325 \times 10$  мм, материал – сталь

20 на автоматическом стане ТПА 350 представлены на рисунке 8.

Сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными исследованиями динамических процессов всего технологического процесса прокатки гильз на автоматическом стане ТПА 350 указывают на достоверность результатов динамической модели механической системы и продольных колебаний стержня оправки. Следует отметить, что учет интенсивности воздействия очага деформации и изменяющейся во времени прокатываемой гильзы, перемещавшейся со скоростью  $v$ , являются определяющими параметрами в рамках выбранной динамической модели стержневой системы механизма удержания оправки стана [4, 8].

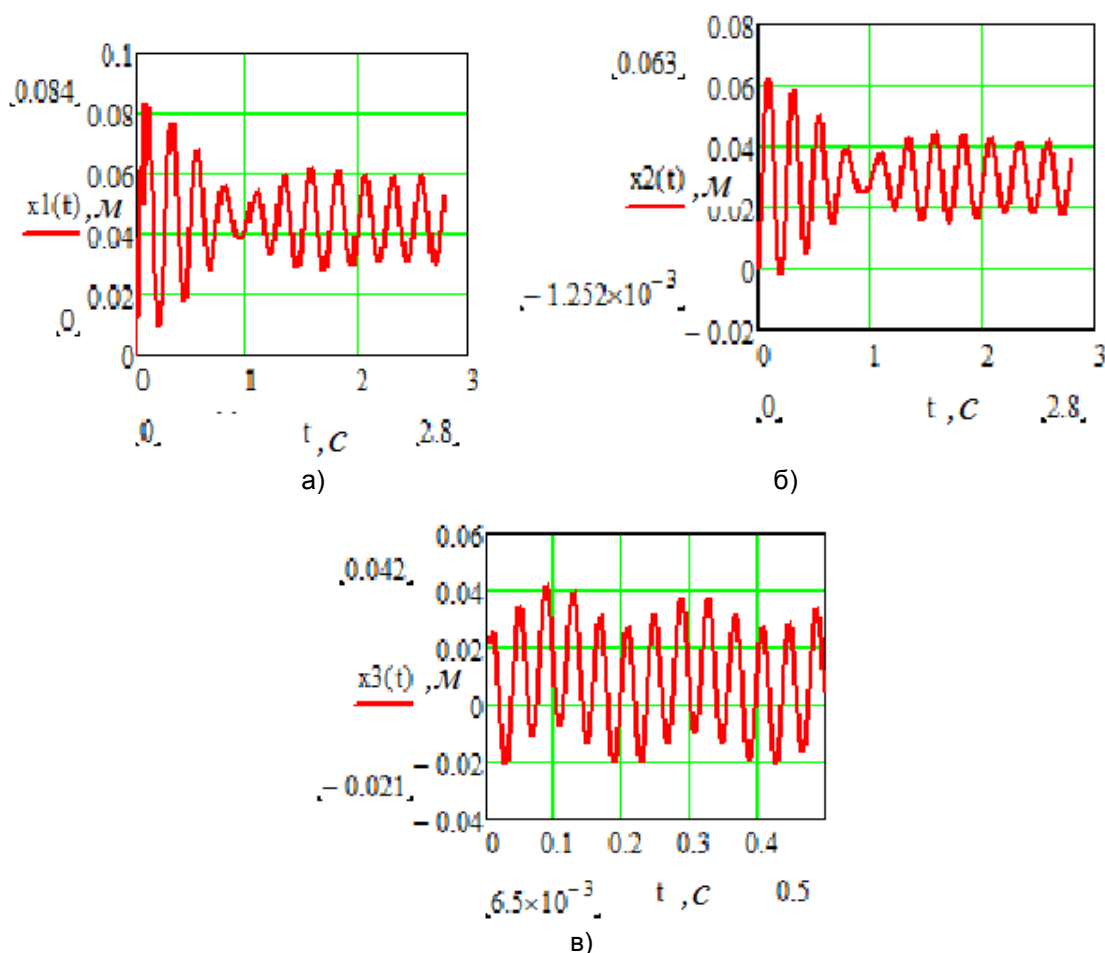
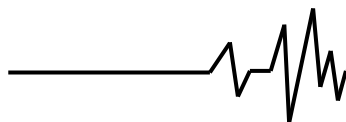


Рис. 8. Колебания механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350 на базе трехмассовой модели механической системы

Фотография места установки датчика на упоре стержня оправки и результаты замера виброускорения упорной головки стола

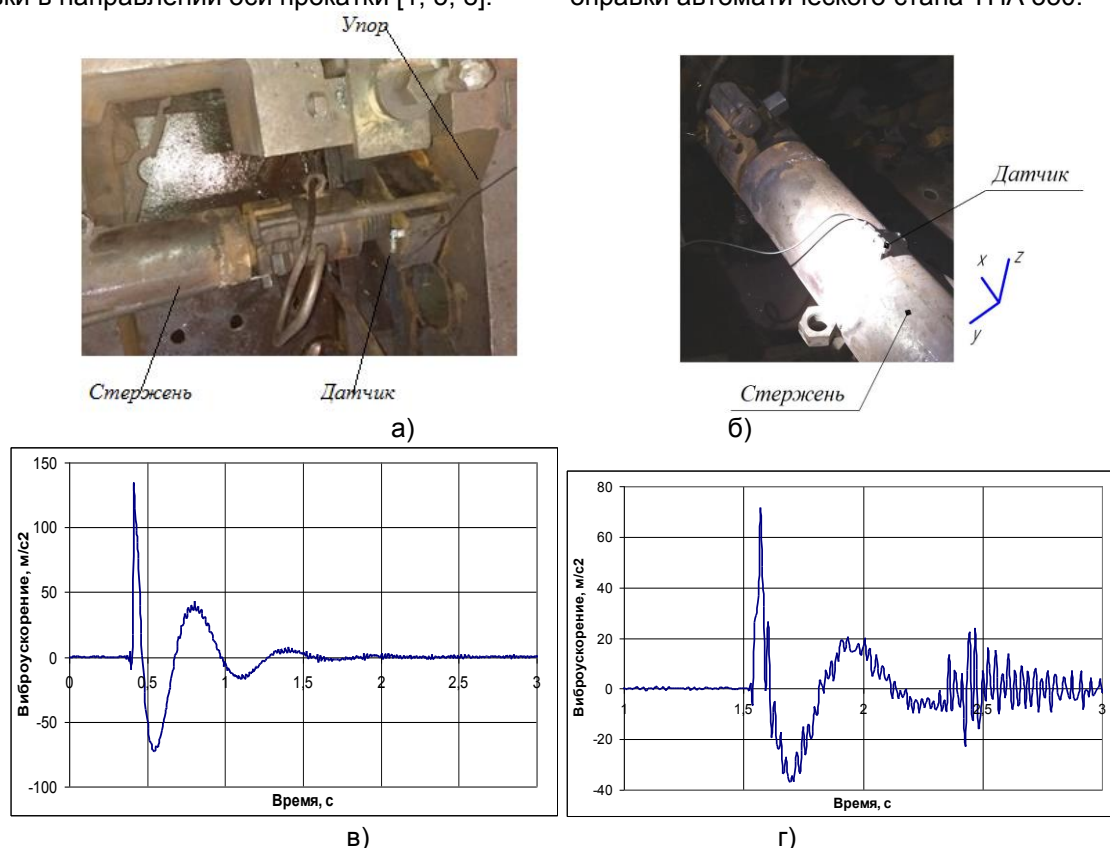
механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350 приведены на рисунке 9.



Возможность комплексного математического моделирования режимов прокатки гильз существенно отличает полученные результаты от результатов ранее известных работ в области исследования динамической устойчивости и виброактивности стержневой системы механизма удержания оправки автоматического стана ТПА [4, 8].

Решение дифференциального уравнения (5) и системы уравнений колебаний (6) и (7) с учетом рассматриваемых динамических моделей позволяет, на этапе конструирования механизмов выходной стороны стана, математическим моделированием определить требуемые параметры жесткости механизма удержания оправки в направлении оси прокатки [1, 5, 8].

Разъединение первой секции переднего стола вместе с рабочей клетью с второй секцией выходной стороны приводит к размыканию силовой схемы механической системы, что приводит к стабилизации динамики механизма удержания оправки и фиксацию крепления рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 к основанию. При этом первая секция переднего стола с второй секцией установлены на общей опоре с зазором в направлении оси прокатки 60-70 мм (рис.1). Путем размыкания силовой схемы нагружения выходной стороны автоматического стана ТПА 350 достигается наиболее благоприятные условия функционирования механизма удержания оправки автоматического стана ТПА 350.



**Рис. 9. Места установки датчика виброускорения на стержне (а, б) и виброускорения упорной головки механизма удержания оправки (в) в направлении оси прокатки и вертикального виброускорения (г) в контрольной точке стержня автоматического стана ТПА 350**

Механическая система механизма удержания оправки сводится к двухмассовой динамической модели системы (рис. 5) и динамика механической системы имеет характер (рис 6). Полученные результаты достаточно близки с результатами экспериментальных исследований виброактивности рассматриваемой механической системы.

Применение на выходной стороне стана дополнительных регулируемых центрующих проводок на упругом основании обеспечивает стабилизацию динамических процессов в механической системе и улучшению качества прокатываемых гильз на ТПА 350 [4, 8].

Функция распределения значений толщины стенки трубы  $\varnothing 325 \times 10$  мм при прокатке гильз до и после реконструкции



механизма удержания оправки приведена на рисунке 10.

Из рис. 10 видно, что кривые 1 и 2 представляют значительное улучшение качества прокатываемых труб. При комплексной модернизации автоматического

стана ТПА 350 возможно повышение качества готовых труб до 30%, что дает весомый экономический эффект в условиях конкурентоспособности выпускаемой продукции.

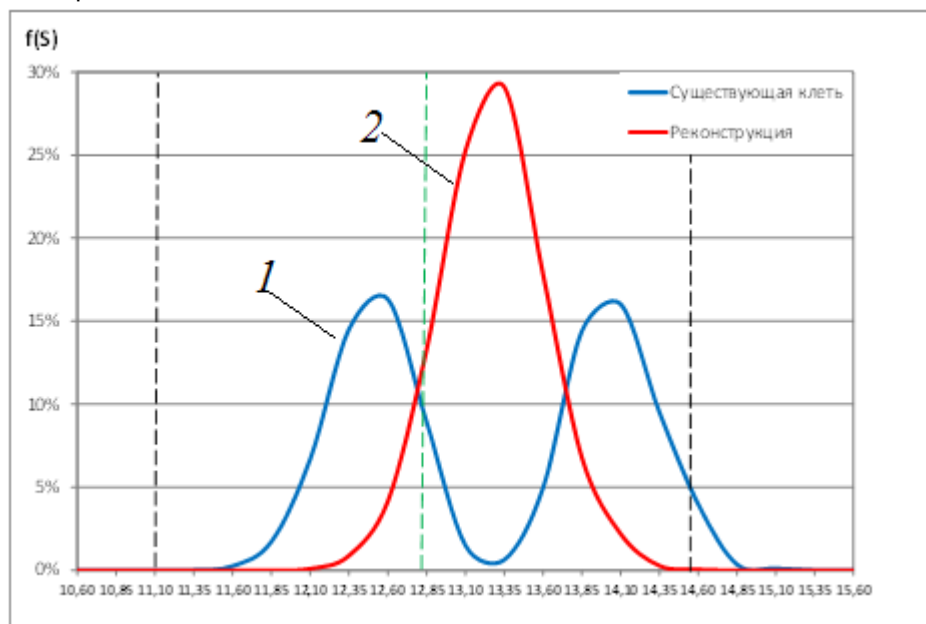


Рис. 10. Функция распределения значений толщины стенки трубы  $\varnothing 325 \times 10$  мм при прокатке гильз в существующей клетке до (1) и после (2) ее реконструкции

### Выводы

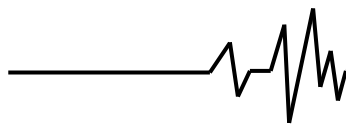
1. Проведено комплексное исследование динамики механической системы «гильза (труба) – оправка – стержень» автоматического стана ТПА. Составлены дифференциальные уравнения движения механизма удержания оправки с учетом переменной массы механической системы. Получено численное решение задачи для трех динамических моделей механической системы.

2. Математическим моделированием динамических процессов в механической системе «гильза (труба) – оправка – стержень» установлен характер виброактивности выходной стороны автоматического стана ТПА 350 с учетом переменной во времени массы прокатываемой гильзы.

3. Приведены результаты моделирования динамики механизма удержания оправки, что позволяет, на этапе выбора технологических параметров, прогнозировать поведение механизмов выходной стороны, назначать рациональные режимы эксплуатации автоматического стана ТПА 350 с учетом уровня виброактивности механической системы и управлять качеством (разностенностью) прокатываемых труб.

### Список использованных источников

1. Данченко В. Н., Коликов А. П., Романцев Б. А., Самусев С. В. *Технология трубного производства. Учебник для вузов.* М.: Интермет-Инжиниринг, 2002. 640 с.
2. Розов Н.В. *Производство труб. Справочник.* М.: Металлургия, 1974. 598 с.
3. Чечулин Ю. Б., Баранов Г. Л., Зиомковский В. М., Песин Ю. В. Динамические нагрузки при захвате заготовки. *Сб. научных трудов международной конференции, посвященной 15-летию со дня создания регионального Уральского отделения академии инженерных наук им. А.М. Прохорова.* Екатеринбург, 2010. № 1. С.154–159
4. Чечулин Ю. Б., Кузнецов В. И., Душкин В. М., Зиомковский В. М., Ольков И. С. Расчетное и экспериментальное обоснование модернизации узлов крепления рабочей клетки автоматстана. *Ремонт, восстановление, модернизация.* 2011. №4. С. 11–13.
5. Рахманов С. Р., Тополов В. Л. Экспериментальное исследование виброактивности станов винтовой прокатки труб трубопрокатного агрегата. *Вибрация в технике и технологиях,* 2011. № 2(62). С. 91–96.



6. Бессонов А.П. Основы динамики механизмов с переменной массой звеньев. М.: Наука, 1967. 279 с.

7. Ольшанский В. П., Ольшанский С. В. Свободные колебания осциллятора линейно-переменной массы. *Вибрация в технике и технологиях. Всеукр. науч. техн. журнал.* – Винница, 2013. №1 (69). С. 37–41.

8. Сулухия Т. М., Адамия Р. Ш., Оклей Л. Н., Ломсадзе Д. М. Разработка мероприятий по предотвращению изгиба стержня оправки автоматического стана ТПА 140. *Труды Грузинского политехнического института*, 1976. С.98–102

*tekhnike i tekhnologiyakh. Vseukr. nauch. tekhn. zhurnal. Vinnitsa, №1 (69). 37–41. [in Russian].*

8. Sulukhiya, T. M., Adamiya, R. Sh., Okley, L. N., Lomsadze, D. M. (1976). Razrabotka meropriyatiy po predotvrashcheniyu izgiba sterzhnya opravki avtomaticheskogo stana TPA 140 [Development of measures to prevent the bending of the mandrel bar mandrel automatic machine TPA 140]. *Trudy Gruzinskogo politekhnicheskogo instituta*, 98–102. [in Russian].

#### COMPREHENSIVE STUDY OF THE DYNAMICS OF THE RETAINING MECHANISM OF THE AUTOMATIC MILL

#### Список джерел у транслітерації

1. Danchenko, V. N., Kolikov, A. P., Romantsev, B. A., Samusev, S. V. (2002). *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva. Uchebnik dlya vuzov. [Pipe production technology. Textbook for high schools]*. M.: Intermet-Inzheniring. [in Russian].

2. Rozov, N. V. (1974). *Proizvodstvo trub. Spravochnik. [Pipe production. Directory]*. M.: Metallurgiya. [in Russian].

3. Chechulin, Yu. B., Baranov, G. L., Ziomkovskiy, V. M., Pesin, Yu. V. (2010). Dinamicheskie nagruzki pri zakhvate zagotovki [Dynamic loads when gripping a workpiece.]. *Sb. nauchnykh trudov mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 15-letiyu so dnya sozdaniya regional'nogo Ural'skogo otdeleniya akademii inzhenernykh nauk im. A.M. Prokhorova. Ekaterinburg, № 1.* 154–159. [in Russian].

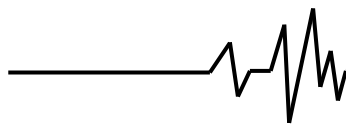
4. Chechulin, Yu. B., Kuznetsov, V. I., Dushkin, V. M., Ziomkovskiy, V. M., Ol'kov, I. S. (2011). Raschetnoe i eksperimental'noe obosnovanie modernizatsii uzlov krepleniya rabochey kleti avtomatstana [Estimated and experimental justification for the modernization of attachment points of the working stand of the automatic machine] *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya. №4.* 11–13. [in Russian].

5. Rakhmanov, S. R., Topolov, V. L. (2011). Eksperimental'noe issledovanie vibroaktivnosti stanov vintovoy prokatki trub truboprokatnogo agregata [An experimental study of the vibrational activity of screw rolling mills of a pipe rolling unit]. *Vibratsiya v tekhnike i tekhnologiyakh, № 2(62).* 91–96. [in Russian].

6. Bessonov, A. P. (1967). *Osnovy dinamiki mekhanizmov s peremennoy massoy zven'yev [Fundamentals of the dynamics of mechanisms with a variable mass of links]*. M.: Nauka. [in Russian].

7. Ol'shanskiy, V. P., Ol'shanskiy, S. V. (2013). Svobodnye kolebaniya ostsillyatora lineyno-peremennoy massy [Free oscillations of an oscillator of linearly variable mass]. *Vibratsiya v*

The results of the study of the dynamics of the mechanism for holding the mandrel of an automatic TPA mill are presented. The value of the axial force acting on the mandrel and the rod system of the mechanism of its holding is determined. Developed models of the mandrel retention mechanism have been developed, which made it possible to establish the nature of the development of dynamic processes on the output side of the automatic mill, taking into account the force parameters of the longitudinal rolling process of the sleeve and the parameters of the output side of the automatic mill. Mathematical models of the mandrel retention mechanism have been developed, taking into account the parameters of the technological process and the inertness of the rolled sleeve. The solution of the system of differential equations with variable coefficients is implemented numerically using the Runge-Kutta method for the corresponding dynamic models of the mandrel retention mechanism on the example of calculating the automatic mill TPA 350. The picture of the formation of dynamic processes in the mandrel retention mechanism during the implementation of the entire technological process of pipe production on an automatic mill has been clarified. taking into account the variable impact from the deformation zone and the change in the mass of the rolled sleeve. For various dynamic models, numerical solutions of problems were implemented, which made it possible to select the necessary technological and dynamic parameters of the mechanical system, to assign stable modes of rolling the sleeves on the automatic mill TPA 350. It is shown that the refined solution of the problem for three developed dynamic models of the mechanical system differs significantly from the previously known mathematical models. It has been established that the dynamics of the mechanism for holding the mandrel of the automatic TPA 350 mill is equivalent to the formation of the mechanism for the formation of different wall thickness of pipes. A mechanism for stabilizing the dynamics of the mandrel holding



mechanism by separating the sections of the output side of the mill is proposed.

**Key words:** pipe-rolling unit, automatic mill, working stand; sleeve, pipe, mandrel, rod, dynamics, variable mass, dynamic model, differential equations, numerical method; vibrations, vibroactivity, difference in wall thickness.

#### КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ МЕХАНІЗМУ УТРИМАННЯ ОПРАВКИ АВТОМАТИЧНОГО СТАНУ

Наведено результати дослідження динаміки механізму утримання оправки автоматичного стану ТПА. Визначено величину осьової сили, що впливає на опракування і стрижневу систему механізму її утримання. Розроблено розвинені моделі механізму утримання оправки, що дозволило встановити характер розвитку динамічних процесів на вихідній стороні автоматичного стану з урахуванням силових параметрів процесу поздовжньої прокатки гільзи і параметрів вихідний боку автоматичного стану. Розроблено математичні моделі механізму утримання оправки з урахуванням параметрів технологічного процесу і інертності прокочується гільзи. Рішення системи диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами реалізовано чисельно з

використанням методу Рунге-Кутта для відповідних динамічних моделей механізму утримання оправки на прикладі розрахунку автоматичного стану ТПА 350. Уточнена картина формування динамічних процесів в механізмі утримання оправки при реалізації всього технологічного процесу виробництва труб на автоматичному стані, з урахуванням змінного впливу з боку вогнища деформації і зміни маси прокочується гільзи. Для різних динамічних моделей реалізовані чисельні рішення задач, що дозволило вибрати необхідні технологічні і динамічні параметри механічної системи, призначити стійкі режими прокатки гільз на автоматичному стані ТПА 350. Показано, що уточнене рішення задачі для трьох розвинених динамічних моделей механічної системи істотно відрізняється від раніше відомих математичних моделей. Встановлено, що динаміка механізму утримання оправки автоматичного стану ТПА 350 еквівалентно формує механізм утворення разностенность труб. Запропоновано механізм стабілізації динаміки механізму утримання оправки шляхом роз'єднання секцій вихідний боку табору.

**Ключові слова:** трубопрокатний агрегат, автоматичний стан, робоча кліть; гільза, труба, опракування, стрижень, динаміка, змінна маса, динамічна модель, диференціальні рівняння, чисельний метод; коливання, віброактивність, разностенность.

#### Відомості про авторів

**Рахманов Сулейман Рахманович** – к.т.н., доцент кафедри теоретической механики Национальной металлургической академии Украины

**Зданевич Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Национальной металлургической академии Украины (ул. Акинфиева, 18, г. Днепр, 49027, Украина Телефон: (+38067) 5643420 e-mail: npfvostokplus@gmail.com).

**Рахманов Сулейман Рахманович** - к.т.н., доцент кафедри теоретичної механіки Національної металургійної академії України.

**Зданевич Сергій Володимирович** - кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Національної металургійної академії України (вул. Акинфьева, 18, м Дніпро, 49027, Україна Телефон: (+38067) 5643420 e-mail: npfvostokplus@gmail.com) .

**Rakhmanov Suleiman** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical Mechanics of the National Metallurgical Academy of Ukraine

**Zdanevich Sergey** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials of the National Metallurgical Academy of Ukraine (18 Akinfieva St., Dnipro, 49027, Ukraine Phone: (+38067) 5643420 e-mail: npfvostokplus@gmail.com) ...