

УДК 621.774.35

С.Р. Рахманов, А.С. Ткаченко, В.М. Львовский, В.С. Рахманова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЯ МЕХАНИЗМА УДЕРЖАНИЯ ОПРАВКИ ПРОШИВНОГО И РАСКАТНОГО СТАНОВ

*Рассмотрена математическая модель динамических процессов, позволяющая определить некоторые основные условия возникновения термопараметрических колебаний стержня оправки прошивного и раскатного станов. Моделированием высокотемпературных динамических процессов прокатки труб намечены пути реализации устойчивых технологических процессов на станах трубопрокатного агрегата. Илл.5.,библ. 9.*

*Ключевые слова: стержневая система, параметрические колебания, зона устойчивости, механизм удержания оправки.*

Процесс производства горячекатаных бесшовных труб на станах винтовой прокатки трубопрокатного агрегата, согласно требованиям технологии, предусматривает прошивку отверстий в сплошной цилиндрической трубной заготовке с последующей продольной прокаткой и раскаткой гильз на оправке, упирающейся в стержневую систему [1].

При реализации процессов прокатки бесшовных труб на тяжелонагруженных прошивных и раскатных станах технологического цикла в стержневой системе возникают значительные по величине и изменяющиеся во времени усилия прокатки, и температурные нагрузки. Они обуславливают отклонение формы стержня от прямолинейной. При этом возникающие значительные по величине динамические температурные нагрузки приводят к уходу оправки вместе со стержнем из очага деформации, что вызывает нежелательные изменения геометрических размеров труб (рис.1).

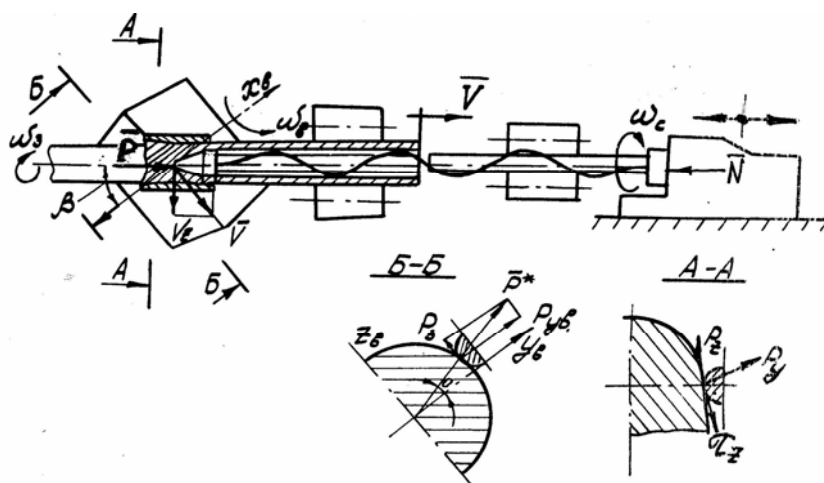


Рисунок 1 – Схема процесса прошивки трубной заготовки на прошивном стане трубопрокатного агрегата и сил, действующих на стержневую систему механизма удержания оправки

© РАХМАНОВ С.Р., ТКАЧЕНКО А.С., ЛЬВОВСКИЙ В.М., РАХМАНОВА В.С., 2009

Практика експлуатації станів винтової прокатки труб показує, що термопараметричні коливання в тяжлонавантаженої стержневої системі механізму утримання оправки має місце переважно при нерівномірному циклічному нагріві со сторони безпосередньо прокатуваної труби. Необхідно врахувати, що стержень в ході виконання технологічного процесу інтенсивно охолоджується, навантажений продольними складовими зусиллями прошивки або раскатки (прокатки) і підвргнутий впливу високих температурних навантажень. Отже, в стержні в результаті нерівномірного нагріву со сторони прокатуваної труби виникають стискаючі і зрівнювальні їх розтягуючі циклічні температурні навантаження. Прокатувана труба створює рухомі температурні навантаження, що, виключаючи умови повзучості, викликає втрату стійкості стержня оправки в межах еластичності системи.

Вопросы, пов'язані з дослідженнями параметричних коливань стержневих систем недостатньо вивчені і мало освітлені в літературі. По даному вопросу известно лишь ограниченное количество работ [2, 3], где изложены фундаментальные основы термоустойчивости механических систем.

Параметричні коливання стержневої системи пов'язані з умовами виникнення циклічного нагріву при високих знакоперемінних температурах прокатуваної труби. Як показують експериментальні дослідження [4], знакоперемінні температури безпосередньо обумовлені умовами обертання стержня оправки по ходу виконання технологічного процесу прокатки труб.

При прошивці або раскатці внаслідок обертання нагріта гильза (труба), переміщуючись по стержню со швидкістю прокатки, створює гармонічну теплову навантаження.

Рухомі температурні навантаження труби з достатньою точністю апроксимуються по закону  $T(t) = T_0 + T_1 \cos(\omega t)$  (рис. 2).

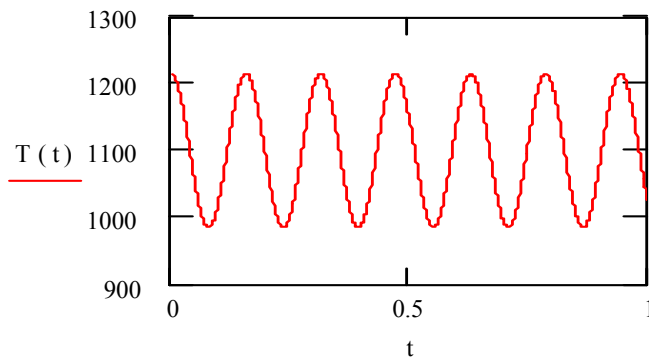


Рисунок 2 – Температурное поле гильзы на прошивном стане ТПА 140

(ш104 x 10, сталь 40 X,  $T_0=1190^{\circ}\text{C}$ ,  $T_1=115^{\circ}\text{C}$ ,  $\omega = 40 \text{ 1/c}$  )

При этом величина температурной нагрузки, формируемая прокатываемой трубой, определяется из выражения согласно [5]

$$N_x(T, t) = \int_0^T \int_0^{Vt} \alpha(T) E(T) dT dx, \quad (1)$$

где  $T_0$  – номинальная температура на оси стержня оправки;  $T_1$  – амплитудное значение температуры трубы;  $E(T)$  – модуль упругости материала стержня;  $\alpha(T)$  – коэффициент линейного расширения материала стержня;  $\omega$  – частота колебаний температурного поля трубы на внешней поверхности стержня оправки.

Для исследования термopараметрических колебаний стержневой системы механизма удержания оправки с учетом воздействия осесимметричного подвижного температурного поля прошиваемой трубы, в рамках принятой расчетной схемы, воспользуемся дифференциальным уравнением поперечных колебаний стержня (рис.3)

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} = q(x, t, T), \quad (2)$$

где  $y(x, t)$  – динамические прогибы стержневой системы;  $EI$  – изгибная жесткость стержня;  $q(x, t, T)$  – интенсивность нагружения стержневой системы механизма удержания оправки в процессе прокатки.

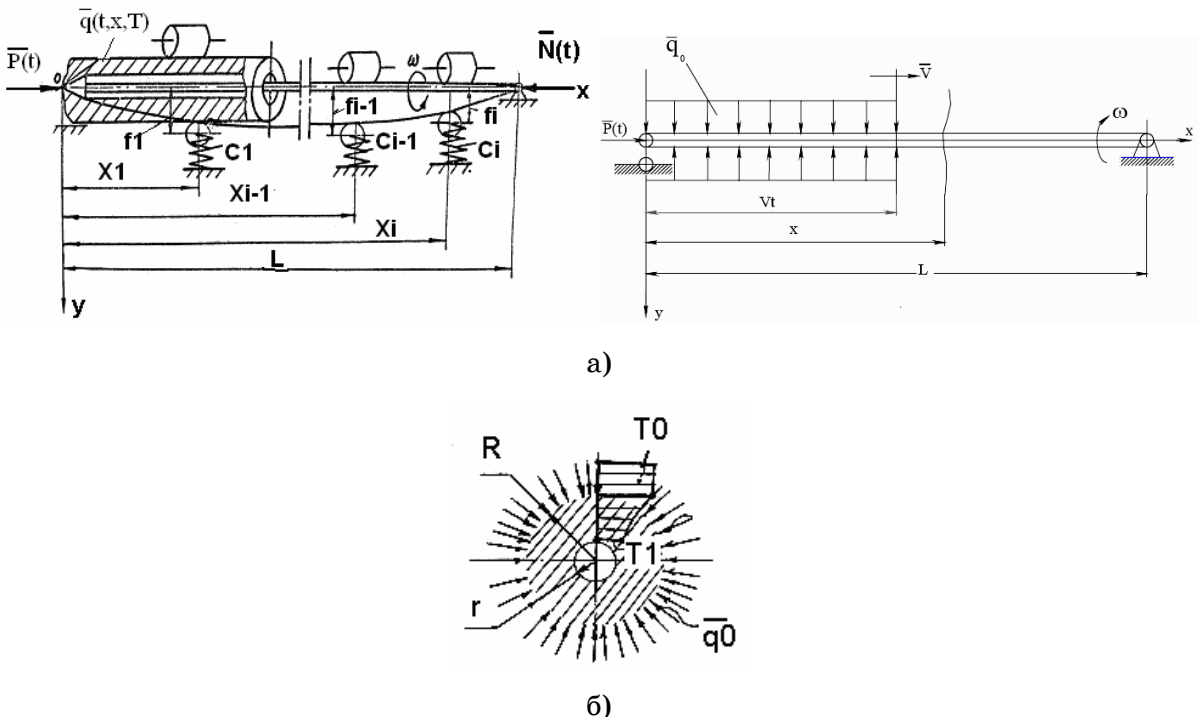


Рисунок 3 – Расчетная схема стержневой системы механизма удержания оправки прошивного и раскатного стансов трубопрокатного агрегата

Особенности устойчивого технологического процесса производства бесшовных труб в основном определяются интенсивностью нагружения со

стороны очага деформации и инертностью стержня оправки и прокатываемой трубы.

В известной постановке задач механики интенсивность нагружения стержня оправки согласно [6] находится в виде

$$q(x, t, T) = q_0 - m_0 \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} - P(t, T) \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где  $P$  – осевая стационарная составляющая усилия прошивки заготовки или раскатки гильзы;  $P(t, T) = P_0 + N_x(T, t)$  – суммарная осевая сила, действующая на стержневую систему механизма удержания оправки;  $m_0$  – погонная масса стержня оправки;  $q_0$  – интенсивность внешней нагрузки со стороны прокатываемой трубы;  $N_x(T, t)$  – температурная составляющая осевой нагрузки, определяемая согласно [2].

Для решения поставленной задачи уравнения (2) с учетом (3) перепишем в виде

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + m_0 \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = [q_0 - P(t, T) \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2}] \Big|_0^{Vt}. \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения (4) представим в форме разложения в ряд Фурье по фундаментальным функциям задачи согласно [6].

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^n f_k(t) \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right), \quad (5)$$

где  $f_k(t)$  – искомая функция времени, подлежащая определению из решения задачи;  $l$  – длина стержневой системы механизма удержания оправки стана.

Подставляя (5) в дифференциальное уравнение (4) для «к» – ого члена ряда имеем следующее

$$EI \frac{k^4 \pi^4}{l^4} \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) f_k(t) + m_0 \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) \ddot{f}_k(t) = q_0 + P(t, T) \frac{k^2 \pi^2}{l^2} \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) f_k(t), \quad (6)$$

Применив алгоритм решения задачи по методу Бубнова-Галеркина согласно [7]

$$\int_0^l L(t) \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) dx = 0,$$

уравнение (6) представим следующим образом:

$$\begin{aligned} EI \frac{k^4 \pi^4}{l^4} f_k(t) \int_0^l \sin^2\left(\frac{k\pi x}{l}\right) dx + m_0 \ddot{f}_k(t) \int_0^l \sin^2\left(\frac{k\pi x}{l}\right) dx = \\ = q_0 \int_0^l \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) dx + \int_0^l P(t, T) \frac{k^2 \pi^2}{l^2} \sin^2\left(\frac{k\pi x}{l}\right) dx. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая свойства ортогональности фундаментальных функций задачи

$$\int_0^l \sin\left(\frac{\kappa\pi x}{l}\right) \sin\left(\frac{j\pi x}{l}\right) dx = \begin{cases} 0, j \neq \kappa; \\ \frac{l}{2}, j = \kappa. \end{cases}$$

для нестационарного процесса прошивки уравнение (7) с учетом определенных преобразований имеет следующий интегральный вид

$$\ddot{f}_k(t) + \left\{ \frac{k^4 \pi^4}{l^4} \frac{EI}{m_0} - \left[ P_0 + \int_0^T \int_0^{Vt} \alpha(T) E(T) \right] d(T_0 + T_1 \cos(\omega t)) dx \frac{\kappa^2 \pi^2}{l^2} \right\} f_k(t) = \frac{2q_0}{k\pi m_0} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\kappa\pi Vt}{l}\right) \right] \quad (8)$$

После соответствующих подстановок в (8) по процедуре имеем

$$\left[ \frac{k^4 \pi^4}{l^4} EI f_k(t) + m_0 \ddot{f}_k(t) - P(t) \frac{\kappa^2 \pi^2}{l^2} f_k(t) \right] \frac{l}{2} = \frac{lq_0}{k\pi} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\kappa\pi Vt}{l}\right) \right], \quad (9)$$

нестационарные колебания стержня оправки в процессе прошивки окончательно представляем в виде

$$\ddot{f}_k(t) + \Omega^2 [1 - \mu_k(t) \cos(\omega t)] f_k(t) = \frac{2q_0}{k\pi m_0} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\kappa\pi Vt}{l}\right) \right]. \quad (10)$$

Для удобства анализа термопараметрических колебаний и оценки динамического состояния стержневой системы для квазистационарного процесса прокатки труб уравнения (10) представим в виде известного уравнения Матье-Хилла с правой частью согласно [7]

$$\ddot{f}_k(t) + \Omega^2 [1 - \mu_k(t) \cos(\omega t)] f_k(t) = F_k(t), \quad (11)$$

где  $F_k(t) = \frac{2q_0}{k\pi m_0} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\kappa\pi Vt}{l}\right) \right]$  – параметр правой части уравнения (10).

Для оценки уровня виброактивности системы в целом и параметрических колебаний стержня оправки необходимо уравнение (11) представить в эквивалентной форме:

$$\ddot{f}_k(t) + \Omega^2 [1 - \mu_k(t) \phi_k(t)] f_k(t) = F_k(t), \quad (12)$$

где  $\phi_k(t) = \cos(\omega t)$  – гармоническая функция, характеризующая изменение параметров термонагруженной стержневой системы со стороны прокатываемой трубы;  $\Omega = \omega_k \sqrt{1 - \frac{P_0}{P_k}}$ ;  $\omega_k = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m_0}}$  – частота свободных колебаний стержня оправки;  $\mu_k = \frac{P_1}{2(P_k - P_0)}$  – коэффициент возбуждения стержневой системы оправки.

Характерные кривые, приведенные на рис.4 и рис.5 отображают типовые условия возникновения параметрических колебаний стержневой системы оправки под действием подвижной температурной нагрузки прокатываемой трубы. Очевидно, для прошивного и раскатного станов ТПА в условиях неравномерного нагрева и воздействия со стороны прокатываемой трубы в осевом направлении параметрические колебания стержня имеют сложную форму. Анализ динамической термоустойчивости системы показывает, что при увеличении скорости прошивки прокатки с 1,2 м/с до 1,8 м/с замечен определенный рост повышения виброактивности стержневой системы прошивного и раскатного станов.

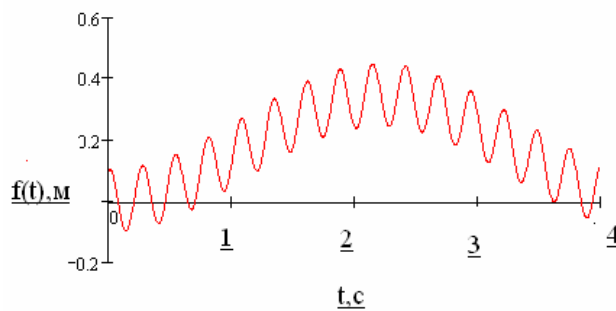


Рисунок 4 – Термопараметрические колебания стержня оправки прошивного стана ТПА 140 (прокатка труба  $T=1210^{\circ}\text{C}$ , сталь 20, ш144×10,  $V=1,2\text{м/с}$ )

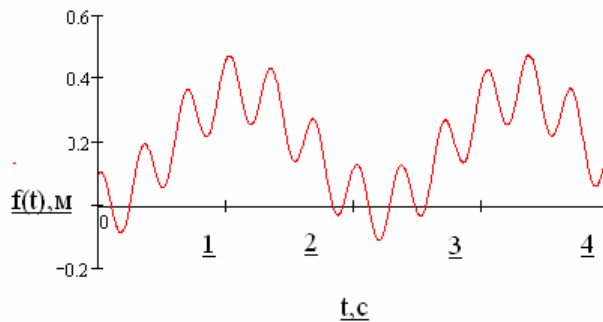


Рисунок 5 – Термопараметрические колебания стержневой системы раскатного стана ТПА 140 (прокатка труб  $T=990^{\circ}\text{C}$ , сталь 40Х, ш 148×18,5,  $V=1,8\text{м/с}$ )

Для оценки параметрической термоустойчивости стержневой системы в рамках постановки задачи и выбранной динамической модели механической системы в данном случае согласно [7] удобно воспользоваться диаграммой динамической устойчивости Айнса-Стретта (рис.6).

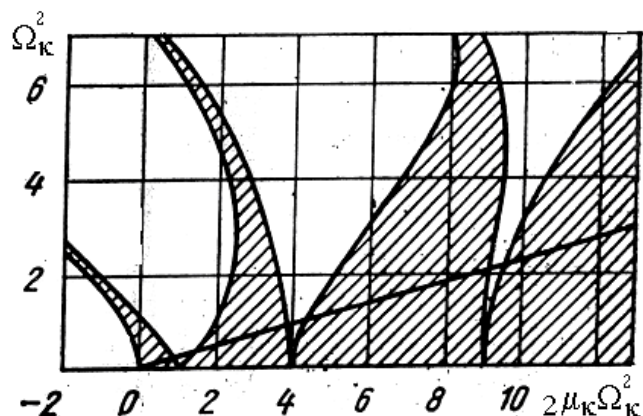


Рисунок 6 – Обобщенная диаграмма Айнса-Стретта для областей параметрической термоустойчивости стержня оправки станов трубопрокатного агрегата

### Выводы

1. Разработана математическая модель динамических процессов, позволяющая определить некоторые основные условия возникновения термопараметрических колебаний стержня оправки прошивного и раскатного станов.

2. Путем моделирования процессов прокатки труб на станах ТПА намечены направления интенсификации технологического процесса и стабилизации динамики стержневой системы.

3. Значительное повышение термустойчивости системы и тем самым улучшение качества прокатываемых труб может быть достигнуто назначением рациональных режимов эксплуатации станов и использованием существующей системы охлаждения стержня оправки [8, 9].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Потапов И. Н. Новая технология винтовой прокатки./ Потапов И. Н., Полухин П. И.// М., Металлургия, 1975. – 344 с.
2. Безухов Н. И. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур./ Безухов Н. И., Бажанов В. Л., Гольденблатт И. И., Николаенко Н.А., Синюков А.М.// М., Машиностроение, 1965. – 340 с.
4. Шаповалов Л. А. Влияние неравномерного нагрева на устойчивость сжатого стержня. ППМ, 1958, т. XXI, вып. I. С.48 – 53.
5. Николаенко Н. А. Введение в термоупругость, Киев, Наукова думка, 1965. – 470 с.
5. Гохфельд Д. А. Несущая способность конструкций в условиях теплосмен. М., Машиностроение, 1970. – 475 с.
6. Джанелидзе Г. Ю. Устойчивость упругих систем при динамических нагрузках в кн. Проблемы устойчивости в строительной механике. М., Издательство литературы по строительству, 1965. – 650 с.
7. Пановко Я. Г. Устойчивость и колебания упругих систем. /Пановко Я. Г., Губанова И. И.// М., Наука, 1967. – 236 с.
8. Чекмарев А. П. Теория трубного производства./ Чекмарев А.П., Друян В.М.// М., Металлургия, 1965. – 540 с.