

УДК 621.774.38

Рахманов С. Р.
Тополов В. Л.**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОАКТИВНОСТИ СТЕРЖНЯ ОПРАВКИ ПРОШИВНОГО
СТАНА ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА**

Технология производства бесшовных труб предусматривает прошивку отверстия в сплошной трубной заготовке оправкой, упирающейся в массивную стержневую систему [1].

В стержне, удерживающем оправку в очаге деформации, при прошивке трубной заготовки возникают значительные по величине и изменяющиеся во времени динамические нагрузки, что обуславливает отклонение формы стержня от прямолинейной. Это в последующем вызывает повышенные колебания в рассматриваемой механической системе. Изменение со временем инертности трубной заготовки и интенсивности воздействия гильзы, перемещающейся вдоль стержня оправки, значительно усложняет характер протекания динамических процессов [1–3].

Отметим, что колебания стержневой системы в полной мере передаются на оправку, расположенную в очаге деформации, вызывает нежелательное отклонение геометрических параметров прокатываемых гильз [4].

Во избежание появления значительных динамических прогибов стержня оправки и повышенной вибрации в системе на действующих прошивных станах большинства трубопрокатных агрегатов (ТПА) используются специальные стационарные опорные механизмы (центрователи) (рис. 1).

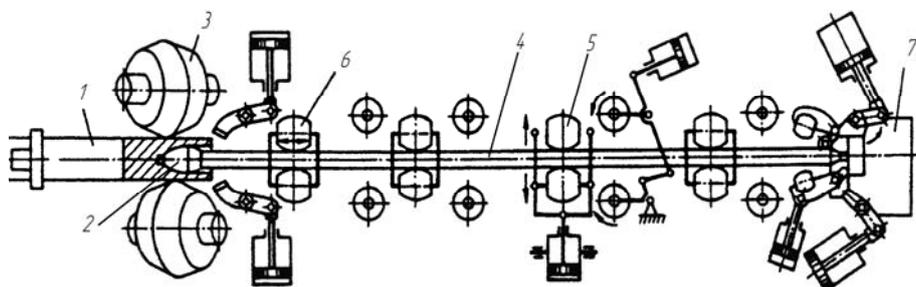


Рис. 1. Выходная сторона прошивного стана трубопрокатного агрегата с осевой выдачей гильз

Исследования проблем точности горячекатаных труб и анализ результатов показывают, что прошивные станы трубопрокатных агрегатов обладают высокой виброактивностью. Следует подчеркнуть, что данный недостаток в целом относится к исходной схеме винтовой прокатки труб и связан с особенностями функционирования системы. Трубы, изготовленные на данных агрегатах, имеют значительные по величине продольную и поперечную разностенности [3, 4].

Для стабилизации виброактивности механизм удержания стержня оправки на выходной стороне прошивного стана ТПА произведена модернизация, установкой системы подвижных центрователей.

Кинематическая схема реконструированного механизма удержания стержня оправки прошивного стана с боковой выдачей гильз приведена на рис. 2 [2].

Выходная сторона реконструированного прошивного стана (механизма удержания оправки) состоит из упорно-регулирующего механизма 1, длинноходового цилиндра 2 привода его перемещения, центрователей 3, размещенных в станинах стана, стержня 4 и оправки 5. Стержень с оправкой в течение всего процесса прокатки трубы удерживается между рабочими валками 6, опорными узлами (роликами) центрователей и прокатываемой трубой 7. Центрователи стержня оправки размещены на базовых направляющих стана и связаны

с приводом принудительного их перемещения 8 вдоль оси прокатки. Датчиками вибрации 9 фиксируются динамические процессы (колебания) в опорных механизмах центрователей. Далее посредством преобразователей 10 и следящей системы, блок управления 11 формирует управляющие сигналы командоаппарата 12. При этом по необходимости система управления в заданном режиме перемещает соответствующие центрователи 3 вдоль оси прошивки.

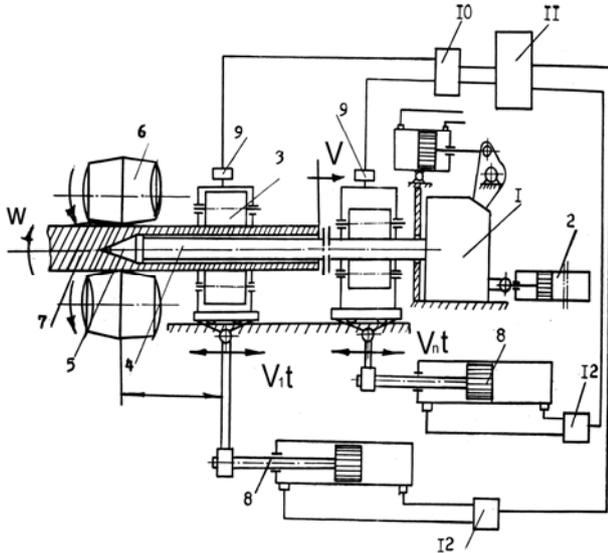


Рис. 2. Модернизированный механизм удержания стержня оправки стана винтовой прокатки труб с боковой выдачей гильз и подвижными центрователями

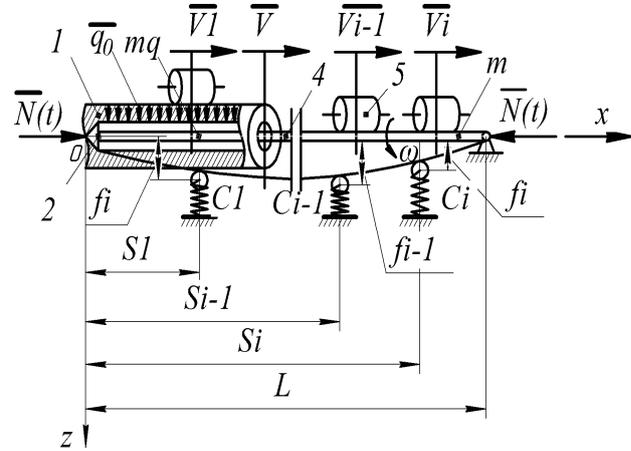


Рис. 3. Расчетная схема обобщенной динамической модели стержневой системы механизма удержания стержня оправки стана винтовой прокатки труб с подвижными центрователями

Поэтому исследование поведения динамической модели модернизированного механизма удержания стержня оправки «стержневая система – трубная заготовка» и «стержневая система – гильза» при переменных нагрузках, с учетом изменяющихся во времени инертности трубной заготовки и положения специальных опорных узлов подвижных центрователей представляется актуальным.

Целью данной работы является разработка уточненной динамической модели механизма удержания оправки стана винтовой прокатки труб.

Установим закономерности, характеризующие динамическое состояние стержневой системы с оправкой в течение всего процесса прошивки трубной заготовки или гильзы. Для решения данной задачи в данном приближении принято ряд допущений: труба перемещается по стержню с постоянной скоростью; стержневая система размещена исключительно на податливых опорах; труба и стержневая система вращаются совместно без скольжения; продольная нагрузка изменяется по гармоническому закону; инерция вращения системы имеет место.

Решение задачи о виброактивности стержневой системы в рассматриваемом приближении сводится к уточненной расчетной схеме, приведенной на рис. 3.

Колебания стержневой системы механизма удержания оправки под действием подвижной нагрузки (интенсивности воздействия прокатываемой трубы) описывается дифференциальным уравнением [4, 5, 6]

$$m \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + f \left(\frac{\partial^3 u_z}{\partial x^2 \partial t} - \omega \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \right) \right] + \kappa \frac{\partial u_y}{\partial t} + cu_z = m\omega^2 [e_1 \sin(\omega t) + e_2 \cos(\omega t)], \tag{1}$$

где EI , m – соответственно изгибная жесткость стержня и его погонная масса; u_z – перемещения вдоль оси z ; c , κ – коэффициенты упругого основания центрователей, зависящие от перемещения и скорости соответственно; f – коэффициент, учитывающий внутреннее трение в системе в процессе колебания стержня оправки; $e_1(\delta)$, $e_2(x)$ – эксцентриситеты, характеризующие неуравновешенность масс стержня оправки по оси прошивки.

В предположении того, что внутреннее трение в системе по сравнению с технологическими и динамическими нагрузками незначительно, и неуравновешенность масс механической системы лежит в одной плоскости $e_1(\delta) = e_2(x) = e(x)$, согласно [4, 5], приходим к упрощенному дифференциальному уравнению:

$$m \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 u_z}{\partial x^4} + cu_z = m \omega^2 e(x) \sin(\omega t), \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения стержня оправки вокруг оси прокатки.

Заменив упругое основание стержня оправки конечным числом i – податливых опор подвижных центрователей в виде $\sum_{i=1}^n c_i u_y \delta(x - (s_i \mp V_i t))$, дифференциальное уравнение (2) представим в виде:

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \sum_{i=1}^n c_i u \delta(x - (s_i \mp V_i t)) = m \omega^2 e(x) \sin(\omega t), \quad (3)$$

где $\delta(x - x_{oi})$ – дельта-функция Дирака.

Принимая во внимание, что функция Дирака, согласно [4, 7, 8] обладает следующим характерным фильтрующим свойством:

$$\int_a^b f(x) \delta(x - \xi) dx = f(\xi); \quad [a < \xi < b],$$

с учетом изменения продольной сжимающей силы (усилия прошивки), согласно [2] по закону $N(t) = N_o + N_1 \cos(\nu t)$ и надвигающейся нагрузки гильзы $\vec{q}(x, t)$ и параметров упругих опор (опор подвижных центрователей) $\sum_{i=1}^n c_i u_y \delta(x - (s_i \mp V_i t))$ дифференциальное уравнение (3) примет вид:

$$m \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 u_z}{\partial x^4} + N(t) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \sum_{i=1}^n c_i u_z \delta(x - (s_i \mp V_i t)) - q(x, t) = m \omega^2 e(x) \sin(\omega t), \quad (4)$$

где $q(x, t)$ – интенсивность воздействия прокатываемой гильзы, обладающая инертностью, которая может быть определена согласно теореме Кориолиса [5, 6] в виде:

$$q(x, t) = q_o - m_q \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2V \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right) \Bigg|_{x=Vt}, \quad (5)$$

где q_o , m_q – статическая интенсивность и погонная масса прокатываемой гильзы соответственно; V – скорость прошивки (перемещения) гильзы по стержню оправки;

S_i – проектные положения опорных узлов центрователей стержня оправки вдоль оси прокатки; V_i – скорость движения вдоль оси прокатки соответствующих центрователей стержня оправки; $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ – относительное ускорение гильзы; $V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ – переносное ускорение гильзы; $2V \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$ – кориолисово ускорение прокатываемой гильзы.

С учетом характерной геометрии изогнутого гибкого стержня (волнистая образующая) в процессе прокатки гильзы в принятом приближении принимаем, что уравнение эксцентриситета его оси соответствует синусоидальной форме:

$$e(x) = u_z = f(t) \sin\left(\frac{\pi x}{\ell}\right).$$

При этом для выполнения известной процедуры Бубнова-Галеркина, согласно [5, 6], оператор дифференциального уравнения (4) представим в виде:

$$L(u) = m \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 u_z}{\partial x^4} + N(t) \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \sum_{i=1}^n c_i u_z \delta(x - (s_i \mp V_i t)) - q(x, t) - m \omega^2 f(t) \sin\left(\frac{\pi x}{\ell}\right) \sin(\omega t). \quad (6)$$

Следовательно, применяя данную процедуру:

$$\int_0^{\ell} L(u) \sin\left(\frac{\pi x}{\ell}\right) dx = 0, \quad (7)$$

подставляя выражение (6) в (7), с учетом ортогональности форм собственных колебаний механической системы, интегрируя полученное, после преобразований окончательно имеем уравнение движения стержня оправки в виде:

$$\left[1 + \frac{m_q}{2\pi m} \left(2\pi \frac{Vt}{\ell} - \sin\left(2\pi \frac{Vt}{\ell}\right) \right) \right] \frac{d^2 f(t)}{dt^2} + \frac{Vm_q}{m\ell} \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{Vt}{\ell}\right) \right) \frac{df(t)}{dt} + \left[\frac{EI}{m} \left(\frac{\pi}{\ell}\right)^4 + \frac{2}{m\ell} \sum_{i=1}^n c_i \sin^2\left(\frac{\pi(s_i \mp V_i t)}{\ell}\right) - \frac{1}{m} (N_0 + N_1 \cos(vt)) \left(\frac{\pi}{\ell}\right)^2 - \frac{m_q}{m} \frac{V^2}{\ell^2} \right] \times \left[\pi \left(2\pi \frac{Vt}{\ell} - \sin\left(2\pi \frac{Vt}{\ell}\right) \right) - \omega^2 \sin(\omega t) \right] f(t) = \frac{2q_0}{m\pi} \left(1 - \cos\left(\pi \frac{Vt}{\ell}\right) \right). \quad (8)$$

Для удобства представления математической модели динамических процессов механической системы введем характерные безразмерные переменные в дифференциальное уравнение (8):

$$\xi = \frac{Vt}{\ell}, \quad \mu = \frac{m_q}{m}; \quad m\ell = M; \quad \frac{d^2 f}{d\xi^2} = \ddot{f}, \quad \xi \in [0; 1]. \quad (9)$$

Следовательно, после некоторых преобразований дифференциальное уравнение колебательного движения оси стержня оправки (8) с учетом (9) для уточненной динамической модели механической системы в безразмерной форме примет вид:

$$a_0(\xi) \ddot{\bar{f}} + {}_2 \dot{r} a(\xi) \dot{\bar{f}} + \Omega_0^2 \left(\frac{\ell}{V}\right)^2 [k(\xi) - b_0(\xi)] \bar{f} = \frac{2q_0}{m\pi} \left(\frac{\ell}{V}\right)^2 a_1(\xi), \quad (10)$$

где $a_0(\xi) = 1 + \frac{\mu}{2\pi} (2\pi\xi - \sin(2\pi\xi))$; $a(\xi) = 2\pi\xi - \sin(2\pi\xi)$;

$$a_1(\xi) = 1 - \cos(2\pi\xi); \quad b = 1 + \frac{2}{M\Omega_0^2} \sum_{i=1}^n c_i \sin^2\left(\frac{\pi(s_i \mp V_i t)}{\ell}\right) - \frac{N_0 \pi^2}{M \ell \Omega_0^2};$$

$$b_0(\xi) = \frac{\pi^2}{M \ell \Omega_0^2} N_1 \cos\left(v \frac{\ell}{V} \xi\right) + \frac{\mu}{\Omega_0^2} \left(\frac{V}{\ell}\right)^2 \pi^2 a(\xi) + \frac{\omega^2}{\Omega_0^2} \sin\left(\omega \frac{\ell}{V} \xi\right);$$

$$b_1(\xi) = \frac{\pi^2}{M \ell \Omega_0^2} N_1 \cos\left(v \frac{\ell}{V} \xi\right) + \frac{\omega^2}{\Omega_0^2} \sin\left(\omega \frac{\ell}{V} \xi\right) - \text{соответствующие коэффициенты сис-}$$

темы уравнений; $\Omega_0^2 = \frac{EI}{m} \left(\frac{\pi}{\ell}\right)^4$ – квадрат частоты свободных колебаний стержня оправки по первой форме колебаний механической системы.

Дифференциальное уравнение (10) в некотором приближении для первой формы колебаний системы описывает динамические явления в механизме удержания оправки стана винтовой прокатки труб ТПА. Полученная математическая модель описывает динамику стержневой системы в зависимости от взаимного расположения опорных механизмов в течение всего технологического процесса прошивки трубной заготовки или гильзы. Решение дифференциального уравнения (10) позволяет установить зависимости между параметрами динамической модели рассматриваемой механической системы и выработать рекомендации по стабилизации виброактивности механизма удержания оправки. Анализ результатов численного решения дифференциального уравнения (10) и динамические прогибы стержня оправки прошивного стана ТПА 140 до и после модернизации (рис. 4) показывают особенности формирования динамических процессов на станах винтовой прокатки труб с учетом реализации технологического процесса прошивки трубной заготовки.

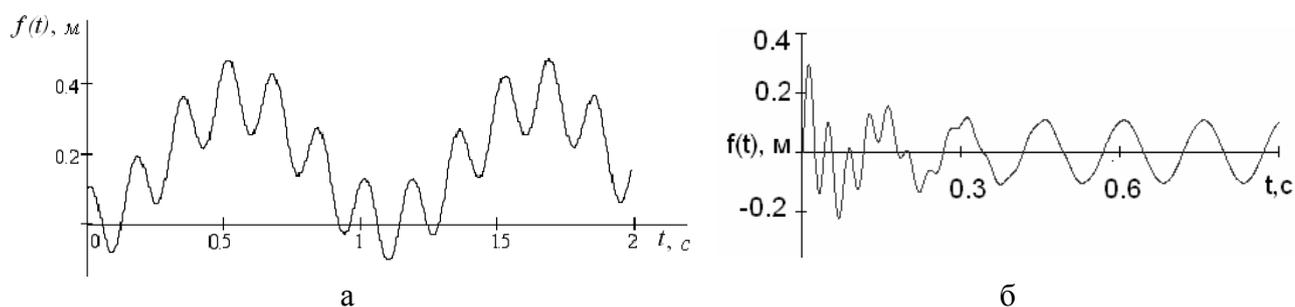


Рис. 4. Динамические прогибы изображающей точки стержня оправки прошивного стана ТПА 140 (а) – до и (б) после модернизации механизма удержания оправки (материал – сталь 20, заготовка диаметром 130 мм, гильза 126 × 29,5)

Отметим, что динамические процессы стержня механизма удержания оправки прошивного стана ТПА 140 носят параметрический характер и до модернизации механическая система ведет себя неустойчиво.

Реализацией математического эксперимента проводим оптимизацию виброактивности динамической системы и осуществляем выбор расположения опорных элементов центрователей стержня оправки вдоль оси прокатки. При этом путем моделирования процесса прошивки на этапе проектирования возможно реализация рационального технологического

процесса прокатки труб. В данном случае в рассматриваемой системе сводится к минимуму динамические нагрузки и стабилизируется виброактивность механизма удержания оправки в очаге деформации.

Использование данной математической модели и разработанных рекомендаций позволило обеспечить необходимые режимы функционирования системы удержания оправки и наметить пути активного управления колебаниями стержневой системы прошивных и раскатных станов.

Профиллограммы, снятые из темплет гильз после прошивных станов трубопрокатного агрегата ТПА 30-102, показывают, что наряду со снижением виброактивности стержневой системы достигнуто существенное снижение разностенности гильз и качества прокатываемых труб. Например: для готовых труб диаметром 102 мм со стенкой 6 мм при прошивке заготовок на стационарных центрователях величина разностенности достигает 14÷18 %. Использование результатов работы и технологии процесса прошивки заготовок на подвижных центрователях позволяет довести разностенность труб до 9÷10 %, что отвечает повышенным требованиям, предъявляемым к некоторым бесшовным трубам (ГОСТ 9940-81 и ГОСТ 8732-78).

ВЫВОДЫ

Разработана уточненная динамическая модель механизма удержания оправки стана винтовой прокатки труб. Составлена математическая модель виброактивности для рассматриваемой модернизированной механической системы с учетом подвижности и параметров жесткости опорных механизмов центрователей выходной стороны стана. Представлен анализ обобщенной и синтез развитой динамической моделей механизма удержания оправки стана винтовой прокатки труб.

Математическим моделированием процесса прошивки трубной заготовки и динамических явлений механизма удержания оправки установлены рекомендуемые режимы прошивки трубной заготовки с учетом прогнозируемых показателей качества прокатываемых труб и допустимой виброактивности стержня оправки стана.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Потапов И. Н. Новая технология винтовой прокатки / И. Н. Потапов, П. И. Полухин. – М. : Металлургия, 1975. – 344 с.*
2. *Технология трубного производства : учебник для вузов / В. Н. Данченко, А. П. Коликов, Б.А. Романцев, С. В. Самусев. – М. : Интермет – Инжиниринг, 2002. – 640 с.*
3. *Оклея Л. Н. Качество горячекатаных труб / Л. Н. Оклея. – М. : Металлургия, 1986. – 144 с.*
4. *Рахманов С. Р. Динамика стержневой системы механизма удержания оправки прошивного стана трубопрокатного агрегата / С. Р. Рахманов // Материалы Международной конференции «Современные направления производства сварных и бесшовных труб из черных и цветных металлов» : Днепропетровск, 2007. – С. 45–51.*
5. *Вибрации в технике. Справочник в 6-ти томах. Том 3 / Под ред. Ф. М. Диментберга, К. С. Колесникова. – М. : Машиностроение, 1980. – 544 с.*
6. *Кучма Т. К. Расчет пластин на подвижные нагрузки / Т. К. Кучма, А. Б. Моргаевский // Труды VII Всес. конф. по теории пластин и оболочек. – М. : Наука, 1970. – С. 346–350.*
7. *Новицкий В. В. Дельта-функция и ее применение в строительной механике. Расчет пространственных конструкций. Вып. УШ / В. В. Новицкий; под ред. А. А. Уманского. – М. : Гос. изд-во лит-ры по стр-ву, арх-ре и стр. мат-лам, 1962. – С. 207–244.*
8. *Справочник по специальным функциям / Под ред. М. А. Абрамовича. – М. : Наука, 1979. – 832 с.*

Рахманов С. Р. – канд. техн. наук НМетАУ;

Тополов В. Л. – зам. директора ДЗПТ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

ДЗПТ – Днепропетровский завод прецизионных труб, г. Днепропетровск.

E-mail: npfvostok@mail.ru