УДК 621.774.28

С.Р. Рахманов², В.В. Поворотний¹¹ Национальная металлургическая академия Украины² НПП «Восток Плюс»

ДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТОВ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО СТАНА ТПА 350

Работа посвящена исследованию динамики элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 с использованием фундаментальных закономерностей и аналитических методов механики, динамики механических систем с упругими звеньями, теории колебаний, теории машин и механизмов, метода конечных элементов. Разработана математическая модель динамической системы «гильза (труба) – рабочая клеть» и выполнены исследования амплитудно-частотных характеристик вертикальных колебаний рабочих валков с учетом влияния изменения во времени технологической нагрузки прокатываемой гильзы, масс механической системы и жесткости базовых элементов рабочей клетки стана. Установлено, что максимальная амплитуда вынужденных колебаний элементов рабочей клетки стана в межвалковом пространстве составляет более 2 мм, что превышает допустимые величины настроечных параметров очага деформации стана. Предложена схема комплексной модернизации установки валков рабочей клетки стана, обеспечивающая повышение жесткости установки валков, стабилизацию амплитуды вынужденных колебаний элементов клетки, снижение разностенности прокатываемых гильз и повышение качества прокатываемых труб.

DOI: 10.34185/0543-5749.2020-1-57-70

Процессы интенсификации производства бесшовных труб на станах технологической линии трубопрокатных агрегатов (ТПА) влекут за собой ужесточение режимов функционирования, как основного, так и вспомогательного оборудования. Исходя из циклограммы работы ТПА автоматический стан, в силу сложившихся технологических особенностей, при реализации требуемых процессов производства бесшовных труб во всей технологической линии является наиболее узким местом [1, 2]. Отметим, при оптимизации технологических процессов прокатки гильзы, путем комплексного математического моделирования динамики элементов рабочей клетки, соответствующие периоды переходных процессов можно установить рациональные режимы прокатки гильз с учетом величины допустимого уровня виброактивности механической системы и прогнозируемых показателей качества выпускаемых труб.

Расчеты показывают, что, например, при прокатке черновых труб диаметром 325×12,5 мм, материал – сталь 20, устойчивый процесс на автоматическом стане реализуем при скорости прокатки гильзы не более 3,6 м/с, что близко к экспериментальными данными ТПА 350.

Известно, что переходные процессы на автоматическом стане сопровождаются значительными пиковыми динамическими нагрузками. Они, в силу определенных причин, возникают как в период захвата гильзы (трубы) рабочими валками, так и в период установившихся процессов прокатки гильзы на автоматическом стане ТПА 350.

Для формирования заданной геометрии гильз, прокатываемых на автоматическом стане ТПА, практическое значение имеет стабильная динамика базового оборудования рабочей клетки. Среди сил, действующих на узлы и элементы автоматического стана ТПА, наименее изученными

являются значительные по величине кратковременные динамические нагрузки. При этом, динамические процессы преимущественно определены нестационарным взаимодействием гильзы валками, оправкой и другими узлами стана в период принудительного захвата гильзы.

Опыт эксплуатации автоматических станов ряда отечественных ТПА показывает, что при принудительной подаче гильзы в калибры стана (предусмотрена ускоренная подача гильзы в очаг деформации) происходит определенное улучшение захвата гильзы рабочими валками. Захват гильзы валками автоматического стана, помимо всего прочего, существенно осложнен тем, что гильза, взаимодействуя с рабочими валками, одновременно контактирует с оправкой в калибре. Эти особые условия, наряду со всеми другими факторами, формируют начальные условия технологического процесса и влияют на сложное напряженно-деформированное состояние элементов рабочей клетки и параметров прокатываемой гильзы в очаге деформации, что обуславливает в целом нестационарную динамику автоматического стана [3, 4].

Возросшие требования, предъявляемые к качеству и точности геометрических размеров труб, ставят новые задачи по исследованию различных факторов, влияющих на отклонения размеров готовых труб от заданных допусков. Определенные отклонения геометрических размеров гильз на автоматическом стане ТПА могут быть вызваны повышенным износом технологических инструментов и в результате периодических колебаний элементов рабочей клетки.

Исследованию сложных динамических процессов взаимодействия прокатываемой гильзы с валками станов при продольной прокатке посвящен ряд работ [3-6]. Процесс нестационарного взаимодействия прокатываемого металла с валками стана рассмотрен в работе [3], анализ которой в дальнейшем позволил получить выражение для соответствующей формы динамических нагрузок в периоды переходных процессов.

Интенсивность нестационарного взаимосвязанного воздействия со стороны очага деформации на рабочую клетку значительно усложняют корректное описание динамических процессов на автоматическом стане ТПА. При этом технологические инструменты воспринимают значительные статические и, изменяющиеся во времени, нестационарные динамические нагрузки, оправка колеблется в очаге деформации, центрирующий пояс оправки уходит от пережима калибра рабочих валков, что в свою очередь приводит к образованию повышенной разностенности гильзы (трубы) автоматическом стане ТПА.

Для сопоставления теоретических результатов и получения определенных представлений о характере формирования динамических нагрузок, воспользуемся некоторыми результатами экспериментальных исследований автоматического стана ТПА 350. Энергосиловые параметры автоматического стана ТПА 350 заимствованы из [5].

Осциллограмма энергосиловых параметров (силы прокатки) автоматического стана ТПА 350 (прокатка трубы $325 \times 12,5$ в два прохода в правом калибре) приведена на рис. 1.

Рис. 1. Осциллограмма энергосиловых параметров (силы прокатки) автоматического стана ТПА 350 (прокатка трубы $325 \times 12,5$ в два прохода в правом калибре): 1 — правая опора; 2 — левая опора

Многочисленные экспериментальные исследования энергосиловых параметров очага деформации и расшифровка осциллограмм автоматического стана ТПА 350 показывают, что составляющие усилия прокатки, действующая на полушанины рабочей клетки носят периодический характер и преимущественно соответствуют гармоническому закону:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= P_{01} + P_1 \sin(\omega t); \\ P_2(t) &= P_{02} + P_2 \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (1)$$

где P_{01} и P_{02} – статические составляющие усилия прокатки гильзы; P_1 и P_2 – соответственно динамические составляющие усилия прокатки гильзы; ω – частота изменения усилия прокатки гильзы.

Пути интенсификации технологического процесса и вопросы повышения качества прокатываемых труб всемерно диктуют определенные условия для совершенствования конструкций всех базовых механизмов рабочей клетки автоматического стана ТПА.

Настройка требуемых параметров очага деформации проводится комплексно: клиновым механизмом, установкой рабочих валков, положением (выдвижением) оправки по пережиму валков упорно – регулировочным механизмом и другими механизмами автоматического стана.

Неконтролируемое изменение диаметра и стенки прокатываемой гильзы происходит вследствие дополнительного изменения упругой деформации нагруженной части элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА, что вызвано следствием изменения сил давления прокатываемой гильзы на технологические инструменты и нестационарным нагружением упругих подсистем самой рабочей клетки.

Исследованиями энергосиловых параметров автоматического стана ТПА 350 установлено, что формирование силы прокатки трубы во многом определяется колебаниями температуры металла, неоднородным химическим составом и структурой металла, непостоянством размеров гильзы после прошивного стана, воздействием механизмов выходной стороны стана и др.

Отметим, что периодическая разностенность по длине трубы появляется в результате взаимосвязанного колебания технологических инструментов (валков и оправки) и элементов рабочей

клетки, что приводит к искажению заданных параметров очага деформации.

Следовательно, ряд причин, которые вызывают изменение силы давления металла на рабочие валки, будут оказывать одновременно влияние на изменение деформации рабочей клетки стана и параметры, определяющие точность прокатываемых гильз.

Характерно, что минимальная продолжительность при одновременном захвате гильзы обеими рабочими валками клетки стана, скорости прокатки 3,4 м/с и длине дуги захвата 52 мм составляет 0,013 сек. Тогда значения функции нарастания нагрузки соответствуют периодам собственных колебаний механической системы рабочей клетки автоматического стана ТПА 350. Отметим, что зависимость коэффициента динамичности механических систем стана от функции нарастания технологической нагрузки соответствуют работе [4] откуда следует, что деформации частей рабочей клетки автоматического стана ТПА 350, в период нарастания технологической нагрузки (захвата гильзы) в периоды беззаворного функционирования, максимально могут быть равны удвоенному значению статической деформации системы [5].

Из вышеизложенного следует, что при деформациях соответствующих частей рабочей клетки автоматического стана расстояние между рабочими валками изменяется по гармоническому закону, в результате искажается форма калибра и изменяется величина обжатия гильзы, как по диаметру, так и по стенке. Это в свою очередь приводит к формированию энергосиловых параметров очага деформации (силы и момента прокатки) и изменению упругой деформации рабочей (пружинной) клетки в целом.

Для формирования научно-обоснованных предложений по совершенствованию конструкции рабочей клетки и технологии производства труб на автоматическом стане ТПА необходимо более глубоко изучить влияние различных параметров и особенностей технологического процесса прокатки гильз на поведение всей механической системы и качество готовой продукции. Очевидно, предложенный подход более корректен и необходим при изучении сложных динамических явлений в элементах рабочей клетки автоматического стана.

Решение поставленной задачи обуславливает некоторое уточнение расчетной схемы и даль-

нейшее развитие математической модели исследуемой механической системы, наиболее точно отражающей реальные процессы, происходящие в исходной механической системе автоматического стана. В работе в качестве объекта исследования во взаимосвязи комплексно рассмотрены развитые четырехмассовая динамическая и математическая модели «гильза – рабочая клеть» автоматического стана ТПА. Полученные результаты отличаются от известных [1-4] комплексным подходом к исследованию нестационарных динами-

ческих процессов с последующим учетом переменной во времени технологической нагрузки прокатываемой гильзы действующей со стороны очага деформации автоматического стана

Составление 3D модели рабочей клетки автоматического стана ТПА и исследование деформированного состояния ее элементов выполнены с применением программного продукта Solid Works в соответствующем масштабе, согласно существующей и на базе разработанной проектно-технической документации (рис. 2).

Рис. 2. Трехмерная модель (а) и обобщенная колебательная система; (б) рабочей существующей клетки автоматического стана ТПА

При этом на элементы станин были наложены соответственные ограничения, максимально близкие к реальным условиям их эксплуатации и приложена реальная технологическая нагрузка. Исследованиями амплитудно-частотной характеристики динамических процессов, согласно [3, 4], установлено, что четырехмассовая динамическая модель рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 наиболее адекватно отображает рассматриваемую механическую систему. Из многочисленных экспериментальных исследований энергосиловых параметров автоматического стана ТПА 350 видно, что жесткости подшипниковых узлов установки валков определенно влияют на динамику рабочей клетки. В связи с этим перехо-

дим к определению жесткости подшипника качения модернизированной установки валков автоматического стана ТПА $c_3(t)$ согласно рис. 3,а. Деформированное состояние элементов подшипника установки валков автоматического стана ТПА определены с применением программного продукта Solid Works. Зависимость жесткости подшипника качения установки валков $c_3(t)$, что представлена на рис. 3,б, изменяется во времени по гармоническому закону можно представить в аналитическом виде:

$$c_3(t) = c_{ном} + \frac{A}{2} \sin(\omega_0 t), \quad (2)$$

где $c_{ном}$ – номинальная жесткость подшипника

($c_{ном} = 0,5(c_{max} + c_{min})$) (рис. 3,б); A – параметр жесткости (размах жесткости) подшипника ($A = c_{max} - c_{min}$); ω_0 – частота изменения жесткости подшипника (равна частоте вращения рабочих валков).

Значения жесткостей четырехмассовой динамической модели рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 определены с применением программного продукта Solid Works и представлены в табл. 1.

Рис. 3. Размещение четырех роликового цилиндрического подшипника качения установки валков в рабочей клетке автоматического стана ТПА 350 (а) и гармонический закон изменения жесткости подшипника (б): 1 – станина стана; 2 – подушка; 3 – валок; 4 – подшипник; 5 – клин; 6 – нажимной винт

Таблица 1. Значения жесткостей четырехмассовой динамической модели рабочей клетки автоматического стана ТПА 350

Наименование элементов рабочей клетки стана	Значения жесткостей, Н/м	Обозначение
Жесткость полустанины	$10,2 \cdot 10^9$	C_1
Жесткость верхнего нажимного винта	$15,6 \cdot 10^9$	C_2
Изгибная жесткость рабочего валка вместе с подшипниками и подушками:	–	C_3
Прокат гильзы в калибре №1	$64,1 \cdot 10^9$	C_{31}
Прокат гильзы в калибре №2	$45,4 \cdot 10^9$	C_{32}
Прокат гильзы в калибре №3	$47,6 \cdot 10^9$	C_{33}
Прокат гильзы в калибре №4	$62,5 \cdot 10^9$	C_{34}
Жесткость нижнего нажимного винта	$28,5 \cdot 10^9$	C_4
Жесткость нижней части станины с траверсой	$15,2 \cdot 10^9$	C_5
Жесткость нижней части станины без траверсы	$14,9 \cdot 10^9$	C'_5

Отметим, что для определения изгибной жесткости расчёт ведется от крайнего левого калибра. Параметры приведенных жесткостей и масс узлов рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 определены из соответствующих картин деформаций базовой компоновки при нагружении механической системы силой прокатки гильзы.

Модели исходной механической системы автоматического стана ТПА 350 представим в виде математических моделей взаимосвязанных

подсистем: четырех дифференциальных уравнений, описывающих поведение соответствующих модели элементов правой полустанины; дифференциальных уравнений, описывающих поведение элементов левой полустанины рабочей клетки.

Имитация деформированного состояния установки валков автоматического стана ТПА 350 с четырьмя калибрами на подшипниках скольжения и тремя калибрами на подшипниках качения при прокате трубы $325 \times 12,5$ из стали 20 представлена на рис. 4.

Рис. 4. Имитация деформированного состояния установки валков автоматического стана ТПА 350 с четырьмя (а) и тремя калибрами (б) при прокате трубы $325 \times 12,5$ из стали 20

Исследование развитой четырехмассовой динамической модели «трубная заготовка – рабочая клет» позволит проанализировать динамическое состояние элементов рабочей клетки системы в течение всего процесса прокатки гильзы и, на основании вышеизложенного, разработать схему модернизации рабочей клетки стана ТПА 350.

Характерно, что в результате захвата гильзы валками усилие прокатки кратковременно возрастает с большим размахом и в дальнейшем уменьшается до номинальных величин и изменяется с определенной амплитудой. Анализ литературных источников по определению давления металла на валки автоматического стана и исследования технологических нагрузок показали, что данные параметры для процесса прокатки труб зависят в основном от диаметров

гильзы и степени ее деформации [3-6]. При варьировании параметрами гильзы (диаметром, толщиной стенки и скоростью подачи гильзы в очаг деформации) можно построить зависимость изменения усилия от времени переходного процесса прокатки гильзы. Для исследования взаимодействия гильзы с валками рабочей клетки, оправкой и стержневой системой автоматического стана ТПА переходим к составлению математических разветвленных моделей рассматриваемых систем четырехмассовой динамической модели.

Далее переходим к составлению математической модели каждой из подсистем обобщенной четырехмассовой динамической модели элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 на базе разветвленной схемы стана (рис. 5).

Рис. 5. Разветвленная четырехмассовая динамическая модель колебательных систем нижней и верхней ветвей рабочей клетки автоматического стана ТПА

Поведение выбранной динамической четырехмассовой модели в постановке базовой задачи Коши с учетом параметров диссипации энергии

в механической системе и переменности во времени жесткости подшипника установки валков ТПА $c_3(t)$ описывается в виде:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} = -c_1 y_1(t) + c_2 (y_2(t) - y_1(t)) - \mu_1 \frac{dy_1(t)}{dt}; \\ m_2 \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} = -c_2 (y_2(t) - y_1(t)) + c_3(t) (y_3(t) - y_2(t)) - \mu_2 \frac{dy_2(t)}{dt} + P_{01} + P_1 \sin(\omega t); \\ m_3 \frac{d^2 y_3(t)}{dt^2} = -c_3(t) (y_3(t) - y_2(t)) + c_4 (y_4(t) - y_3(t)) - \mu_3 \frac{dy_3(t)}{dt} - P_{01} - P_2 \sin(\omega t); \\ m_4 \frac{d^2 y_4(t)}{dt^2} = -c_4 (y_4(t) - y_3(t)) + c_5 y_4(t) - \mu_4 \frac{dy_4(t)}{dt}, \end{cases} \quad (3)$$

где $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$ и $y_4(t)$ – соответствующие динамические перемещения элементов рабочей клетки; μ_1 , μ_2 , μ_3 , и μ_4 – коэффициенты сопротивления в элементах рабочей клетки автоматического стана.

Переходим к анализу и синтезу динамических процессов в периоды прокатки гильзы рабочими валками на примере расчета динамики рабочей клетки автоматического стана ТПА 350. Решение поставленной задачи реализуем численным

решением системы дифференциальных уравнений (3) при следующих исходных данных соответствующих прокатке трубы $325 \times 12,5$ в два прохода в правом калибре, материал – сталь 20 (рис. 1).

Динамика элементов компоновки рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 (прокатка трубы $325 \times 12,5$ в два прохода в правом калибре, материал – сталь 20 для левой и правой ветвей рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 представлены на рис. 6.

Рис. 6. Динамика элементов компоновки рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 (труба диаметром 325×12,5 мм, материал – сталь 20):

$y13(t)$ – перемещения нижнего валка с подушками и подшипниками скольжения;
 $y12(t)$ – перемещения верхнего валка с подушками, подшипниками скольжения, нажимными винтами и уравнивающим устройством; $y23(t)$ – трехручьевого перемещения нижнего валка с подушками и подшипниками качения; $y22(t)$ – перемещения трехручьевого верхнего валка с подушками, подшипниками качения, нажимными винтами и уравнивающим устройством

Расчеты показывают, что максимальная амплитуда вынужденных колебаний элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 в межвалковом пространстве для левой полустанины достигает 2,64 мм (рис. 5). Это намного превышает допустимые величины настроечных параметров очага деформации автоматического стана ТПА 350. Следовательно результаты амплитудно-частотных характеристик ветвей рабочей клетки стана с учетом изменения жесткости опорных узлов установки валков во времени и технологической нагрузки прокатываемой гильзы и параметры межвалкового пространства позволяют в комплексе оценить динамическое состояние рабочей клетки автоматического стана ТПА 350.

Опыт эксплуатации автоматических станов ТПА 140, ТПА 250 и ТПА 400 [2, 5] показывает, что наиболее эффективные результаты можно получить при повышении жесткости подшипниковых узлов установки валков.

Конструкция модернизированной рабочей клетки с новой установкой валков для условий эксплуатации автоматического стана ТПА 350

приведена на рис. 7. При этом, за счет создания определенных условий эксплуатации рабочей клетки в периоды переходных процессов (захвата) прокатки гильзы достигается формирование устойчивых процессов и стабилизация динамики всей механической системы.

Исследования [5, 6] показывают, между колебаниями толщины стенки гильзы и колебаниями элементов рабочей клетки сложной динамической системы автоматического стана ТПА в вертикальной плоскости существует вполне определенная взаимосвязь.

Разработанная математическая модель динамически рабочей клетки показывает хорошую сходимость с экспериментальными исследованиями автоматического стана ТПА 350[5], что подтверждает адекватность и достоверность полученных результатов. Анализ динамических процессов рабочей клетки автоматического стана (колебания рабочих валков) в конечном итоге следует принимать во внимание при прогнозировании показателей геометрии готовых труб и реализации требуемых технологических процессов.

Рис. 7. Трехмерная модель и модернизированная рабочая клеть автоматического стана ТПА 350 (а) и новая установка валков рабочей клетки с тремя калибрами на базе четырехроlikовых цилиндрических подшипников качения (б): 1 – станина; 2 – валок; 3 – клиновой механизм; 4 – подушка; 5 – четырехроlikовых цилиндрических подшипник; 6 – двухрядный радиально-упорный подшипник; 7 – шарикоподшипник; 8 – зубчатый бандаж

В связи с этим предложена схема комплексной модернизации рабочей клетки автоматического стана ТПА 350. Предполагается замена рабочих валков с текстолитовыми подшипниками на валковые опоры на крупногабаритных подшипниках качения с цилиндрическими роликами, что позволит значительно повысить жесткость этих узлов. Применение гидрораспора между подушками и станиной рабочей клетки, и установка механизма противоизгиба рабочих валков во взаимосвязи обеспечивают существенное повышение жесткости всех элементов рабочей клетки. Наряду со этим, замена наделок на стойках станин с

предварительной их расточкой позволит установить восемь малогабаритных гидроцилиндров для выборки зазоров в проемах станины в процессе прокатки гильзы в системе «подушка валка- стойка станины».

Эффект повышения жесткости, связанный с такой заменой, иллюстрируется разницей между модулями упругости текстолита, равного $0,06 - 0,1 \times 10^4 \text{ кг/мм}^2$ и модулем упругости стали $1,9 - 2,3 \times 10^4 \text{ кг/мм}^2$. Валковые опоры на подшипниках качения с приводной стороны клетки предлагается выполнить «плавающими», а с не приводной – фиксируемыми. Дополнительно с не

приводной стороны необходима установка в валковой опоре самостоятельного упорного узла на базе упорного подшипника с коническими роликами двустороннего действия, воспринимающего осевые нагрузки с коэффициентом запаса более 10.

Данные мероприятия позволяют конструктивно реализовать увеличение жесткости и долговечности рабочих валков без изменения диаметров шеек и бочек валков.

Взамен треновых хвостовиков валков предлагается использовать зубчатые бандажы, жестко насаженные на хвостовики валков. Это позволяет устранить вышеописанные недостатки, а также производить точное совмещение нулевых точек калибров с точностью шага зубчатых бандажей. При этом наличие опорного узла позволяет реализовать точную регулировку осевого положения нижнего и верхнего валков.

Рациональная грузоподъемность и долговечность подшипника качения обеспечивается распределением приложенной к нему нагрузки и условиями одновременного нагружения всех рядов роликов. Такое распределение нагрузки является обязательным условием при использовании подшипников качения в автоматическом стане ТПА 350. Данное предложение апробировано и успешно эксплуатируется на автоматическом стане ТПА 400 ОАО «Руставский металлургический завод» (г. Рустави, Грузия) и ТПА 250 ОАО «Азербору» (г. Сумгаит, Азербайджан).

Клеть оборудуется комбинированным нажимным устройством, в котором с помощью винтовой пары с червячной передачи устанавливается с точностью $\pm 0,05$ мм, положение силового цилиндра. В основании штока силового гидроцилиндра размещена мощная пята со сферическим подпятником.

Для осуществления высокоточной операции монтажа – демонтажа валковых опор поставляется специальный механизированный стенд, устанавливаемый на отдельном участке ремонтной площадки цеха. При этом используется гораздо меньше подушек валков с установленными в них подшипниками, т.к. внутренние кольца подшипников остаются на шейках валков. Их количество значительно превышает количество подшипников.

Предлагается замена пневмоцилиндра клинового механизма установки рабочих валков на си-

ловой гидроцилиндр диаметром 120 мм с системой пропорциональной гидравлики возможностями точной регулировки положения клина нажимного устройства. Давление рабочей среды (эмульсии) в гидроцилиндре равно 10 – 12 МПа.

Центральный гидроцилиндр перемещения клина обеспечивает постоянное прижатие верхней подушки верхнего валка к подпятникам нажимных винтов, что обеспечивает плотный контакт деталей подушек в периоды захвата гильзы валками.

Далее переходим к аналитическому определению эффективности реконструкции рабочей клетки автоматического стана ТПА 350. Таким образом, на базе существующей клетки автоматического стана ТПА 350 создается усовершенствованная клеть с расширенными возможностями, имеющая высокую жесткость в двух направлениях (плоскостях), включая компенсацию прогиба валка. Коэффициент жесткости такой рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 составляет $3151,5 \times 10^6$ Н/м.

Методом конечных элементов был выполнен расчет деформаций для выбранной трехмерной модели основных элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА 350. Максимальное значение усилия прокатки с учетом коэффициента динамичности механической системы ($K_d = 3,75$) для автоматического стана ТПА 350 составляет 5200 кН (значение взято из отчета НМетАУ и ВНИИметмаш по результатам ранее проведенных измерений). Суммарное перемещение элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 от действий данной нагрузки составило 5,15 мм. При этом модуль жесткости рабочей клетки стана составляет $970,8 \times 10^6$ Н/м.

Как было отмечено во введении, наибольшая доля деформации приходится на рабочие валки, текстолитовые вкладыши, клиновое устройство перемещения валков и контактные поверхности смежных элементов.

Проектом реконструкции рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 предусмотрено незначительное увеличение диаметра шеек валков до 550 мм, замена текстолитовых вкладышей жесткими четырехрядными подшипниками качения на цилиндрических роликах и создание предварительного напряжения (распора) для стабилизации контакта смежных элементов. В результате суммарные деформации элементов клетки под дейст-

вием рабочей нагрузки $P = 5200$ кН приводят к перемещениям, не превышающим 1,65 мм. Модуль жесткости реконструированной рабочей клетки составляет $3151,5 \times 10^6$ Н/м, что в 3,25 раза превышает жесткость исходной рабочей клетки.

Конечная цель реконструкции рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 это повышение точности геометрических размеров труб, в частности, обеспечение толщины стенок труб в пределах стандартных полей допусков. Ниже приводятся математическое обоснование прогнозирования фактических толщин стенок до и после предполагаемой реконструкции. Расчет выполнен методом математической статистики на примере труб $\varnothing 325 \times 10$ мм. Толщинометрия труб диаметром $325 \times 12,5$ мм, материал – сталь 20

до (1) и после (2) модернизации рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 представлена на рис. 8. Результаты толщинометрии гильз диаметром $325 \times 12,5$ мм, материал – сталь 20 после прокатки черновых труб на автоматическом стане ТПА 350, показывает, что характер колебаний толщины стенки и колебаний элементов рабочей клетки имеют взаимосвязанную форму. Характер распределения плотности стенки труб показывает, что повышение жесткости установки валков рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 приводит к стабилизации динамики межвалкового пространства, снижению разностенности прокатываемых гильз и одновременному повышению качества прокатываемых труб.

Рис. 8. Толщинометрия труб диаметром $325 \times 12,5$ мм, материал – сталь 20 до 1 и после 2 модернизации рабочей клетки автоматического стана ТПА 350

Выводы

1. Представлено обоснование расчетной схемы механической системы рабочей клетки автоматического стана ТПА 350. Разработана математическая модель динамики механической системы «гильза (труба) – рабочая клетка» в рамках принятой расчетной схемы. Учтено влияние изменения во времени технологической нагрузки прокатываемой трубы, параметры жесткости элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА 350.

2. Представлены результаты решения дифференциальных уравнений колебаний элементов рабочей клетки автоматического стана для вы-

бранных моделей упругих разветвленных подсистем. Полученные результаты позволили в комплексе оценить амплитудно-частотные характеристики ветвей рабочей клетки стана с учетом переменности во времени функции нарастания технологической нагрузки прокатываемой гильзы.

3. Выявлено, что максимальная амплитуда вынужденных колебаний в межвалковом зазоре рабочей клетки достигает 2,34 мм, что превышает допустимые величины настроечных параметров очага деформации автоматического стана ТПА 350.

4. На этапе назначения технологических процессов прокатки гильзы, путем комплексного

математического моделирования динамики рабочей клетки в периоды переходных процессов установлены рациональные режимы прокатки гильз с учетом прогнозируемых показателей качества выпускаемых труб и величины допустимого уровня виброактивности системы. Расчеты показывают, что, например, при прокатке черновых труб диаметром 325×12,5 мм, материал – сталь 20, устойчивый технологический процесс на автоматическом стане ТПА 350 реализуем при скорости прокатки гильзы не более 3,2 м/с.

5. Предложена схема комплексной модернизации рабочей клетки автоматического стана ТПА 350. Показано, что замена пневмоцилиндра клинового механизма установки рабочих валков на силовой гидроцилиндр диаметром 120 мм с системой пропорциональной гидравлики и модернизация установки валков рабочей клетки приводит к повышению жесткости элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА 350, снижению разностенности прокатываемых гильз и повышению качества прокатываемых труб.

Бібліографічний список

1. Соловейчик П. М. Трубопрокатные агрегаты с автомат-станом. М. : Металлургия, 1967. 160 с.
2. Данченко В. Н., Коликов А. П., Романцев Б. А., Самусев С. В. Технология трубного производства : учебник для вузов. М. : Интермет-Инжиниринг, 2002. 640 с.
3. Кожевников С. Н. Динамика нестационарных процессов в машинах. Киев : Наукова думка, 1986. 288 с.
4. Иванченко Ф. К., Полухин П. И., Тылкин

М. А., Полухин В. П. Динамика и прочность металлургического оборудования. М. : Металлургия, 1970. 488 с.

5. Рахманов С. Р., Тополов В. Л. Экспериментальное исследование станов трубопрокатного агрегат. Вибрация в технике и технологиях. № 2(62). 2011. С. 91–96.

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

References

1. Soloveichik, P.M. (1967). *Truboprokatnye agregaty s avtomat-stanom*. Moskva: Metallurgiya
2. Danchenko, V.N., Kolikov, A.P., Romantsev, B.A., Samusev, S.V. (2002). *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva : uchebnik dlia vuzov*. Moskva: Intermet-Inzhiniring
3. Kozhevnikov, S.N. (1986). *Dinamika nestatsionarnykh protsessov v mashinakh*. Kiev: Naukova dumka
4. Ivanchenko, F.K., Polukhin, P.I., Tylkin, M.A., Polukhin, V.P. *Dinamika i proch-nost metallurgicheskogo oborudovaniia*. Moskva: Metallurgiya, 1970, 488
5. Rakhmanov, S.R., Topolov, V.L. (2011). *Ehksperimentalnoe issledovanie stanov truboprokatnogo agregat. Vibratsiia v tekhnike i tekhnologiiakh*, 2(62), 91-96
6. Rakhmanov, S.R., Liubin, N.V. (2016). *Dinamika rabochei kleti avtomaticheskogo stana truboprokatnogo agregata. Vibratsiia v tekhnike i tekhnologiiakh*, 1(81), 105-112

Рахманов Сулейман Рахманович, Директор НВП «Восток Плюс» (м. Дніпро, Україна). E-mail: prfvostokplus@gmail.com

Поворотний Віктор Володимирович, старший викладач, Національна металургійна академія України (м. Дніпро, Україна). E-mail: teormex@ua.fm

ДИНАМІКА ЕЛЕМЕНТІВ РОБОЧИХ КЛІТЕЙ АВТОМАТИЧНОГО СТАНУ ТПА 350

Мета роботи. Розробка математичної моделі динамічної системи «гільза (труба)- робоча кліть» з її подальшим обґрунтуванням і дослідження амплітудно-частотних характеристик вертикальних коливань робочих валків з урахуванням впливу зміни в часі технологічного навантаження гільзи, що обробляється, мас механічної системи і жорсткості базових елементів робочої кліті автоматичного стану ТПА 350.

Методика. Теоретичні дослідження динаміки елементів робочої кліті автоматичного стану ТПА 350 проведено з використанням фундаментальних закономірностей і аналітичних методів механіки, динаміки

механічних систем з пружними ланками, теорії коливань, теорії машин і механізмів, методу скінченних елементів. Імітаційне дослідження переміщення установки робочих валків виконувалося на основі розроблених математичних моделей за допомогою чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь з використанням сучасних інформаційних технологій. Експериментальні методи діагностики енергосилових параметрів автоматичного стану ТПА 350 прокатки були проведені з використанням тензометричного методу, за допомогою сертифікованої вимірювальної і реєструвальної апаратури.

Результати. Розрахунковим шляхом встановлено, що максимальна амплітуда вимушених коливань елементів робочої кліти автоматичного стану ТПА 350 в міжвалковому просторі досягає більше 2 мм. Це набагато перевищує допустимі величини настроювальних параметрів осередку деформації автоматичного стану ТПА 350.

Наукова новизна. Розроблено модель динаміки міжвалкового простору автоматичного стану ТПА 350, що дозволило в комплексі оцінити амплітудно-частотні характеристики гілок робочої кліти, з урахуванням зміни жорсткості підшипників опорних вузлів установки валків в часі і нестационарного технологічного навантаження з боку зони деформації.

Практичне значення. Запропоновано схему комплексної модернізації установки валків робочої кліти автоматичного стану ТПА 350. Досягнуто підвищення жорсткості установки валків робочої кліти автоматичного стану ТПА 350, що забезпечує стабілізацію амплітуди вимушених коливань елементів робочої кліти і зменшення різностінності гільз, що обробляються. В цілому, це призводить до підвищення якості труб.

Ключові слова: трубопрокатний агрегат, автоматичний стан, робоча кліть, установка валка, калібр, гільза, труба, різностінність, динаміка, диференціальне рівняння, міжвалковий простір, коливання, товщинометрія, модернізація.

Suleiman Rakhmanov, "Vostok Plus" (Dnipro, Ukraine). E-mail: npfvostokplus@gmail.com

Viktor Povorotniy, senior teacher, National Metallurgical Academy of Ukraine, (Dnipro, Ukraine). E-mail: teormex@ua.fm

DYNAMICS OF THE ELEMENTS OF THE WORKING STAND OF THE AUTOMATIC MILL TPA 350

Purpose of work. Development of a mathematical model of the dynamic system “sleeve (pipe) – working stand” with its subsequent justification and study of the amplitude-frequency characteristics of the vertical vibrations of the work rolls, taking into account the influence of the time variation of the technological load of the rolled sleeve, the masses of the mechanical system and the stiffness of the basic elements of the working stand of the automatic mill TPA 350.

Methodology. Theoretical studies were carried out using fundamental laws and analytical methods of theoretical mechanics, the dynamics of mechanical systems with elastic links, the theory of oscillations, the theory of machines and mechanisms, and the finite element method. A simulation study of the vertical vibrations of the work rolls was carried out on the basis of the developed mathematical models using numerical methods for solving differential equations using a computer. Experimental methods for diagnosing the rolling force were carried out using the tensometric method using certified measuring and recording equipment.

Results. It was established by calculation that the maximum amplitude of the forced vibrations of the elements of the working stand of the automatic mill TRM 350 in the roll space is more than 2 mm. This greatly exceeds the permissible values of the tuning parameters of the deformation zone of the automatic TPA 350 mill.

Scientific novelty. The parameters of the roll space were obtained, which made it possible to evaluate the results of the amplitude-frequency characteristics of the branches of the working stand of the mill, taking into account the change in the stiffness of the bearings of the support units of the roll installation over time and the unsteady technological load from the side of the deformation zone.

Practical value. It is shown that increasing the rigidity of the installation of the rolls of the working stand of the automatic mill TPA 350 provides stabilization of the amplitude of the forced vibrations of the elements of the working stand and reducing the difference in rolled sleeves. In general, this leads to an increase in the quality of rolled pipes at TPA 350. A scheme is proposed for the comprehensive modernization of the installation of rolls for the working stand of the TPA 350 automatic mill.

Key words: tube rolling mill, automatic mill, working stand, roll setup, roll pass, shell, tube, wall thickness deviation, dynamics, differential equation, roll space, vibration, thickness gauge, modernization.

Рахманов Сулейман Рахманович, Директор НПП «Восток Плюс» (г. Днепр, Украина).

E-mail: npfvostokplus@gmail.com.

Поворотний Виктор Владимирович, ассистент, Национальная металлургическая академия

Украины (г. Днепр, Украина). E-mail: teormex@ua.fm.

ДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТОВ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО СТАНА ТПА 350

Цель работы. Разработка математической модели динамической системы «гильза (труба)- рабочая клеть» с её последующим обоснованием и исследование амплитудно-частотных характеристик вертикальных колебаний рабочих валков с учетом влияния изменения во времени технологической нагрузки прокатываемой гильзы, масс механической системы и жесткости базовых элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА 350.

Методика. Теоретические исследования динамики элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 проведены с использованием фундаментальных закономерностей и аналитических методов механики, динамики механических систем с упругими звеньями, теории колебаний, теории машин и механизмов, метода конечных элементов. Имитационное исследование перемещения установки рабочих валков выполнялось на основе разработанных математических моделей с помощью численных методов решения дифференциальных уравнений с использованием современных информационных технологий. Экспериментальные методы диагностики энергосиловых параметров автоматического стана ТПА 350 прокатки были проведены с использованием тензометрического метода, при помощи сертифицированной измерительной и регистрирующей аппаратуры.

Результаты. Расчетным путем установлено, что максимальная амплитуда вынужденных колебаний элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 в межвалковом пространстве достигает более 2 мм. Это намного превышает допустимые величины настроечных параметров очага деформации автоматического стана ТПА 350.

Научная новизна. Разработана модель динамики межвалкового пространства автоматического стана ТПА 350, что позволило в комплексе оценить амплитудно-частотные характеристики ветвей рабочей клетки, с учетом изменения жесткости подшипников опорных узлов установки валков во времени и нестационарной технологической нагрузки со стороны очага деформации.

Практическое значение. Предложена схема комплексной модернизации установки валков рабочей клетки автоматического стана ТПА 350. Достигнуто повышение жесткости установки валков рабочей клетки автоматического стана ТПА 350, что обеспечивает стабилизацию амплитуды вынужденных колебаний элементов рабочей клетки и снижение разностенности прокатываемых гильз. В целом, это приводит к повышению качества прокатываемых труб на ТПА 350.

Ключевые слова: трубопрокатный агрегат, автоматический стан, рабочая клеть, установка валка, калибр, гильза, труба, разностенность, динамика, дифференциальное уравнение, межвалковое пространство, колебания, толщинометрия, модернизация.

Рукопис надійшов 25.01.2020