**Рахманов С. Р.***Национальная  
металлургическая  
академия Украины***Любин Н. В.***Винницкий  
национальный  
аграрный  
университет***Rakhmanov S. R.***National Metallurgical  
Academy of Ukraine***Lyubin N. V.***Vinnitsia National  
Agrarian University***УДК 621.774. 38**

## **ДИНАМИКА РАБОЧЕЙ КЛЕТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО СТАНА ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА**

*Приведено решение задачи динамики механической системы «гильза – рабочая клеть» автоматического стана трубопрокатного агрегата (ТПА). Составлены дифференциальные уравнения движения масс выбранной многомассовой динамической модели рабочей клетки автоматического стана ТПА. Представлены результаты исследования динамики взаимодействия прокатываемой гильзы с элементами рабочей клетки автоматического стана с учетом их упругости и вязкого сопротивления. Установлены амплитудно-частотные характеристики для соответствующей формы колебаний деформируемых элементов многомассовой модели рабочей клетки. Выявлены особенности формирования динамических процессов в механической системе и характер функционирования элементов рабочей клетки в процессе прокатки гильзы на автоматическом стане.*

**Ключевые слова:** автоматический стан, рабочая клеть, гильза, вибрация, сила прокатки, динамика, разностенность, дифференциальное уравнение, жесткость, вынужденные колебания, амплитуда, частота.

Возрастающие темпы производства бесшовных горячекатаных труб на станах технологической линии трубопрокатных агрегатов (ТПА) влечет за собой ужесточение режимов функционирования основного и вспомогательного оборудования.

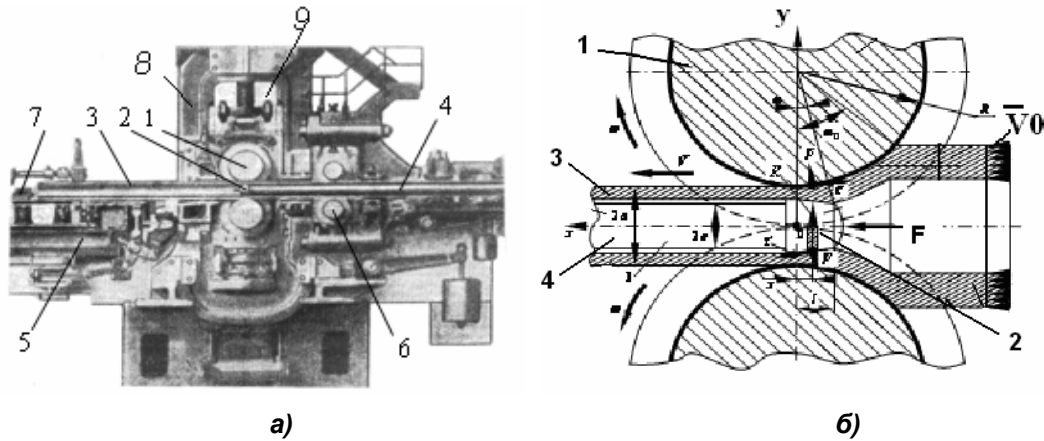
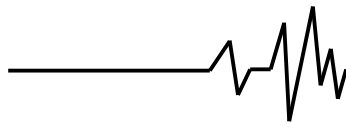
При реализации циклограммы требуемых процессов производства бесшовных труб в технологической линии ТПА автоматический стан, в силу определенных своих конструктивных особенностей и возможностей, является наиболее узким местом [1, 2].

Процессы прокатки гильз на автоматическом стане сопровождаются значительными пиковыми динамическими нагрузками. Они, в силу ряда причин, возникают как в период захвата гильзы (трубы) рабочими валками клетки, так и в период установившихся процессов прокатки гильзы на стане.

Для формирования устойчивой геометрии труб, прокатываемых на автоматическом стане ТПА, важное практическое значение имеет стабильная

динамика узлов и деталей (пружина) рабочей клетки. Среди совокупности нагрузок, действующих на узлы и детали рабочей клетки автоматического стана, наименее изученными являются значительные по величине кратковременные нагрузки, вызываемые преимущественно динамическим взаимодействием гильзы с калиброванными валками и оправкой, особенно в периоды переходных процессов (принудительного захвата и прокатки гильзы).

Опыт эксплуатации автоматических станов 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 и стержневой системой механизма удержания оправки в калибре (рис. 1).



**Рис. 1. Рабочая клетка ТПА а) и схема взаимодействия гильзы с валками б) автоматического стана: 1 – валок; 2 – оправка; 3 – гильза; 4 – стержень оправки; 5 – стол передний; 6 – ролики обратной подачи гильзы; 7 – вталкиватель гильзы; 8 – станина рабочей клетки; 9 – клиновой механизм и нажимное устройство**

Эти особые условия, наряду со всеми другими факторами, влияют на формирование начальных условий технологического процесса и на сложное напряженно-деформированное состояние элементов рабочей клетки. Вышеизложенные факторы в целом приводят к образованию нестационарной динамики оборудования стана.

Исследованию динамических процессов взаимодействия прокатываемого металла (гильзы) с валками и другими узлами тяжело нагруженных станов продольной прокатки посвящен ряд фундаментальных работ [3 – 6].

При этом математическая модель процесса взаимодействия прокатываемого металла с валками стана рассмотрена в работе [4], анализ которой в дальнейшем позволил получить выражение для соответствующей упрощенной формы динамических нагрузок в период переходных процессов.

В ходе реализации технологического процесса динамичность системы «гильза (труба) – рабочая клетка» влечет за собой образование повышенной разностенности гильзы, что в дальнейшем носит сложный и трудно устранимый характер. Очевидно, что учет динамики рабочей клетки стана, интенсивности воздействия со стороны очага деформации и переменности массы прокатываемой гильзы являются определяющими параметрами в рамках рассматриваемой задачи.

Пути интенсификации технологического процесса и вопросы повышения качества прокатываемых труб всемерно диктуют условия совершенствования конструкций

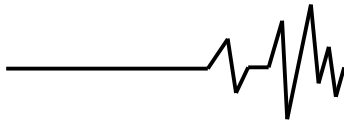
базовых механизмов и узлов рабочей клетки стана.

Реализация устойчивых технологических процессов прокатки гильзы на стане достигается путем стабилизации виброактивности узлов рабочей клетки автоматического стана. Для этого осуществляется настройка рабочей клетки стана с помощью многочисленных удерживающих и направляющих механизмов [2, 5].

Настройка требуемых параметров очага деформации проводится комплексно: фиксацией положения установки рабочих валков клиновым механизмом, положением оправки по пережиму валков в калибре, упорно – регулировочным механизмом и промежуточными проводками, установленными по всей выходной стороне автоматического стана [1, 2].

Для разработки научно-обоснованных предложений по совершенствованию конструкции рабочей клетки и расширения технологических возможностей стана необходимо более глубоко изучить влияние различных параметров модели и ряда характерных особенностей формирования процессов прокатки гильзы на поведение динамики всей механической системы стана и качество готовой продукции.

Данная работа выполнена в комплексной постановке на основе развития математической модели динамики рабочей клетки автоматического стана, где сделана определенная попытка по установлению влияния основных параметров взаимодействия рабочих валков с прокатываемой гильзой.



Очевидно, что предложенный подход более корректен и необходим при изучении сложных динамических явлений в базовых элементах рабочей клетки и всех вспомогательных механизмах выходной стороны автоматического стана.

Решение поставленной задачи обуславливает некоторое уточнение расчетной схемы и дальнейшее развитие математической модели исследуемой системы «гильза – рабочая клетка», наиболее адекватно отражающей реальные процессы, происходящие в исходной механической системе автоматического стана ТПА.

С целью установления уровня действительных нагрузок в рабочей клетке автоматического стана при прокатке существующего сортамента труб и сравнения их с результатами теоретических расчетов для

оценки точности последних на базе схемы, представленной в работе [7], были выполнены экспериментальные исследования технологических нагрузок на стане ТПА 140. Необходимость проведения экспериментальных исследований обусловлена также тем, что в литературе в большей степени отсутствуют значения энергосиловых параметров прокатки для автоматического стана ТПА при прокатке различных типоразмеров труб из углеродистых, легированных и высоколегированных марок сталей, имеющихся в сортаменте ТПА 140.

Результаты расшифровки осциллограмм, обработанные методами математической статистики, и наиболее вероятные средние за два прохода значения давления металла на валки и момента на шпинделе главного привода представлены в таблице 1.

**Таблица 1**  
**Результаты экспериментальных исследований автоматического стана ТПА 140**

№ п/п	Диаметр заготовки, мм	Марка стали	Размер гильзы после прошивки, мм x мм	Давление металла на валок, кН.
1	100	ст.45	103 x 9,5	470
2	110	ст.20	114 x 12,0	600
3	140	ст.45	148 x 13,5	730
4	140	38ХНМ	150 x 14,5	800
5	110	40Х	114 x 11,0	660

Анализ результатов экспериментальных исследований давления металла на валки и теоретические исследования динамических процессов автоматического стана ТПА показали, что энергосиловые параметры процесса прокатки зависят в основном от диаметров и степени деформации гильзы (трубы). При варьировании толщиной стенки гильзы усилия прокатки изменяются сравнительно незначительно. Это объясняется тем, что при прокатке тонкостенных труб основные усилия в очаге деформации возникают на участке обжатия стенки. Характерно, что в этом случае по мере увеличения толщины стенки усилия в зоне редуцирования гильзы возрастают, становясь соизмеримыми с усилиями в зоне обжатия стенки трубы. При прокатке толстостенных труб усилия редуцирования гильзы оказываются преобладающими. В связи с таким характером изменения усилий в зоне редуцирования общее усилие прокатки труб, в зависимости от толщины стенки, является значительным.

Динамичность системы (отношение максимальной силы прокатки к среднему значению при установившемся процессе прокатки) при этом равна 2,4–3,7. Время действия трех первых пиков динамической нагрузки составляет 4–5% от машинного времени. Максимальное значение давления металла на валки, зафиксированное на осциллограммах, равно 1400 кН.

Далее переходим к исследованию развитой динамической и математической моделей «гильза – рабочая клетка» автоматического стана ТПА. Исследование развитой динамической модели «гильза – рабочая клетка» позволяет проанализировать динамическое состояние взаимосвязанных узлов рабочей клетки в течение всего процесса прокатки гильзы и на основании вышеизложенного, решить задачу по модернизации механизмов клетки.

Показатели приведенных жесткостей и масс рабочей клетки автоматического стана ТПА 140 конструкции ОАО «УЗТМ» определены по методике [3, 4] и представлены в таблице 2.

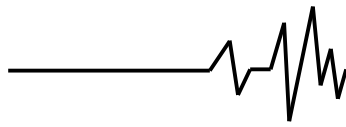


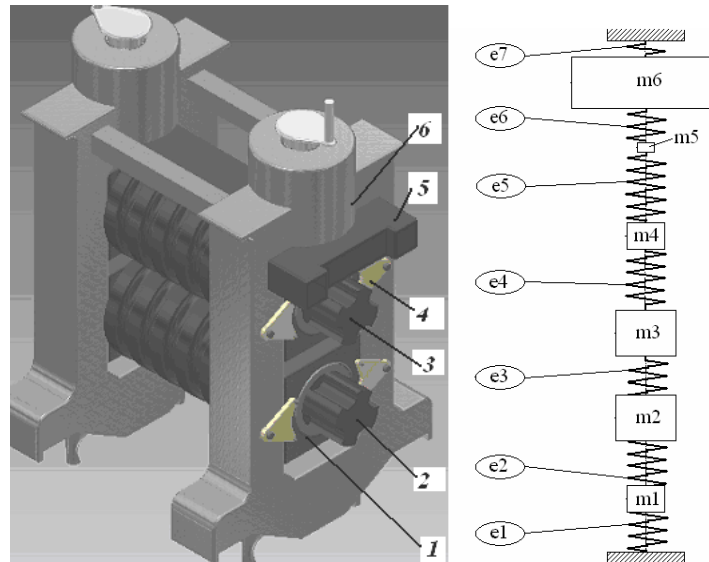
Таблица 2

**Показатели приведенной жесткостей и масс рабочей клетки автоматического стана ТПА 140 конструкции ОАО «УЗТМ»**

Элементы рабочей клетки автоматического стана ТПА 140	Приведенная податливость элементов рабочей клетки	Значения приведенной податливости, м/Н	Обозначение масс элементов рабочей клетки	Значения масс системы, кг	Доля упругой деформации от общей деформации клетки, %
Станина	$e_7$	$0.2572 \times 10^{-9}$	$m_6$	129360	17
Клиновой механизм и верх. нажимное устройство	$e_6$	$0.2572 \times 10^{-9}$	$m_5$	3240	15
Подушки и подшипники верхнего валка	$e_5$	$0.4116 \times 10^{-9}$	$m_4$	4180	14
Верхний валок	$e_4$	$0.2744 \times 10^{-9}$	$m_3$	5820	17
Нижний валок	$e_3$	$0.2229 \times 10^{-9}$	$m_2$	4790	15
Подушки и подшипники нижнего валка	$e_2$	$0.4116 \times 10^{-9}$	$m_1$	4180	14
Нижнее нажимное устройство	$e_1$	$0.3211 \times 10^{-9}$			8

Для исследования взаимодействия гильзы с валками и другими элементами рабочей клетки переходим к анализу и синтезу

принятой расчетной схемы рассматриваемой механической системы (рис. 2).

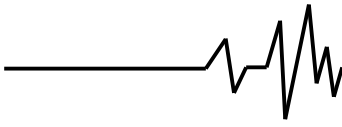


**Рис. 2. Трехмерная модель и шестимассовая расчетная схема рабочей клетки автоматического стана ТПА**

Далее переходим к разработке математической модели многомассовой динамической системы рабочей клетки автоматического стана ТПА и к решению поставленной задачи. В первом приближении исходную задачу представляем в базовой

постановке задач динамики механической системы [3, 6] с учетом определенных начальных условий.

Математическую модель обобщенной механической системы рабочей клетки автоматического стана ТПА представляем в



виде взаимосвязанных дифференциальных уравнений подсистем, описывающих поведение многомассовой модели элементов рабочей клетки стана (рис. 2).

Дифференциальные уравнения движения приведенных масс для выбранной упрощенной шестимассовой модели рабочей клетки автоматического стана запишем в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \cdot \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} = -\mu_1 \frac{dy_1}{dt} - C_1 \cdot y_1(t) + C_2 (y_2(t) - y_1(t)); \\ m_2 \cdot \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} = -\mu_2 \frac{dy_2}{dt} - C_2 \cdot (y_1(t) - y_2(t)) + C_3 (y_3(t) - y_2(t)) - P(t); \\ m_3 \cdot \frac{d^2 y_3(t)}{dt^2} = -\mu_3 \frac{dy_3}{dt} - C_3 \cdot (y_3(t) - y_2(t)) + C_4 (y_4(t) - y_3(t)) + P(t); \\ m_4 \cdot \frac{d^2 y_4(t)}{dt^2} = -\mu_4 \frac{dy_4}{dt} - C_4 \cdot (y_4(t) - y_3(t)) + C_5 (y_5(t) - y_4(t)); \\ m_5 \cdot \frac{d^2 y_5(t)}{dt^2} = -\mu_5 \frac{dy_5}{dt} - C_5 \cdot (y_5(t) - y_4(t)) + C_6 (y_6(t) - y_5(t)); \\ m_6 \cdot \frac{d^2 y_6(t)}{dt^2} = -\mu_6 \frac{dy_6}{dt} - C_6 \cdot (y_6(t) - y_5(t)) + C_7 \cdot y_6(t), \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $m_i (i=1,6)$  – приведенные массы элементов рабочей клетки;  $C_i (i=1,6)$  – приведенные жесткости элементов рабочей клетки;  $\mu_i (i=1,6)$  – вязкое сопротивление элементов рабочей клетки;  $y_i (i=1,6)$  – динамические перемещения элементов рабочей клетки в вертикальной плоскости;  $P(t) = P_0 + P_1 \sin(\omega t)$  – вертикальная гармоническая составляющая силы прокатки гильзы (согласно осциллограмм работы [7]  $P_0$  статическая и  $P_1$  амплитудное значение гармонической составляющей силы прокатки частоты  $\omega$ ),

Дифференциальные уравнения движения соответствующих масс узлов рабочей клетки стана (1) составлены с учетом вязкого сопротивления и представлены в постановке задачи фундаментальной задачи Коши. Решение системы дифференциальных уравнений (1) реализуем численно, методом Рунге – Кутты, для наиболее распространенных форм колебаний системы «гильза – рабочая клетка».

Согласно данным таблицы 2 на базе разработанной математической модели задачи выполним уточненный расчет вынужденных колебаний упругих подсистем рабочей клетки

для исходных данных автоматического стана ТПА 140. Особенности формирования динамики основных элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА 140 и условия функционирования упругих взаимосвязанных подсистем механической системы клетки представлены на рис. 3.

Полученные результаты представляют динамическую картину взаимодействия прокатываемой гильзы с базовыми элементами рабочей клетки автоматического стана с учетом их упругости и вязкого сопротивления.

Сравнение результатов экспериментальных исследований и расчетных значений амплитудно-частотных характеристик динамического процесса при колебаниях масс рассматриваемых систем рабочей клетки за время реализации технологического процесса прокатки гильзы на автоматическом стане ТПА 140 превышает допустимый уровень виброактивности для системы [7]. В ходе реализации технологического процесса динамичность системы «гильза (труба) – рабочая клетка» влечет за собой образование повышенной разностенности гильзы, что в дальнейшем носит сложный и трудно устранимый характер. Очевидно, что учет динамики рабочей клетки стана и интенсивности воздействия со стороны очага деформации являются определяющими параметрами в рамках рассматриваемой задачи.

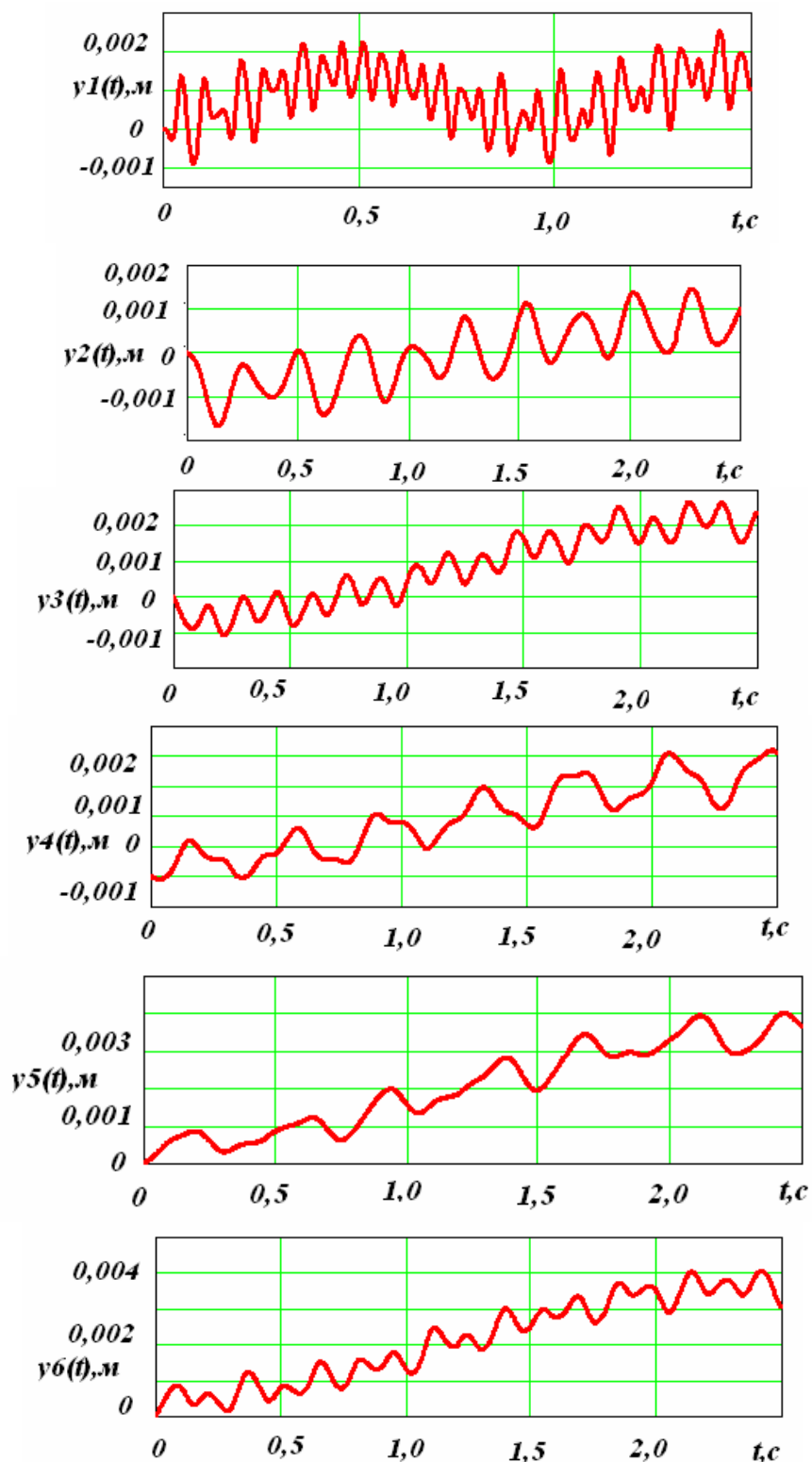
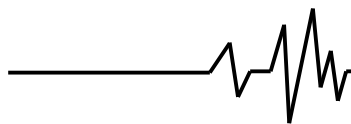
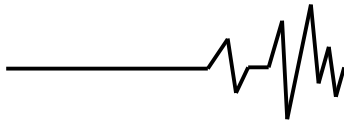


Рис. 3. Динамика элементов компоновки рабочей клетки автоматического стана ТПА 140 (гильза диаметром 114x12, материал – сталь 20):  $y_1(t)$  – перемещения нижней подушки с подшипниками;  $y_2(t)$  – перемещения нижнего вала;  $y_3(t)$  – перемещения верхнего вала;  $y_4(t)$  – перемещения верхней подушки с подшипниками;  $y_5(t)$  – перемещения клинового механизма и нажимного устройства;  $y_6(t)$  – перемещения стоек и поперечин станины клетки



Анализ результатов комплексного исследования расчета динамики автоматического стана указывает, что разработанная математическая модель достоверно описывает нестационарные динамические явления в механической системе рабочей клетки. Разработанная математическая и динамическая модели с достаточно высокой степенью точности описывают вынужденные колебания элементов упругих подсистем рабочей клетки автоматического стана ТПА 140.

Возможность комплексного математического моделирования различных режимов прокатки гильзы на этапе проектирования технологических процессов прокатки труб на автоматическом стане ТПА 140 существенно отличает полученные результаты от результатов ранее известных работ в области исследования динамической устойчивости и виброактивности упругих подсистем рабочей клетки и других механизмов стана [6, 7].

Данная работа отличается от известных [5, 6] комплексным подходом к исследованию динамических процессов с последующим учетом переменных во времени и циклически изменяющихся нестационарных технологических нагрузок, действующих со стороны прокатываемой гильзы и очага деформации стана на элементы рабочей клетки автоматического стана ТПА 140.

### **Выводы**

Уточнена расчетная схема механической системы рабочей клетки автоматического стана ТПА. Разработана математическая модель динамики системы в рамках принятой многомассовой модели механической системы рабочей клетки автоматического стана ТПА.

Учтены силовые параметры прокатываемой трубы, переменность во времени и циклический характер технологических нагрузок со стороны очага деформации, параметры упругости и диссипации элементов рабочей клетки автоматического стана ТПА.

Представлены результаты численного решения дифференциальных уравнений колебаний элементов многомассовой модели упругих подсистем рабочей клетки. Полученные результаты позволяют в комплексе оценить амплитудно – частотные характеристики узлов и «пружину» рабочей клетки автоматического стана. Установлено, что суммарная амплитуда вынужденных колебаний рабочей клетки достигает 2,56мм. Это намного превышает

допустимые или настоячные величины параметров очага деформации автоматического стана ТПА 140 для получения гильз с требуемыми показателями разностенности по ТУ и ГОСТ в установленных пределах  $\pm 10 - 12\%$ .

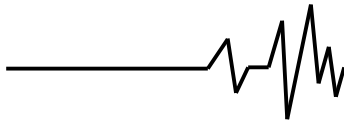
На этапе назначения технологических процессов прокатки гильзы, путем комплексного математического моделирования динамики рабочей клетки, расчетным путем установлены рациональные режимы прокатки гильз с учетом прогнозируемых показателей качества (продольной разностенности) выпускаемых труб и величины допустимого уровня виброактивности рабочей клетки. Расчеты показывают, что, например, при прокатке гильз диаметром 112x12, материал – сталь 20, устойчивый процесс прокатки гильзы реализуем при скорости прокатки на автоматическом стане ТПА 140 не более 2, 95 м/с.

### **Список использованных источников**

1. Соловейчик П. М. Трубопрокатные агрегаты с автомат станом. М.: Металлургия, 1967. – 160 с.
2. Данченко В.Н. Технология трубного производства. Учебник для вузов. /В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев // . – М.: Интермет - Инжиниринг, 2002. – 640.
3. Кожевников С. Н. Динамика машин с упругими звеньями / С. Н. Кожевников. – Киев: Изд. АНУССР, 1961. – 160 с.
4. Иванченко Ф. К. Динамика и прочность металлургического оборудования / Ф. К. Иванченко [и др.]. – М.: Металлургия, 1970. – 488 с.
5. Кожевников С. Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / С. Н. Кожевников. – Киев: Наукова думка, 1986. – 288 с.
6. Адамия Р. Ш. Оптимизация динамических нагрузок прокатных станов / Р.Ш. Адамия. – М.: Металлургия, 1978. – 232 с.
7. Рахманов С. Р. Экспериментальное исследование виброактивности станов трубопрокатного агрегата / С.Р. Рахманов, В.Л. Тополов. – Вибрация в технике и технологиях. – 2011. – № 2. – С. 91–96.

### **Список источников в транслитерации**

1. Soloveychik P.M. Truboprokatnyye agregaty s avtomat sostoyaniyem. M.: Metallurgiya, 1967. – 160 s.
2. Danchenko V.N. Tekhnologiya trubnogo proizvodstva. Uchebnik dlya vuzov. /



V.N. Danchenko, A. P. Kolikov, B.A. Romantsev, S.V. Samusev // – М.: Internet - Inzhiniring, 2002. – 640.

3. Kozhevnikov S. N. Dinamika mashin s uprugoy zven'yami / S. N. Kozhevnikov. – Kiyev: Izd. ANUSSR, 1961. – 160 s.

4. Ivanchenko F.K. Dinamika i prochnost' metallurgicheskogo oborudovaniya / F. K. Ivanchenko [i dr.]. – М.: Metallurgiya, 1970. – 488 s.

5. Kozhevnikov S. N. Dinamika nestatsionarnykh protsessov v mashinakh / S. N. Kozhevnikov. – Kiyev: Naukova dumka, 1986. – 288 s.

6. Adamiya R.SH. Optimizatsiya dinamicheskikh nagruzok prokatnykh stanov / R.SH. Adamiya. – М.: Metallurgiya, 1978. – 232 s.

7. Rakhmanov S.R. Eksperimental'noye issledovaniye vibroaktivnosti stanov truboprokatnogo agregata / S.R. Rakhmanov, V.L. Topolov. - Vibratsiya v tekhnike i tekhnologiyakh. – 2011. – № 2. – S. 91–96.

#### ДИНАМІКА РОБОЧОЇ КЛІТИ АВТОМАТИЧНОГО СТАНУ ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТУ

**Анотація.** Наведено рішення задачі динаміки механічної системи «гільза - робоча кліть» автоматичного стану трубопрокатного агрегату (ТПА). Складено диференціальні рівняння руху мас обраної багатомасової динамічної моделі робочої кліті автоматичного стану ТПА. Представлені результати дослідження динаміки взаємодії прокочується гільзи з елементами робочої кліті автоматичного стану з урахуванням їх пружності і в'язкого опору. Встановлено

амплітудно-частотні характеристики для відповідної форми коливань деформівних елементів багатомасової моделі робочої кліті. Виявлено особливості формування динамічних процесів в механічній системі і характер функціонування елементів робочої кліті в процесі прокатки гільзи на автоматичному стані.

**Ключові слова:** автоматичний стан, робоча кліть, гільза, вібрація, сила прокатки, динаміка, різностепенність, диференціальне рівняння, жорсткість, вимушені коливання, амплітуда, частота.

#### THE DYNAMICS OF THE WORKING STAND PIPE MILL AUTOMATIC MACHINE

**Annotation.** The solution of a problem of dynamics for the chosen "sleeve-a working cage" model automatic a camp of the pipe-rolling unit (PRU) is provided. The differential equations of the movement of mass of the chosen multi mass dynamic model of a working cage of an automatic camp of PRU are worked out. Results of research of dynamics of interaction of the rolled sleeve with elements of a working cage of an automatic camp taking into account their elasticity and viscous resistance is presented. Amplitude-frequency characteristics for the corresponding form of fluctuations of deformable elements of a working cage are established. Features of formation of dynamic processes in mechanical system and nature of functioning of elements of a working cage of an automatic camp are revealed.

**Key words:** an automatic camp, a working cage, a sleeve, vibration, force of rolling, the loudspeaker, the differential equation, rigidity, the compelled fluctuations, amplitude, frequency.