

Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением

УДК 621.774.28

DOI: 10.14529/met190206

ДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО СТАНА ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА

С.Р. Рахманов

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина

Приведены результаты исследования уточненной математической динамической модели рабочей клетки автоматического стана трубопрокатного агрегата (ТПА). Выбрана пространственная система координат в центре масс рабочей клетки и преобразована исходная динамическую модель механической системы в упрощенную механическую систему жестких тел, определенным образом связанных между собой в опорных узлах упругими элементами. Пространственное положение механической системы в процессе колебаний рабочей клетки автоматического стана представлена соответствующими координатами в выбранной системе отсчета. С учетом определенных начальных и граничных условий поставленная задача представлена в постановке задачи динамики механической системы. Лапы станины и тумбы (шины), удерживающие рабочую клетку автоматического стана на опорных механизмах, считаются деформируемыми. Для упрощенной механической системы с четырьмя степенями свободы определены кинетическая и потенциальная энергии. Составлены дифференциальные уравнения движения рабочей клетки и узлов механизма удержания станины на опорных узлах автоматического стана ТПА с применением уравнения Лагранжа второго рода. Получены картины виброактивности элементов рабочей клетки и опорных узлов механизма удержания механической системы с четырьмя степенями свободы. Приведено численное решение системы дифференциальных уравнений и на примере расчета динамики рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 установлены особенности функционирования механической системы с четырьмя степенями свободы. Установлены параметры динамичности рабочей клетки автоматического стана и механизма ее удержания на опорных плоскостях, влияющие на величину разности прокатываемых гильз. Предложена схема модернизации механизма удержания рабочей клетки автоматического стана ТПА 350.

Ключевые слова: рабочая клетка, автоматический стан, труба, опорные узлы, виброактивность, динамика, масса, жесткость, колебания, центр масс, механическая система, разностность.

Введение

Условия эксплуатации отечественных трубопрокатных агрегатов (ТПА) влечет за собой ужесточение режимов функционирования основного и вспомогательного оборудования технологической линии. Автоматический стан, согласно циклограмме работы ТПА формирующий начальные параметры изделия в технологическом процессе производства бесшовных горячекатаных труб, является наиболее узким местом [1]. Прокатка гильзы на автоматическом стане ТПА характеризуется тем, что на гильзу, взаимодействующую с вальками и оправкой, воздействует стержневой

механизм ее удержания на оси прокатки. Следует отметить, что данные условия формируют специфические начальные условия технологического процесса, обуславливают сложное поведение рабочей клетки и в результате этого – нестационарные динамические процессы на самом автоматическом стане ТПА [2].

Анализ источников

Наименее изученными среди динамических процессов, сопровождающих процесс прокатки гильз на автоматическом стане, являются поведение станины рабочей клетки со всеми механизмами ее удержания. Особенно-

сти взаимодействия гильзы с рабочей клетью автоматического стана существенно влияют на характер функционирования данной механической системы. Опыт исследования условий эксплуатации ТПА с автоматическими станами показывает, что их отличительной особенностью от других станов технологического цикла прокатки труб является наличие нестационарных динамических процессов. При этом динамические нагрузки, например на автоматическом стане ТПА 350, в периоды захвата гильзы в 3–5 раза превосходят нагрузки при установившемся процессе прокатки. Математическая модель процесса взаимодействия прокатываемой заготовки с рабочей клетью, предложенная в работах [3, 4], не позволяет полностью представить особенности функционирования рабочей клетки в процессе прокатки гильзы. Однако анализ математической модели нестационарного взаимодействия прокатываемого металла с рабочей клетью стана, рассмотренной в работе [3], позволил получить возможность описать формирование нагрузок в периоды переходных процессов.

Среди совокупности нагрузок, действующих на рабочую клетку и другие базовые элементы автоматического стана ТПА, наименее изученными являются значительные по величине и изменяющиеся во времени нестационарные динамические нагрузки. Многочисленные исследования условий эксплуатации автоматических станов ТПА показали, что при захвате гильз валками рабочие клетки совершают неконтролируемые движения в пространстве, что оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние элементов клеток, формирует сложные картины процессов прокатки гильз,

приводящие к заметным искажениям очагов деформации. Следовательно, для обеспечения устойчивой геометрии гильз, прокатываемых на автоматических станах ТПА, кроме всего, существенное практическое значение имеет решение задачи обеспечения стабилизации состояния рабочих клеток.

Цель работы

Определение реальных спектров и уровней динамических нагрузок позволило бы разработать рекомендации по совершенствованию рабочих клеток автоматических станов ТПА, расширить их технологические возможности, повысить долговечность и надежность функционирования.

Метод решения задачи

Данная работа выполнена на основе развития математической модели динамических процессов в механической системе автоматического стана ТПА, где реализованы определенные шаги по установлению параметров функционирования рабочей клетки с прокатываемой гильзой в постановке фундаментальных задач динамики. Предложенный подход более корректен и удобен при изучении сложных динамических явлений в элементах автоматического стана ТПА. Ниже в работе приведены результаты исследования динамики рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 путем развития принятых расчетных схем и математической модели исходной механической системы [4, 5].

Автоматический стан ТПА 350 и одна из схем размещения датчиков, информирующих о пространственных перемещениях различных участков рабочей клетки, представлены на рис. 1.

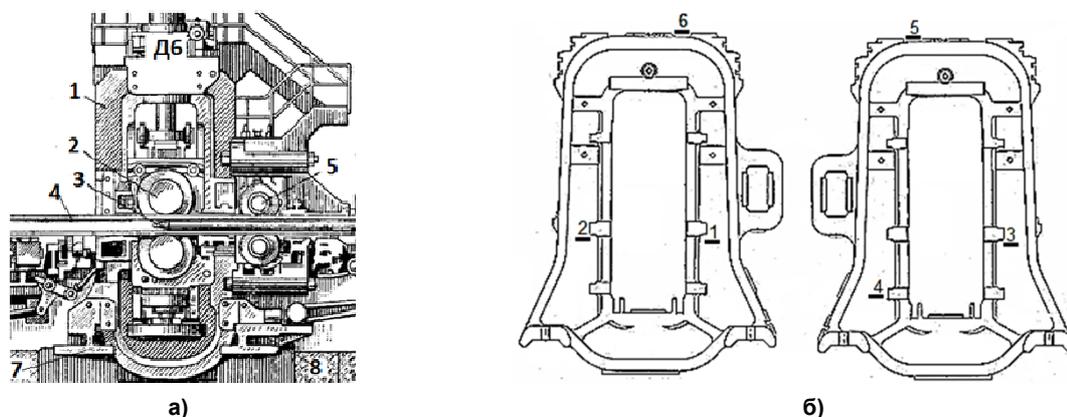


Рис. 1. Автоматический стан ТПА (а) и схема размещения датчиков на полустанинах рабочей клетки ТПА 350 (б). 1 – станина клетки стана; 2 – рабочие валки; 3 – оправка со стержнем; 4 – гильза (трубная заготовка); 5 – ролики обратной подачи; 7, 8 – узлы удержания рабочей клетки

Фиксация линейных и угловых смещений участков рабочей клетки осуществлялась универсальными датчиками пространственного ориентирования, основным чувствительным элементом которых является динамический инклинометрический модуль DCA126-T, разработанный швейцарской компанией OEM и производимый компанией RION Technology (Гонконг) [7]. На рис. 2 представлены универсальные датчики пространственного ориентирования и полученные в результате обработки информации датчиков картины пространственных перемещений различных участков клетки во время прокатки гильз.

На рис. 3 представлены линейные и угловые смещения станины рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 при прокатке трубы 273 × 6,3, полученные по показаниям датчика Дб.

Интенсивность нестационарного воздействия со стороны очага деформации на рабочую клетку, изменение во времени инертности трубы и параметров жесткости крепления ра-

бочей клетки к опорным плоскостям значительно усложняют описание динамических процессов на автоматическом стане ТПА. Отметим, что исследование развитой динамической модели «рабочая клетка – механизм удержания клетки» позволит проанализировать динамическое состояние как элементов рабочей клетки, так и взаимосвязанных узлов механической системы в течение всего процесса прокатки гильзы. Актуальным становится установление взаимосвязи между динамическими процессами, например на автоматическом стане ТПА 350, и параметрами разностенности прокатываемых гильз. На основании полученного следует разработать ряд мероприятий и предложений по комплексной модернизации рабочей клетки и оборудования выходной стороны, например автоматического стана ТПА 350. Для формирования научно обоснованных предложений по совершенствованию конструкции рабочей клетки автоматического стана ТПА необходимо более глубоко изучить влияние различных параметров и

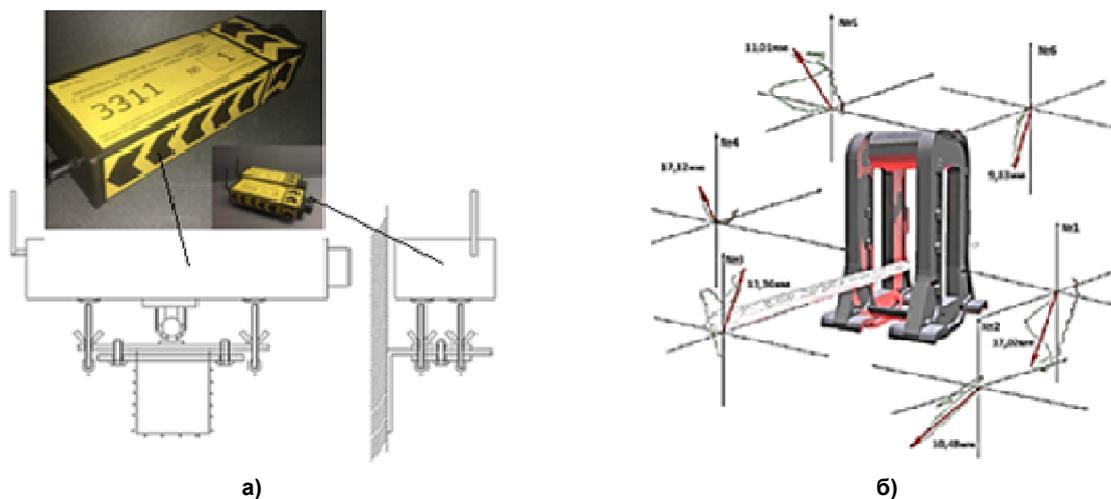


Рис. 2. Универсальные датчики пространственного ориентирования (а) и полученные в результате обработки информации датчиков картины пространственных перемещений различных участков клетки во время прокатки гильз (б)

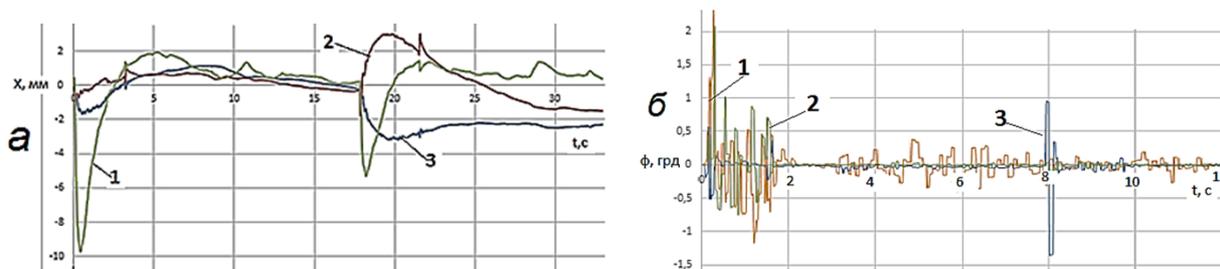


Рис. 3. Линейные (а) и угловые (б) смещения рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 при прокатке трубы 273 × 6,3 (показания датчика № 6): 1 – линейные и угловые смещения датчика относительно вертикали; 2 – линейные и угловые смещения датчика относительно оси прокатки; 3 – линейные и угловые смещения датчика относительно оси, параллельной начальному положению осей валков

особенностей формирования технологического процесса прокатки гильз на динамику всей механической системы стана и качество готовой продукции. Выбранное направление исследований отличается от известных [1–5] подходом к анализу и синтезу взаимосвязанных динамических процессов с учетом податливости опорных узлов механизма удержания станины на опорных шинах и циклически изменяющихся технологических нагрузок, действующих со стороны очага деформации на элементы рабочей клетки.

Для установления взаимосвязи динамики рабочей клетки с условиями функционирования автоматического стана ТПА переходим к описанию математической модели динамических процессов. Математическую модель исходной механической системы рабочей клетки автоматического стана ТПА в наиболее общем виде представляем с помощью дифференциальных уравнений, описывающих поведение выбранной расчетной схемы (рис. 4).

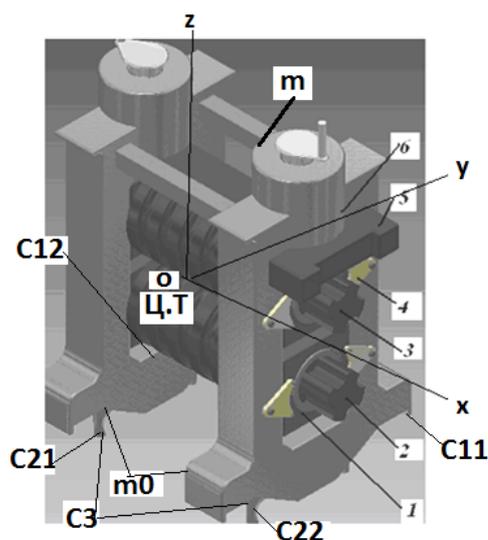


Рис. 4. Расчетная схема рабочей клетки автоматического стана ТПА

Далее переходим к анализу выбранной динамической модели рабочей клетки автоматического стана ТПА с восемью степенями свободы и решению многофакторной задачи.

Выбираем пространственную систему координат в центре масс рабочей клетки и преобразуем исходную сложную динамическую модель механической системы с использованием методик [3, 5, 6] в упрощенную механическую систему жестких тел, определенным образом связанных между собой в опорных узлах упругими элементами. Простран-

ственное положение данной механической системы в процессе колебаний характеризуется соответствующими координатами в выбранной системе отсчета. Исходя из выбранной расчетной схемы рабочей клетки стана (см. рис. 4) определяем кинетическую и потенциальную энергии механической системы соответственно. С учетом определенных начальных и граничных условий поставленную задачу представляем в постановке традиционной задачи динамики механической системы [7–14].

Считая лапы станины и тумбы (шины), удерживающие рабочую клетку на опорных механизмах, деформируемыми, для упрощенной механической системы с четырьмя степенями свободы кинетическую и потенциальную энергии системы находим в виде:

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{z}_{11}^2 + i^2\dot{\phi}_{16}^2) + 2m_0(\dot{z}_{12}^2 + \dot{z}_{13}^2) + \frac{1}{2}m(\dot{z}_{21}^2 + i^2\dot{\phi}_{26}^2) + 2m_0(\dot{z}_{22}^2 + \dot{z}_{23}^2); \quad (1)$$

$$\Pi = 2\frac{1}{2}c_{11}(z_{11} + a\phi_{16})^2 + 2\frac{1}{2}c_{12}(z_{11} - b\phi_{16})^2 + 2\frac{1}{2}c_3(z_{12} + z_{13})^2 + 2\frac{1}{2}c_{21}(z_{21} + c\phi_{26})^2 + 2\frac{1}{2}c_{22}(z_{21} - d\phi_{26})^2 + 2\frac{1}{2}c_3(z_{22} + z_{23})^2, \quad (2)$$

где m – масса рабочей клетки автоматического стана; m_0 – масса опорного узла рабочей клетки автоматического стана; c_{11}, c_{12}, c_{21} и c_{22} – приведенные жесткости соответственно передней и задней частей опорных узлов рабочей клетки стана; c_3 – приведенная жесткость тумб (шин) механизма удержания рабочей клетки; z_{11}, z_{12} – динамические перемещения центра масс рабочей клетки автоматического стана в плоскости z – y ; z_{21}, z_{22} – динамические перемещения передней части рабочей клетки автоматического стана в плоскости z – x ; z_{13}, z_{23} – динамические перемещения опорных узлов (шин или тумб) рабочей клетки автоматического стана в вертикальной плоскости; ϕ_{16}, ϕ_{26} – угловые перемещения станины рабочей клетки стана вокруг осей x и y ; a, b, c, d – параметры расположения центра масс рабочей клетки в выбранной системе отсчета; e – расстояние от оси x до точки приложения технологической нагрузки $P(t)$ со стороны прокатываемой гильзы. Из [5] известно,

что технологическая нагрузка, действующая со стороны очага деформации на валки рабочей клетки, носит гармонический характер:

$$P(t) = P_0 + P_1 \sin(\omega t).$$

Здесь P_0 – статическая составляющая силы прокатки трубы, а P_1 – амплитудное значение данной силы. Отметим, что гармоническая составляющая силы прокатки гильзы имеет соответствующую частоту ω в силу винтовой разностенности гильзы после прошивного стана.

Используя уравнения Лагранжа, составляем дифференциальные уравнения движения рабочей клетки автоматического стана ТПА. В очередном приближении для принятой динамической модели механической системы с четырьмя степенями свободы в постановке базовой задачи Коши запишем:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 z_{11}(t)}{dt^2} + 2c_{11}(z_{11}(t) - z_{12}(t) + a\varphi_{16}(t)) + 2c_{12}(z_{11}(t) - z_{12}(t) - b\varphi_{16}(t)) &= 0; \\ z_{11}(0) = 0,01; \quad \frac{dz_{11}(0)}{dt} &= 0; \\ 2m_0 \frac{d^2 z_{12}(t)}{dt^2} + 2c_{11}(z_{11}(t) - z_{12}(t) + a\varphi_{16}(t)) + 2c_3 z_{13}(t) &= 0; \\ z_{12}(0) = 0; \quad \frac{dz_{12}(0)}{dt} &= 0; \\ 2m_0 \frac{d^2 z_{13}(t)}{dt^2} + 2c_{12}(z_{11}(t) - z_{12}(t) - b\varphi_{16}(t)) + 2c_3 z_{13}(t) &= 0; \\ z_{13}(0) = 0; \quad \frac{dz_{13}(0)}{dt} &= 0; \\ m i_1^2 \frac{d^2 \varphi_{16}(t)}{dt^2} + 2c_{11}a(z_{11}(t) - z_{12}(t) + a\varphi_{16}(t)) - 2c_{12}b(z_{11}(t) - z_{12}(t) - b\varphi_{16}(t)) &= (P_0 + P_1 \sin(\omega t))e; \\ \varphi_{16}(0) = 0,015; \quad \frac{d\varphi_{16}(0)}{dt} &= 0. \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 z_{21}(t)}{dt^2} + 2c_{21}(z_{21}(t) - z_{22}(t) + c\varphi_{26}(t)) + 2c_{22}(z_{21}(t) - z_{22}(t) - d\varphi_{26}(t)) &= 0; \\ z_{21}(0) = 0,01; \quad \frac{dz_{21}(0)}{dt} &= 0; \\ 2m_0 \frac{d^2 z_{22}(t)}{dt^2} + 2c_{21}(z_{21}(t) - z_{22}(t) + c\varphi_{26}(t)) + 2c_3 z_{23}(t) &= 0; \\ z_{22}(0) = 0; \quad \frac{dz_{22}(0)}{dt} &= 0; \\ 2m_0 \frac{d^2 z_{23}(t)}{dt^2} + 2c_{22}(z_{21}(t) - z_{22}(t) - d\varphi_{26}(t)) + 2c_3 z_{23}(t) &= 0; \\ z_{23}(0) = 0; \quad \frac{dz_{23}(0)}{dt} &= 0; \\ m i_2^2 \frac{d^2 \varphi_{26}(t)}{dt^2} + 2c_{21}c(z_{21}(t) - z_{22}(t) + c\varphi_{26}(t)) - 2c_{22}d(z_{21}(t) - z_{22}(t) - d\varphi_{26}(t)) &= 0; \\ \varphi_{26}(0) = 0,015; \quad \frac{d\varphi_{26}(0)}{dt} &= 0, \end{aligned}$$

где i_1 – радиус инерции рабочей клетки относительно оси x ; i_2 – радиус инерции рабочей клетки относительно оси y .

Далее решение системы дифференциальных уравнений (3) реализуем численно методом Рунге – Кутты в среде программного продукта Mathcad, для наиболее распространенной первой формы колебаний механической системы «рабочая клетка – механизм удержания клетки».

Динамические особенности функционирования рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 с учетом принципа суперпозиции линейных и угловых перемещений механической системы представлены на рис. 5.

Сопоставление результатов численного расчета (см. рис. 5) и экспериментальных исследований (см. рис. 3) показывает, что дифференциальные уравнения (3) с достаточной высокой степенью точности описывают вынужденные колебания рабочей клетки на опорных механизмах автоматического стана ТПА 350. Амплитудно-частотные характеристики динамических процессов при колебаниях рабочей клетки за время реализации всего технологического процесса прокатки гильзы на автоматическом стане ТПА 350 превышают до-

пустимый уровень виброактивности механической системы.

Для получения объективной картины изменения качественных характеристик прокатываемых труб до и после восстановления (ремонта) клетки автоматического стана ТПА 350 и была произведена оценка данных толщинометрии труб, прокатанных в разное время (до и после ремонта механизма удержания рабочей клетки соответственно).

На рис. 6 приведена картина изменения разностенности по длине партии черновых труб, прокатанных на автоматическом стане ТПА 350 [7]. Результаты исследования разностенности прокатываемых труб указывают на правомерность принятых решений по модернизации опорных узлов механизма удержания рабочей клетки автоматического стана ТПА 350.

Известно, что в ходе реализации технологического процесса высокая динамичность системы «рабочая клетка автоматического стана ТПА – механизм её удержания» обуславливает формирование повышенной разно-

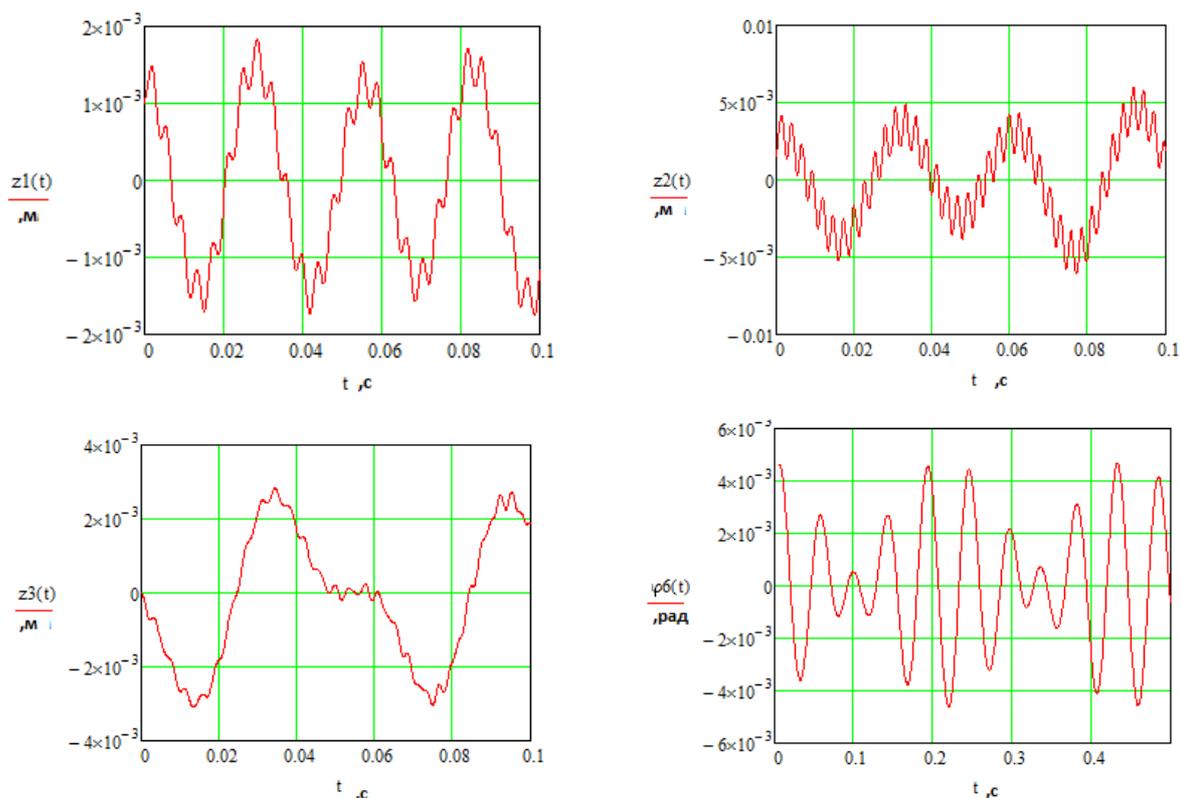


Рис. 5. Динамика рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 (прокатка черновой трубы диаметром $273 \times 6,3$ мм, материал – сталь 20): $z_1(t)$ – суммарные линейные смещения центра масс рабочей клетки на опорах; $z_2(t)$ – суммарные линейные смещения передних лап рабочей клетки на опорах; $z_3(t)$ – суммарные линейные смещения задних лап рабочей клетки на опорах; $\varphi_6(t)$ – суммарные угловые перемещения рабочей клетки стана

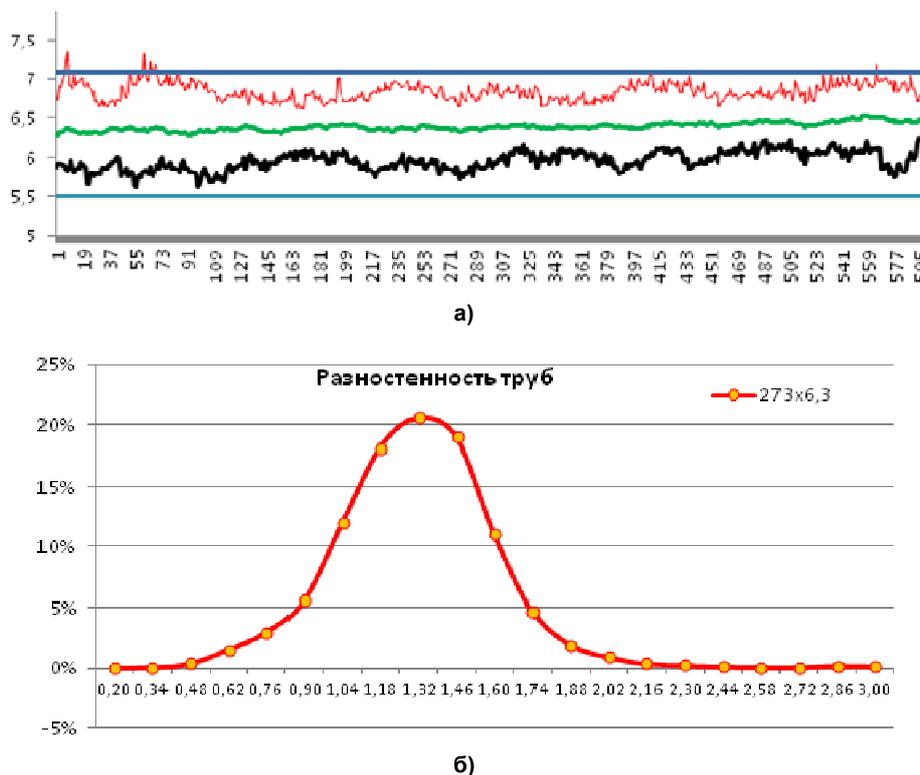


Рис. 6. Результаты стенкометрии автоматического стана ТПА 350 (а) и распределение продольной разностенности труб (б) размером 273х6,3 мм после ремонта механизма удержания рабочей клетки

стенности гильзы [15]. На последующих участках воздействия на обрабатываемое изделие процесс носит сложный и трудно устранимый характер. Очевидно, что учет динамики рабочей клетки и интенсивности воздействия со стороны очага деформации стана является определяющим параметром для рассматриваемой модели. Следует отметить, что возможность математического моделирования различных режимов прокатки гильзы на этапе проектирования технологических процессов прокатки труб на автоматическом стане ТПА существенно отличает полученные результаты от результатов ранее известных работ в области исследования динамики и виброактивности упругих подсистем рабочей клетки и механизма ее удержания на опорных узлах стана [10–14].

Выводы

Уточнена расчетная схема взаимосвязанных механических подсистем рабочей клетки автоматического стана ТПА и разработана математическая модель динамики для механической системы «рабочая клетка – механизм удержания клетки» для механической системы с четырьмя степенями свободы. Учтены цик-

лический характер технологических нагрузок и динамические характеристики базовых элементов (шин, тумб и анкеров) механизма удержания рабочей клетки автоматического стана ТПА на соответствующих опорных плоскостях. Приведены результаты численного решения дифференциальных уравнений перемещений узловых элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА. Это позволило в комплексе оценить амплитудно-частотные характеристики как рабочей клетки, так и подсистем опорных узлов клетки автоматического стана.

Литература

1. Соловейчик, П.М. Трубопрокатные агрегаты с автомат-станом / П.М. Соловейчик. – М.: Металлургия, 1967. – 160 с.
2. Технология трубного производства: учеб. для вузов. / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интермет, 2002. – 640 с.
3. Динамика и прочность прокатного оборудования / Ф.К. Иванченко, П.И. Полухин, М.А. Тылкин, В.П. Полухин. – М.: Металлургия, 1970. – 486 с.
4. Адамия, Р.Ш. Оптимизация нагрузок

прокатных станов / Р.Ш. Адамия. – М.: Металлургия, 1978. – 232 с.

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

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

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

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

9. Кожевников, С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / С.Н. Кожевников. – Киев: Наукова думка, 1986. – 288 с.

10. Рахманов, С.Р. Динамика рабочей клетки автоматического стана трубoproкатного агрегата / С.Р. Рахманов, Н.В. Любин // Вибрация в технике и технологиях. – 2016. – № 1 (81). – С. 105–112.

11. Вышинский, В.Т. Динамическая модель рабочей клетки чистовой группы НТЛС 1680 / В.Т. Вышинский, В.В. Поворотный,

А.В. Мокиевец // Пластическая деформация металлов: сб. науч. тр.: в 2 т. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – Т. 2: – С. 61–66.

12. Рахманов, С.Р. Комплексное исследование динамики автоматического стана трубoproкатного агрегата / С.Р. Рахманов, А.А. Азимов // Материалы Международной научно-технической конференции «Интеллектуальные технологии в машиностроении». – Баку, 2017. – С. 386–395.

13. Рахманов, С.Р. Комплексное исследование динамики автоматического стана трубoproкатного агрегата / С.Р. Рахманов, А.А. Азимов // Машиноведение. – 2016. – Т. 5, № 2. – С. 39–47.

14. Рахманов, С.Р. Исследование динамики переходных процессов на автоматическом стане трубoproкатного агрегата / С.Р. Рахманов, И.П. Хацкелян, Д.Ю. Гармашов // Пластическая деформация металлов. – Днепр, 2017. – С. 203–209.

15. Технический отчёт мониторинга пространственного положения клетки в процессе эксплуатации с регистрацией динамических смещений и углов отклонения клетки автоматстана ТПА 350. – Никополь, 2018 – 287 с.

Рахманов Сулейман Рахманович, канд. техн. наук, доцент, кафедра теоретической механики и сопротивления материалов, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина; npfvostok@mail.ru.

Поступила в редакцию 26 сентября 2018 г.

DOI: 10.14529/met190206

DYNAMIC FEATURES OF FUNCTIONING OF THE PLUG MILL OF THE PIPE-ROLLED UNIT

S.R. Rakhmanov, npfvostok@mail.ru

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

The results of the study of the refined mathematical dynamic model of the working stand of the plug mill of the pipe-rolling unit (TPA) are presented. The spatial coordinate system in the center of mass of the working stand is selected and the initial dynamic model of the mechanical system is transformed into a simplified mechanical system of rigid bodies, which are interconnected in a certain way in the supporting nodes by elastic elements. The spatial position of the mechanical system in the process of oscillation of the working stand of the plug mill is represented by the corresponding

coordinates in the selected reference system. Taking into account certain initial and boundary conditions, the task is presented in the formulation of the problem of the dynamics of a mechanical system. Assuming that the legs of the bed and the pedestals (tires) that hold the working stand of the plug mill on the support mechanisms are deformed, the kinetic and potential energies of the system are determined for a simplified mechanical system with four degrees of freedom. The differential equations of the movement of the working stand and the units of the mechanism of holding the bed on the support nodes of the pipe-rolled unit were compiled using the Lagrange equation of the second kind. Pictures of the vibroactivity of the elements of the working stand and supporting units of the mechanism for holding the mechanical system with four degrees of freedom are obtained. A numerical solution of the system of differential equations is given, and by the example of calculating the dynamics of the working stand of the plug mill TPA-350, the features of the functioning of the mechanical system with four degrees of freedom are established. The parameters of the dynamism of the working stand of the plug mill and the mechanism of its retention on the reference planes, affecting the difference wall thickness of the rolled shells, are established. A scheme has been proposed to modernize the mechanism for holding the working stand of an plug mill TPA-350.

Keywords: working stand, plug mill, pipe, support nodes, vibroactivity, dynamics, mass, rigidity, oscillations, center of mass, mechanical system, fracturing.

References

1. Soloveychik P.M. *Truboprokatnyye agregaty s avtomat-stanom* [Pipe-Rolling Units with Plug Mill]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967. 160 p.
2. Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romantsev B.A., Samusev S.V. *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva*. [Pipe Production Technology]. Moscow, Internet Publ., 2002. 640 p.
3. Ivanchenko F.K., Polukhin P.I., Tylkin M.A., Polukhin V.P. *Dinamika i prochnost' prokatnogo oborudovaniya*. [Dynamics and Strength of Rolling Equipment]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 486 p.
4. Adamiya R.Sh. *Optimizatsiya nagruzok prokatnykh stanov*. [Optimization of Rolling Mill Loads]. Moscow, Metallurgiya Puubl., 1978. 232 p.
5. Mandel'shtam L.I. *Lektsii po teorii kolebaniy*. [Lectures on the Vibration Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 470 p.
6. Kozhevnikov S.N. *Dinamika nestatsionarnykh protsessov v mashinakh*. [Dynamics of Non-Stationary Processes in Machines]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 286 p.
7. Panovko Ya.G. *Osnovy prikladnoy teorii uprugikh kolebaniy*. [Fundamentals of the Applied Theory of Elastic Vibrations]. Moscow; Leningrad, GNTI Publ., 1957. 546 p.
8. Vyshinskiy V.T. [Research and Features of Simplifying Dynamic Models of Row Mechanical Chains]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy], 1999, no. 6, pp. 35–37. (in Russ.)
9. Kozhevnikov S.N. *Dinamika nestatsionarnykh protsessov v mashinakh*. [Dynamics of Non-Stationary Processes in Machines]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 288 p.
10. Rakhmanov S.R., Lyubin N.V. [Dynamics of the Working Stand of the Plug Mill Tube-Rolling Unit]. *Vibratsiya v tekhnike i tekhnologiyakh* [Vibrations in Technics and Technologies], 2016, no. 1 (81), p. 105–112. (in Russ.)
11. Vyshinskiy V.T., Povorotniy V.V., Mokiyevets A.V. [Dynamic Model of the Working Stand of the Finishing Group of a Continuous Thin-Sheet Mill]. *Plasticheskaya deformatsiya metallov. T. 2* [Plastic Deformation of Metals. Vol. 2]. Dnepropetrovsk, Aktsent PP Publ., 2014, pp. 61–66. (in Russ.)
12. Rakhmanov S.R., Azimov A.A. [Comprehensive Study of the Dynamics of the Plug Mill Tube-Rolling Unit]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Intellektual'nyye tekhnologii v mashinostroyenii"* [Materials of the International Scientific and Technical Conference "Intelligent Technologies in Mechanical Engineering"]. Baku, 2017, pp. 386–395. (in Russ.)
13. Rakhmanov S.R., Azimov A.A. [Comprehensive Study of the Dynamics of the Plug Mill Tube-Rolling Unit]. *Mashinovedeniye* [Machine Science], 2016, vol. 5, no. 2, pp. 39–47. (in Russ.)
14. Rakhmanov S.R., Khatskelyan I.P., Garmashov D.Yu. [Investigation of the Dynamics of Transients in the Plug Mill Tube-Rolling Unit]. *Plasticheskaya deformatsiya metallov* [Plastic Deformation of Metals]. Dnepr, 2017, pp. 203–209. (in Russ.)

15. *Tekhnicheskij otchot monitoringa prostranstvennogo polozheniya kleti v protsesse ekspluatatsii s registratsiyey dinamicheskikh smeshcheniy i uglov otkloneniya kleti avtomatstana TPA 350.* [Technical Report on the Monitoring of the Spatial Position of the Stand during Operation with the Registration of Dynamic Displacements and Deviations of the Stand of the Plug Mill TPA-350]. Nikol'p, 2018. 287 p.

Received 26 September 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Рахманов, С.Р. Динамические особенности функционирования рабочей клетки автоматического стана трубoproкатного агрегата / С.Р. Рахманов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 53–62. DOI: 10.14529/met190206

FOR CITATION

Rakhmanov S.R. Dynamic Features of Functioning of the Plug Mill of the Pipe-Rolled Unit. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 53–62. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190206
