

Исследование динамики рабочей клетки автоматического стана трубопрокатного агрегата

S. R. Rakhmanov /Cand. Sci. (Tech.)/
V. T. Vyshinsky / Cand. Sci. (Tech.)/NPF "East Plus", Dnipro, Ukraine
National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro,
Ukraine

Study of the dynamics of the working cell of the automatic mill of the pipe-rolling unit

Цель. Определение реального спектра и уровня динамических нагрузок позволило бы разработать рекомендации по совершенствованию автоматического стана ТПА-350, с целью расширения его технологических возможностей, повышения надежности функционирования и долговечности.

Методика. Данная работа выполнена на основе развития математической модели динамических процессов в механической системе автоматического стана ТПА, где сделана попытка по выявлению особенностей функционирования рабочей клетки с прокатываемой гильзой в постановке задач динамики. Очевидно, предложенный подход более корректен и удобен при изучении сложных динамических явлений в элементах автоматического стана ТПА.

Результаты. Приведены результаты исследования динамики рабочей клетки автоматического стана трубопрокатного агрегата (ТПА). Установлены основные параметры функционирования рабочей клетки, например автоматического стана ТПА 350, и разработана математическая модель базовой задачи динамики механической системы. Составлены дифференциальные уравнения движения для выбранной модели рабочей клетки и упругих элементов механизма удержания станины на опорных узлах автоматического стана ТПА. Получены соответствующие картины колебаний рабочей клетки. Выявлены некоторые особенности функционирования рабочей клетки на примере автоматического стана ТПА 350. Установлены параметры динамичности рабочей клетки стана, влияющие на величину разностенности прокатываемых гильз.

Научная новизна. Установлена взаимосвязь динамики рабочей клетки с условиями функционирования автоматического стана ТПА на основе упрощенной математической модели динамических процессов. Составлена математическая модель механической системы рабочей клетки автоматического стана ТПА. Механическая система рабочей клетки стана в наиболее общем виде представлена с помощью дифференциальных уравнений, описывающих поведение выбранной расчетной схемы системы с двумя степенями свободы.

Практическая значимость. Предложена схема модернизации рабочей клетки и механизма удержания рабочей клетки автоматического стана ТПА-350. (Ил. 4. Библогр.: 8 назв.)

Ключевые слова: исследование, автоматический стан ТПА-350, модернизация рабочей клетки, математическая модель, расширение технологических возможностей, долговечность.

Введение. Ужесточение требований к потребительским характеристикам продукции, выпускаемой трубопрокатными агрегатами с автомат-станом (ТПА), повышение темпа их работы влечет за собой ужесточение режимов функционирования оборудования всей технологической линии. Автоматический стан является наиболее узким местом при реализации требуемых параметров производимых бесшовных труб. Прокатка гильз (труб) на автоматическом стане ТПА сопровождается значительными динамическими нагрузками, возникающими, как правило, в период захвата гильзы с валками. Процесс прокатки на

автоматическом стане, помимо всего прочего, существенно осложнен тем, что гильза, взаимодействуя с валками, одновременно взаимодействует с оправкой и стержневой системой механизма её удержания. Данные условия, наряду со всеми другими, формируя определенные начальные условия технологического процесса, обуславливают сложное напряженно-деформированное состояние элементов рабочей клетки и развитие нестационарных процессов на самом автоматическом стане ТПА.

Анализ источников. Среди процессов, сопровождающих прокатку гильз на автоматическом

стане, наименее изученными являются процессы взаимодействия заготовки с его рабочей клетью. Во многих исследованиях рабочих клетей автоматических станов ТПА динамические явления рассматриваются с энергетической точки зрения в отрыве от особенностей функционирования самого процесса прокатки гильзы, без учета податливостей упругих связей механической системы стана [1; 2]. Такие грубые допущения приводят к существенным отличиям расчетных нагрузок в элементах оборудования от характера и значений величин действительных значений, зафиксированных на действующем оборудовании [3]. При этом нагрузки, например на автоматическом стане ТПА-350, в периоды захвата гильзы в 3...5 раза превосходят нагрузки при установившемся процессе прокатки. Возникающие колебания существенно влияют на характер функционирования всей механической системы.

Математическая модель процесса взаимодействия заготовки с валками, предложенная в работах [4; 5], не позволяет полностью выявить особенности функционирования рабочей клетки в процессе прокатки гильзы. Однако анализ математической модели нестационарного взаимодействия прокатываемого металла с рабочей клетью, представленный в работе [4], позволил получить выражения для создания упрощенных картин формирования динамических нагрузок в периоды переходных состояний технологического процесса. Мониторинг условий эксплуатации автоматического стана ТПА350 [6] показал, что при захвате гильзы валками, помимо всего прочего, рабочая клеть совершает неконтролируемые движения в пространстве (рис. 1), что оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние элементов клетки, формирует сложную картину процесса прокатки гильзы, приводящую к заметному искажению очага деформации. Следовательно, для обеспечения устойчивой геометрии гильз, прокатываемых на автоматическом стане ТПА, кроме всего, существенное практическое значение имеет решение задачи обеспечения стабилизации состояния рабочей клетки.

Цель работы. Определение реального спектра и уровня динамических нагрузок позволило бы разработать рекомендации по совершенствованию автоматического стана ТПА-350, с целью расширения его технологических возможностей, повышения надежности функционирования и долговечности.

Метод решения задачи. Данная работа выполнена на основе развития математической модели динамических процессов в механической системе автоматического стана ТПА, где сделана попытка по выявлению особенностей функционирования

рабочей клетки с прокатываемой гильзой в постановке задач динамики. Очевидно, предложенный подход более корректен и удобен при изучении сложных динамических явлений в элементах автоматического стана ТПА.

Ниже приведены результаты исследования динамики рабочей клетки автоматического стана ТПА путем развития принятых расчетных схем и математической модели исходной механической системы [4; 5]. Дальнейшие исследования направлены на установление влияния основных параметров механизмов удержания рабочей клетки автоматического стана ТПА на характер функционирования механической системы в целом. Очевидно, предложенный подход более корректен и необходим при изучении сложных динамических явлений в базовых элементах рабочей клетки автоматического стана ТПА-350.

Известно, что для реализации устойчивых технологических процессов прокатки гильзы на автоматических станах отечественных ТПА и стабилизации рабочей клетки используют многочисленные фиксирующие и удерживающие механизмы [1; 2]. На рабочую клеть автоматического стана в периоды осуществления основных технологических операций действуют значительные статические и изменяющиеся во времени нагрузки со стороны прокатываемой гильзы. Интенсивность нестационарного воздействия со стороны очага деформации на рабочую клеть, изменение во времени инертности трубы и параметров жесткости крепления рабочей клетки к опорным плоскостям значительно усложняет описание динамических процессов на автоматическом стане ТПА. Объектом исследования в рамках принятых моделей являются развитые динамическая и математическая модели механической системы «рабочая клеть – механизм удержания клетки» автоматического стана ТПА.

В период проведения комплекса работ по обследованию состояния элементов станины клетки автоматического стана ТПА-350 и узлов её закрепления на фундаменте [6] было выявлено, что рамные составляющие станины совершают сложные перемещения в пространстве. Об особенностях этих перемещений можно судить по смещениям одной из зон размещения датчиков, использованных при проведении мониторинга. На рис. 1 представлены перемещения зоны размещения одного из универсальных датчиков пространственного ориентирования, установленного на верхней поперечине одной из рам станины.

На рис. 1а приведены перемещения датчика в направлениях: совпадающем с направлением оси прокатки – 2; в горизонтальной плоскости в направлении, перпендикулярном оси прокатки – 3 по вертикали – 1. На рис. 1б приведены угловые

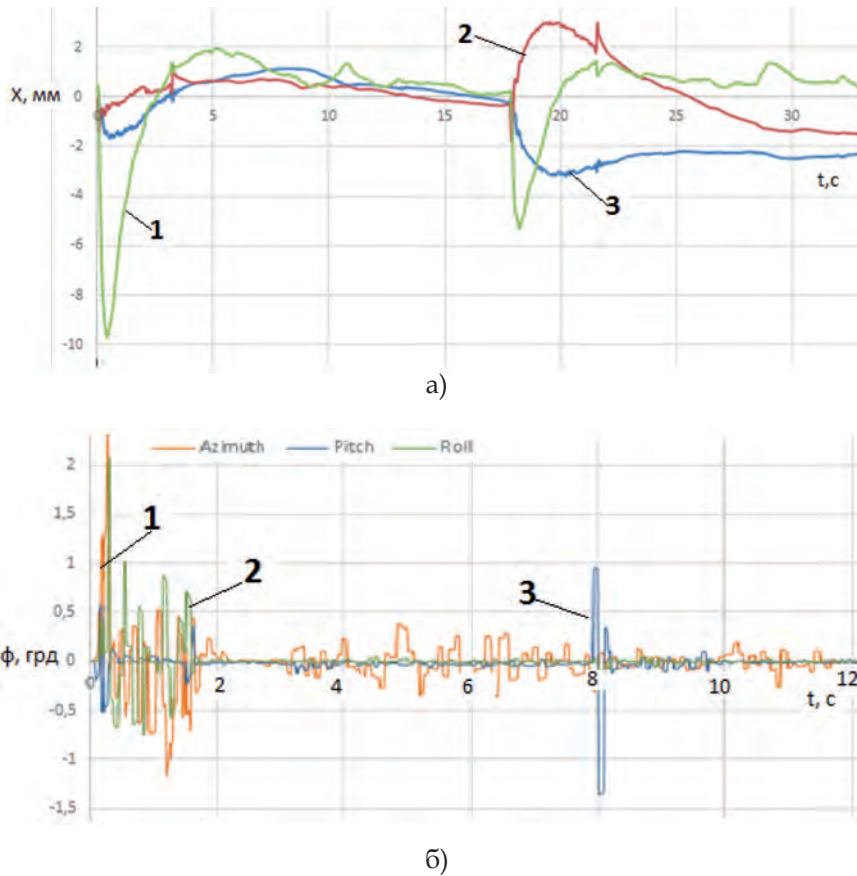


Рис. 1. Линейные и угловые смещения рабочей клетки автоматического стана ТПА-350 при прокатке трубы 273×6,3 (показания датчика пространственного ориентирования, установленного на верхней поперечине одной из рам станины)

перемещения вокруг осей: вертикальной – 1; совпадающей с направлением оси прокатки – 2; размещённой в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси прокатки – 3. Отметим, что исследование развитой динамической модели «рабочая клетка – механизм удержания клетки» позволит проанализировать динамическое состояние как рабочей клетки, так и взаимосвязанных узлов механической системы в течение всего процесса прокатки гильзы. При этом представляется возможность решения актуальных задач установления взаимосвязей между динамическими процессами, например на автоматическом стане ТПА-350, и параметрами разностенности прокатываемых гильз.

Выбранное направление исследований отличается от известных [1–8] более глубоким подходом к анализу взаимосвязанных процессов; учетом податливости опорных узлов механизма удержания станины и циклически изменяющихся нестационарных 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 процес-

сов. 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. 2б). Далее переходим к анализу выбранной динамической модели рабочей клетки автоматического стана ТПА и решению поставленной задачи.

Выбрав пространственную систему координат с началом в центре масс рабочей клетки стана и преобразовав исходную сложную динамическую модель механической системы рабочей клетки автоматического стана с использованием методик [3; 5; 7; 8] в упрощенную механическую систему с 2 степенями свободы, рассматриваем рабочую клетку стана как систему жестких тел, определенным образом связанных между собой в опорных узлах упругими элементами. Пространственное положение данной механической системы в процессе колебаний характеризуется соответствующими координатами в выбранной системе отсчета. Исходя из выбранной расчетной схемы рабочей клетки стана (рис. 2б) определяем кинетическую и потенциальную энергии механической системы соответственно. С учетом определенных начальных и граничных условий поставленную задачу представляем в постановке традицион-

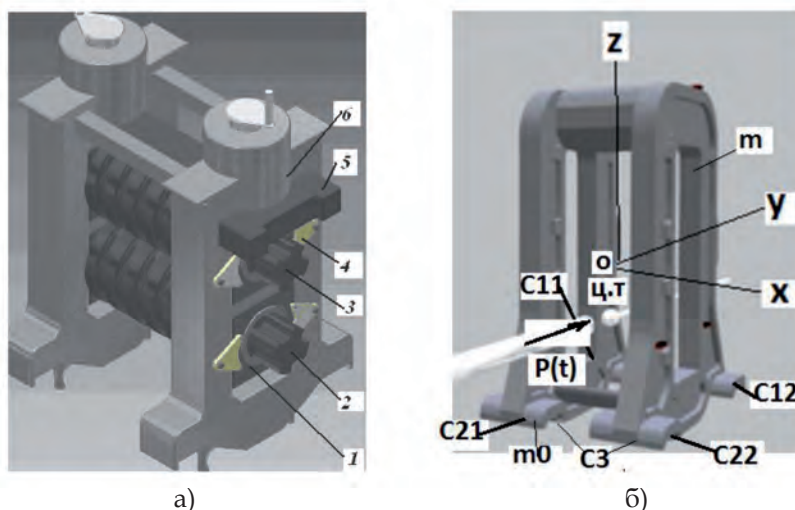


Рис. 2. Упрощенная трехмерная модель а) [5] и расчетная схема рабочей клетки б) автоматического стана ТПА

ной задачи динамики механической системы. Считаем, что лапы станины и тумбы (шины), удерживающие рабочую клетку на опорных механизмах (анкерные болты), деформируемы. Для упрощенной механической системы с 2 степенями свободы соответственно кинетическую и потенциальную энергии системы находим в виде:

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{z}_1^2 + i^2\dot{\phi}_6^2); \quad (1)$$

$$\Pi = 2\frac{1}{2}c_1(z_1 + a\phi_6)^2 + 2\frac{1}{2}c_2(z_1 - b\phi_6)^2, \quad (2)$$

где m – масса рабочей клетки и опорных узлов автоматического стана;

c_1 и c_2 – приведенные жесткости соответственно передней и задней опорных узлов и механизма удержания рабочей клетки на стане;

i – радиус инерции рабочей клетки относительно оси x ;

z_1 – динамические перемещения центра масс рабочей клетки автоматического стана в вертикальном направлении (по оси z);

ϕ_6 – угловые перемещения станины рабочей клетки стана вокруг оси x .

Из [5] известно, что технологическая нагрузка $P(t) = P_0 + P_1 \sin(\omega t)$, действующая со стороны очага деформации на валки рабочей клетки, носит гармонический характер. 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 . Используя уравнения Лагранжа, составляем дифференциальные уравнения движения рабочей клетки автоматического стана ТПА. Следовательно, в первом приближении для принятой упрощенной динамической модели механической системы автоматического стана ТПА с 2 степенями свободы в постановке задачи Коши запишем:

$$m \frac{d^2 z_1(t)}{dt^2} + 2c_1(z_1(t) + a\phi_6(t)) + 2c_2(z_1(t) - b\phi_6(t)) = 0;$$

$$z_1(0) = 0,01; \quad \frac{dz_1(0)}{dt} = 0;$$

$$mi^2 \frac{d^2 \phi_6(t)}{dt^2} + 2c_1 a(z_1(t) + a\phi_6(t)) - \quad (3)$$

$$-2c_2 b(z_1(t) - b\phi_6(t)) = (P_0 + P_1 \sin(\omega t))d;$$

$$\phi_6(0) = 0,015; \quad \frac{d\phi_6(0)}{dt} = 0,$$

где a и b – параметры расположения центра масс рабочей клетки в выбранной системе отчета;

d – расстояние от оси x до точки приложения технологической нагрузки $P(t)$.

Далее решение системы дифференциальных уравнений (3) реализуем численно, методом Рунге – Кутты в среде программного продукта Matcad, для наиболее распространенной первой формы колебаний механической системы «рабочая клетка – механизм удержания клетки». Динамические особенности функционирования (смещений) рабочей клетки автоматического стана ТПА-350 (исходные данные для получения решений поставленной задачи взяты из [1; 2; 5]) представлены на рис. 3.

Анализ результатов расчета (рис. 3) и экспериментальных исследований (рис. 1) показывает, что дифференциальные уравнения (3) с достаточно высокой степенью точности описывают вынужденные колебания рабочей клетки на опорных узлах. Приведенные значения амплитудно-частотных характеристик при колебаниях рабочей клетки за время реализации всего технологического процесса прокатки гильзы на автоматическом стане ТПА-350 превышают допустимый уровень виброактивности механической системы.

Известно, что в ходе реализации технологического процесса высокая динамичность системы

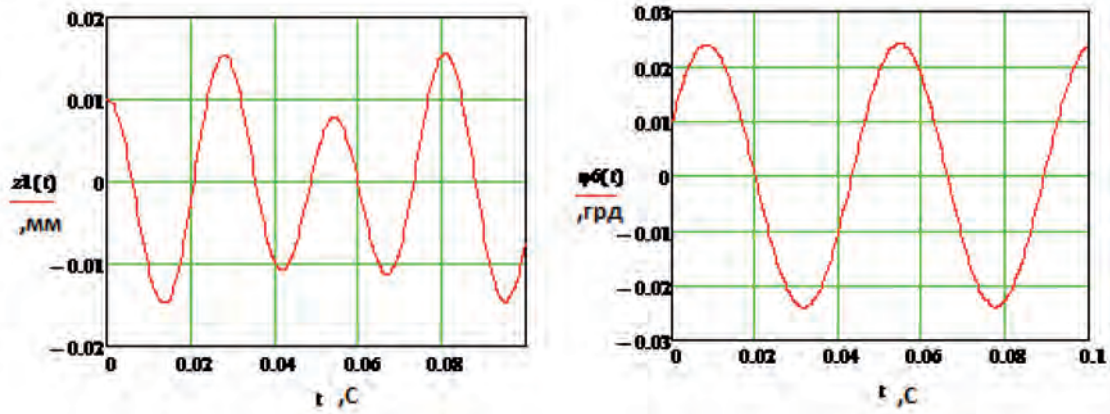


Рис. 3. Динамика рабочей клетки автоматического стана ТПА-350 (прокат черновой трубы диаметром 273×6,3 мм, материал – сталь 20):

$z_1(t)$ – линейные перемещения центра масс рабочей клетки;
 $\phi_6(t)$ – угловые перемещения рабочей клетки стана в плоскости z – y вокруг оси x

«рабочая клетка – механизм удержания клетки» влечет за собой образование повышенной разностенности гильзы [6]. Однако данных результатов недостаточно для установления реального механизма образования повышенной разностенности гильз, прокатываемых на автоматическом стане ТПА-350.

Для получения объективной картины изменения величины разностенности прокатываемых труб после восстановления (ремонта) клетки автоматического стана ТПА-350 была произведена оценка данных толщинометрии труб, прокатанных в разное время, до и после ремонта механизма удержания рабочей клетки соответственно. Данные о толщине стенки получены при УЗК-контроле труб размером 273×6,3 мм на установке ROWA. На рис. 4 приведена картина изменения разностенности (толщинометрия проведена методом УЗК) по длине партии черновых труб (гильз).

Пренебрегая влиянием изменения температуры вдоль прокатываемой трубы («температурного клина») при прокатке гильзы на автоматическом стане среди факторов, формирующих качественные показатели обрабатываемого изделия (в част-

ности разностенности), можем выделить влияние колебательных движений рабочей клетки. Период колебаний и соизмеримая амплитуда колебаний коррелируется с колебаниями механической системы «рабочая клетка – механизм удержания клетки» автоматического стана ТПА-350. Так, при прокатке черновой трубы диаметром 273×6,3 мм (материал – сталь 20) продольная составляющая разностенности увеличилась еще на 2,8 мм. Полученные результаты вполне совпадают с результатами экспериментальных [6] и проведенных теоретических исследований. Так, до ремонта механизма удержания станины рабочей клетки на опорных плоскостях стана при прокатке труб размером 273×6,3 мм выход годного в основном определяется наличием повышенной разностенности прокатываемых труб и составлял около 39 %. При этом допуск по нормативной документации на толщину стенки составляет 1,38 мм. Трубы, прокатанные ранее (до ремонта), имеют разностенность на уровне до 3,24 мм. По этой причине прокатчики вынуждены катать трубы на «+». После ремонта механизма удержания рабочей клетки стана имеем некоторое улучшение

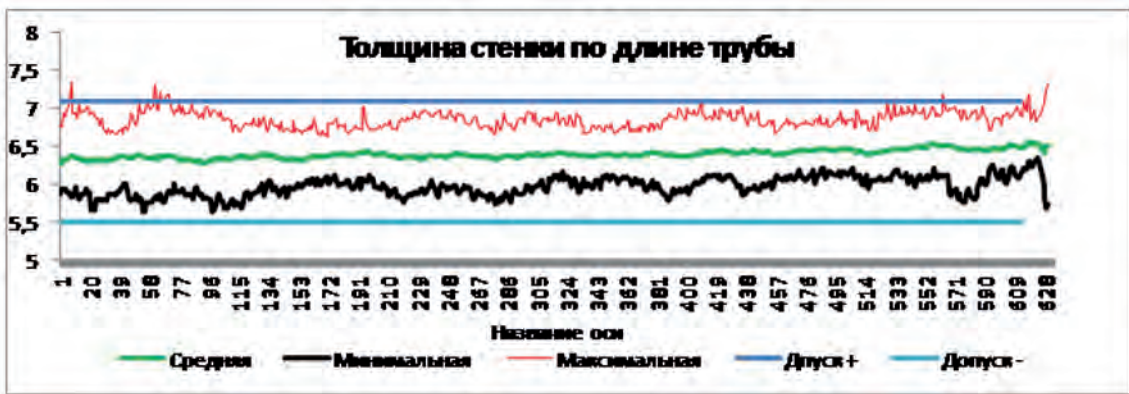


Рис. 4. Стенкометрия труб размером 273×6,3 мм до ремонта рабочей клетки автоматического стана ТПА-350

общей картины рзностенности. Максимальное значение разностенности находится на уровне 2,76 мм, а выход годного при этом на уровне 48 %. Эти результаты (снижение разностенности труб до 7 %) диктуют необходимость комплексной модернизации механизма удержания рабочей клетки (восстановление опорных узлов станины и посадочных мест крепления станины с тумбами), разработки предварительно-напряженной конструкции крепления рабочей клетки к опорным плоскостям тумб, изменение конструкции узла крепления станины рабочей клетки с задним столом и массивным основанием механизма удержания оправки стана.

Выводы. Уточнена расчетная схема взаимосвязанных механических подсистем рабочей клетки автоматического стана ТПА и разработана математическая модель механической системы «рабочая клетка – механизм удержания клетки». Учтены циклический характер технологической нагрузки и параметры упругости базовых элементов механизма удержания рабочей клетки автоматического стана ТПА на опорных плоскостях.

Приведены результаты численного решения дифференциальных уравнений колебаний модели рабочей клетки автоматического стана ТПА-350, что позволило в комплексе оценить динамические характеристики как рабочей клетки автоматического стана, так и упругих подсистем клетки.

Максимальная амплитуда вынужденных колебаний реперной точки рабочей клетки автоматического стана ТПА-350 в соответствующих фазах достигает 0,017 м, а максимальное динамическое угловое перемещение составляет 0,022 рад. Полученные данные намного превышает допустимые величины настоячных параметров автоматического стана ТПА-350, что обуславливает повышение разностенности прокатываемых гильз.

Библиографический список / References

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

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

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

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

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

Rakhmanov S. R., Lyubin N. V. *Dinamika rabochey kleti avtomaticheskogo stana truboprokatnogo agregata. Vibratsiya v tekhnike i tekhnologiyakh*, 2016, no. 1 (81), pp. 105-112.

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

Kozhevnikov S. N. *Dinamika nestatsionarnykh protsessov v mashinakh*. Kiev, Naukova dumka, 1986, 288 p.

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

Ivanchenko F. K. *Dinamika i prochnost' metallurgicheskogo oborudovaniya*. Moscow, Metallurgiya, 1970, 488 p.

6. Технический отчет мониторинга пространственного положения клетки в процессе эксплуатации с регистрацией динамических смещений и углов отклонения клетки автоматического стана ТПА 350. – Никополь, 2018. – 287 с.

Tekhnicheskyy otchet monitoringa prostranstvennogo polozheniya kleti v protsesse ekspluatatsii s registratsiey dinamicheskikh smeshcheniy i uglov otkloneniya kleti avtomatstana TPA 350. Nikopol, 2018, 287 p.

7. Вышинский В. Т. Особенности формирования и исследования динамической модели рабочей клетки чистовой группы НТЛС – 1680 / В. Т. Вышинский, В. В. Поворотный // Надійність металургійного обладнання RME-2013. Зб. наук. праць за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції. – Дніпропетровськ: ІМА-прес, 2013. – С. 148–153.

Vyshinskiy V. T., Povorotniy V. V. *Osobennosti formirovaniya i issledovaniya dinamicheskoy modeli rabochey kleti chistovoy gruppy NTLS-1680*. Nadiynist' metalurgiyynogo obladnannya RME-2013. Zbirnik naukovikh prats' za materialami Mizhnarodnoi nauково-tekhnichnoi konferentsii. – Dnipropetrovs'k, IMA-pres, 2013, pp. 148-153.

8. Вышинский В. Т. Динамическая модель рабочей клетки чистовой группы НТЛС – 1680 // В. Т. Вышинский, В. В. Поворотный, А. В. Мокиевец // Пластическая деформация металлов. Т. 2. – Днепропетровск: Пороги 2014. – С. 61–66.

Vyshinskiy V. T., Povorotniy V. V., Mokievets A. V. *Dinamicheskaya model' rabochey kleti chistovoy gruppy NTLS-1680*. Plasticheskaya deformatsiya metallov. Vol. 2. Dnepropetrovsk, Porogi, 2014, pp. 61-66.

Мета. Визначення реального спектра і рівня динамічних навантажень дозволило б розробити рекомендації щодо вдосконалення автоматичного стану ТПА-350 з метою розширення його технологічних можливостей, підвищення надійності функціонування і довговічності.

Методика. Робота виконана на основі розвитку математичної моделі динамічних процесів у механічній системі автоматичного стану ТПА, де зроблено спробу виявлення особливостей функціонування робочої кліті з прокочуваною гільзою в постановці завдань динаміки. Очевидно, запропонований підхід більш коректний і зручний при вивченні складних динамічних явищ в елементах автоматичного стану ТПА.

Результати. Наведено результати дослідження динаміки робочої кліті автоматичного стану трубопрокатного агрегату (ТПА). Встановлено основні параметри функціонування робочої кліті, наприклад автоматичного стану ТПА-350, і розроблено математичну модель базової задачі динаміки механічної системи. Складено диференціальні рівняння руху для обраної моделі робочої кліті і пружних елементів механізму утримання станини на опорних вузлах автоматичного стану ТПА. Отримано відповідні картини коливань робочої кліті. Виявлено деякі особливості функціонування робочої кліті на прикладі автоматичного стану ТПА-350. Встановлено параметри динамічності робочої кліті стану, що впливають на величину різностінності прокочуваних гільз.

Наукова новизна. Встановлено взаємозв'язок динаміки робочої кліті з умовами функціонування автоматичного стану ТПА на основі спрощення математичної моделі динамічних процесів. Складено математичну модель механічної системи робочої кліті автоматичного стану ТПА. Механічна система робочої кліті стану в найбільш загальному вигляді представлена за допомогою диференціальних рівнянь, що описують поведінку обраної розрахункової схеми системи з двома ступенями свободи.

Практична значущість Запропоновано схему модернізації робочої кліті і механізму утримання робочої кліті автоматичного стану ТПА-350.

Ключові слова: дослідження, автоматичний стан ТПА-350, модернізація робочої кліті, математична модель, розширення технологічних можливостей, довговічність.

Purpose. Determining the real spectrum and the level of dynamic loads would make it possible to develop recommendations for improving the TPA-350 automatic mill, with the aim of expanding its technological capabilities, improving the reliability of operation and durability.

Methodology. This work was carried out on the basis of the development of a mathematical model of dynamic

processes in the mechanical system of an automatic TPA mill, where an attempt was made to identify the features of the functioning of a working stand with a rolled sleeve in the formulation of dynamic problems. Obviously, the proposed approach is more correct and convenient when studying complex dynamic phenomena in the elements of an automatic TPA mill.

Findings. The results of the study of the dynamics of the working stand of the automatic mill of the pipe-rolling unit (TPA) are given. The basic parameters of the functioning of the working stand, such as the automatic mill TPA 350, are established, and a mathematical model of the basic problem of the dynamics of a mechanical system is developed. The differential equations of motion for the selected model of the working stand and the elastic elements of the bed retention mechanism on the support nodes of the automatic TPA mill have been compiled. The corresponding patterns of oscillations of the working stand were obtained. Some features of the functioning of the working stand are identified by the example of an automatic mill TPA 350. The dynamic parameters of the working stand of the mill, affecting the difference in the thickness of the rolled sleeves, are established.

Originality. The interrelation of the working stand dynamics with the operating conditions of an automatic TPA mill on the basis of a simplified mathematical model of dynamic processes is established. A mathematical model of the mechanical system of a working stand of an automatic TPA mill has been compiled. In the most general form, the mechanical system of a working stand of a mill is described using differential equations describing the behavior of the selected design scheme of a system with two degrees of freedom.

Practical value. A scheme has been proposed for modernizing the working stand and the mechanism for holding the working stand of the TPA-350 automatic mill.

Key words: research, automatic machine TPA-350, modernization of the working stand, mathematical model, expansion of technological capabilities, durability.

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

Поступила 20.09.2018

