

Рахманов С. Р.

Национальная
металлургическая
академия
Украины

УДК 621.774.32/.38

КОЛЕБАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА ПРЕССА В ПРОЦЕССЕ ПРОШИВКИ ИЛИ ЭКСПАНДИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК

Приведены результаты исследования динамики иглы при прошивке или экспандирования на прошивном прессе в условиях интенсивного воздействия со стороны потока металла. Получены амплитудно – частотные характеристики иглы в режиме установившихся колебаний для выбранного спектра наиболее характерных параметров процесса прошивки или экспандирования с учетом технологических режимов производства труб.

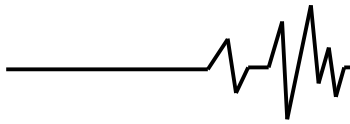
The results of research of dynamics of needle are resulted at sewing or ekspandirovaniya on a proshivnom press in the conditions of intensive influence from the side of stream of metal. Got peak are frequency descriptions of needle in the mode of the set vibrations for the chosen spectrum of the most characteristic parameters of process of sewing or ekspandirovaniya taking into account the technological modes of production of pipes.

Введение. Процесс производства горячекатаных бесшовных труб на прошивном прессе трубопрессовой установки, согласно требованиям технологии, предусматривает прошивку отверстий в сплошной трубной заготовке иглой или последующее расширение полости в предварительно сверленной заготовке экспандером, упирающимся на оправку (стержневую систему) [1, 2, 3]. Широкое использование процессов прошивки заготовок или экспандирования гильз труб при различных технологических схемах производства труб, наряду с положительными аспектами, имеют некоторые характерные недостатки, которые ограничивают область их применения. Среди них, преимущественно, выделяются высокая разностенность получаемых гильз, вызванная виброактивностью иглы в очаге деформации, обусловленная динамическими условиями формирования процесса прошивки или экспандирования. Формирование нестабильного очага деформации, при этом, в основном, вызвано несовершенством

технологических режимов и параметров очага деформации. Следовательно, устранение указанных недостатков возможно путем выбора оптимальных параметров очага деформации и обеспечением рациональных режимов технологического процесса прошивки заготовки или экспандирования гильз.

Постановка задачи. При реализации соответствующих процессов прошивки заготовок или экспандирования гильз в существующем технологическом цикле производства труб, возникающие в игле значительные по величине и изменяющиеся во времени усилия и температурные нагрузки, обуславливают отклонение формы иглы от прямолинейной [4, 5, 6]. При этом возникают значительные динамические температурные нагрузки. Это приводит к уходу иглы или экспандера от геометрической оси очага деформации и, следовательно, к нежелательным изменениям размеров готовых труб (рис. 1).

Возможности выработки однозначных



обобщающих рекомендаций по выбору оптимальных параметров процесса прошивки заготовок или экспандирования гильз во многом связаны с формированием динамической модели задачи возможно, несколько в нетрадиционной постановке. Динамические процессы во многом обусловлены особенностями технологического процесса, реальными условиями функционирования очага деформации и технологическими режимами производства гильз.

Для установления действительных причин возникновения колебательных процессов иглы (оправки) в очаге деформации воспользуемся динамической моделью

процессов прошивки заготовок или экспандирования гильз. Для моделирования этих процессов и учета реальных граничных и физических условий воспользуемся основами механики деформируемого тела в интерпретации классических задач динамики. Исходя из условия прошивки круглых заготовок или их экспандирования рассматриваем осесимметричное течение металла в стесненном очаге деформации. Следует отметить, что динамический процесс обтекания иглы потоком металла обуславливает значительные колебания иглы. Очевидно, с учетом вышеизложенного, принята во внимание расчетная схема, которая приведена на рис. 3.

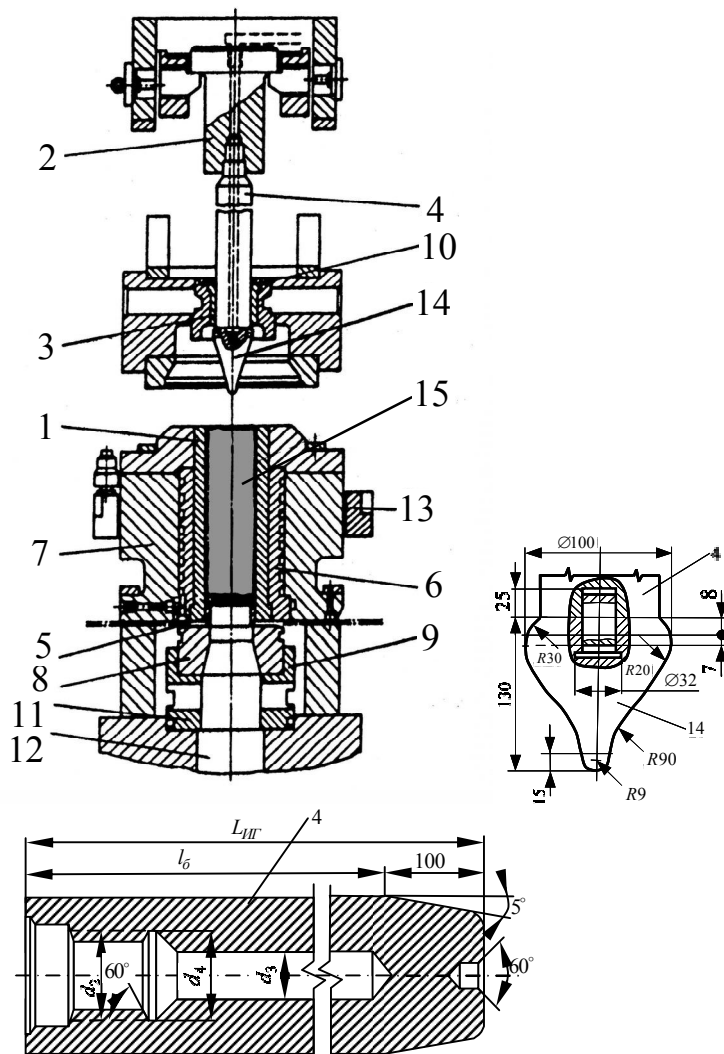
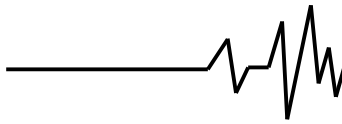


Рис. 1. Схема расположения технологического инструмента на вертикальном прошивном прессе



Метод решения задачи. Отметим, что параметрические колебания в тяжело нагруженной динамической системе прошивного пресса могут иметь место при неравномерном циклическом нагреве со стороны металла или переменной жесткости системы. Исключая условия ползучести системы при высоких температурах, необходимо учитывать, что игла в ходе выполнения технологического процесса прошивки или экспандирования интенсивно охлаждается, игла нагружена продольными составляющими усилия прошивки и одновременно подвержена воздействию высокой подвижной температурной нагрузки. Следовательно, в результате неравномерного нагрева со стороны металла, в игле возникают сжимающие и уравнивающие их растягивающие циклические температурные нагрузки. Прошиваемая заготовка обуславливает подвижные температурные и

переменные динамические нагрузки, что является основной причиной потери устойчивости самой иглы или иглы с экспандером в пределах упругости механической системы (рис.2).

Динамика и параметрическая термоустойчивость аналогичных стержневых систем мало изучены. По данному вопросу известно лишь ограниченное количество работ [7, 8, 9], где изложены общие вопросы динамики и термоустойчивости механических систем.

Как показывают опыт эксплуатации и экспериментальные исследования прошивного пресса 12 МН трубопрессовой установки 31.5 МН [4], знакопеременные температуры непосредственно обусловлены условиями функционирования иглы по ходу технологического процесса прошивки или экспандирования заготовки.

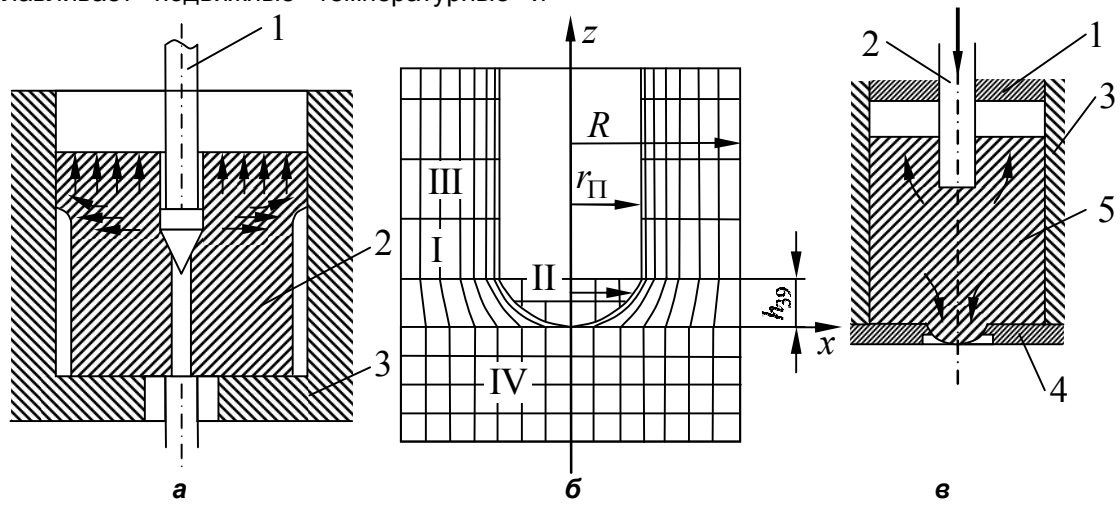


Рис. 2. Характерные схемы взаимодействия металла с технологическим инструментом при прошивке заготовки или экспандирования гильзы

Полученные результаты показывают, что параметрические колебания иглы (оправки) преимущественно вызваны условиями возникновения циклического знакопеременного нагрева.

При прошивке или экспандирования вследствие движения нагретая заготовка или гильза, перемещаясь по поверхности иглы со скоростью V , создает тепловую нагрузку определенной структуры.

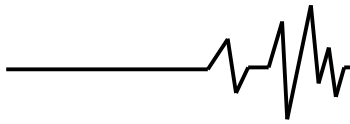
Температурное поле гильзы на прошивном прессе, например трубопрессовой установки 31.5 МН, при производстве труб $\varnothing 168 \times 10$ из стали 12Х18Н10Т, носит явно гармонический характер при соответствующих номинальном и амплитудном значениях температур $T_0=1190^\circ\text{C}$ и $T_1=115^\circ\text{C}$. Подвижные температурные нагрузки прошиваемой

заготовки с достаточной точностью аппроксимируемы по закону $T(t) = T_0 + T_1 \cos(\omega t)$.

Величина температурной нагрузки, формируемая прошиваемым металлом или экспандируемой гильзой, определяется из выражения согласно [7, 9]

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

где T_0 – номинальная температура на оси иглы; T_1 – амплитудное значение температуры заготовки; $E(T)$ – модуль упругости материала иглы; $\alpha(T)$ – коэффициент линейного расширения материала иглы.



Исследования динамических процессов прошивки заготовки или экспандирования гильзы, в выбранной постановке задачи и динамической модели, рассматриваем колебания иглы под воздействием обтекающего потока металла.

Для исследования параметрических колебаний иглы с учетом воздействия осесимметричного подвижного температурного поля прошиваемой заготовки, в рамках

принятой расчетной схемы (рис.3), воспользуемся дифференциальным уравнением поперечных колебаний стержня, согласно [8, 10]:

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

где $q(x,t,T)$ – интенсивность нагружения иглы в процессе прошивки или экспандирования.

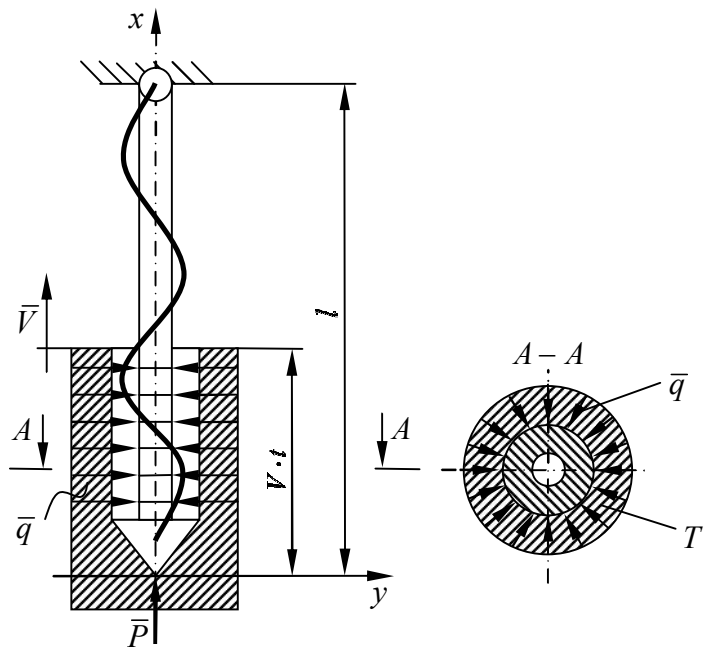


Рис. 3. Расчетная схема процесса прошивки заготовки или экспандирования гильзы

Особенности устойчивого технологического процесса прошивки заготовок или экспандирования гильз для производства бесшовных труб определяются интенсивностью нагружения со стороны очага деформации и инерцией стержня оправки. Следовательно, в известной постановке задач динамики деформируемого тела [10], интенсивность нагружения стержня имеет вид

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

где EI – изгибная жесткость иглы; $y(x,t)$ – динамические прогибы иглы; P – осевая составляющая усилия прошивки или экспандирования; $P(t,T) = P + N_x(T,t)$ – суммарная осевая сила, действующая на иглу; m_0 – погонная масса иглы; q_0 – интенсивность нагружки заготовки или гильзы в процессе прошивки или экспандирования; $N_x(T,t)$ –

температурная составляющая осевой нагрузки. Для решения поставленной задачи уравнение (2) с учетом (3) перепишем в виде:

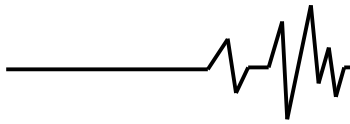
$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + m_0 \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = [q_0 - P(t,\dot{\theta}) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}] \Big|_0^{Vt}, \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения представим в форме разложения в ряд Фурье по фундаментальным функциям задачи [7, 10].

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

где $f_k(t)$ – искомая функция времени, подлежащая определению из решения задачи; l – длина иглы.

Подставляя (5) в дифференциальное уравнение (4) для «k» – 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 [10]

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

уравнение (6) представим следующим образом:

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

Учитывая свойства ортогональности фундаментальных функций задачи

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

уравнение (7) для нестационарных условий процесса прошивки или экспандирования с учетом определенных преобразований имеет следующий интегральный вид:

$$\begin{aligned} \ddot{f}_k(t) + \left\{ \frac{k^4 \pi^4}{l^4} \frac{EI}{m_0} - \frac{k^2 \pi^2}{l^2} \left[P + \int_0^{T(t)} \int_0^{Vt} \alpha(T) E(T) dT dx \right] \right\} f_k(t) = \\ = \frac{2q_0}{k\pi m_0} \left[1 - \cos\left(\frac{k\pi Vt}{l}\right) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

После соответствующих подстановок в (8) по процедуре имеем:

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

Перегруппируя выражение (9) после соответствующих преобразований колебания иглы во время нестационарного процесса прошивки или экспандирования окончательно представляем в виде:

$$\begin{aligned} \ddot{f}_k(t) + \frac{k^2 \pi^2}{l^4} \left\{ \frac{k^2 \pi^2}{l^2} \frac{EI}{m_0} - P + \int_0^T \int_0^{Vt} \alpha(T) E(T) dT dx \right\} f_k(t) = \\ = \frac{lq_0}{k\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{k\pi Vt}{l}\right) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Для удобства анализа параметрических колебаний и оценки динамического состояния иглы, для квазистационарного процесса прошивки или экспандирования, уравнение (10) представим в виде известного уравнения Маттье-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 $F_k(t) = \frac{lq_0}{k\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{\hat{e}\pi Vt}{l}\right) \right]$ – параметр

правой части уравнения(10)

Для оценки уровня виброактивности системы и параметрических колебаний иглы необходимо уравнение (11) эквивалентно представить стандартной форме уравнения

Маттье-Хилла:

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

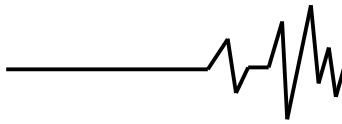
где $\varphi_k(t) = \cos(\omega t)$ – функция, характеризующая изменение параметров термонагруженной иглы прошивки или иглы с экспандером;

$$\Omega = \omega_k \sqrt{1 - \frac{P_0}{P_E}}; \quad \omega_k = \left(\frac{k\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m_0}} \quad -$$

частота колебаний иглы;

$$\mu_k = \frac{P1}{2(P_E - P_0)} \quad - \text{коэффициент возбуждения}$$

иглы или иглы с экспандером.



Для решения уравнения Матье-Хилла (12) с выбранными краевыми и начальными условиями воспользуемся методом Рунге-Кутта с последующим применением современных компьютерных технологий. Для получения достоверной картины и спектра амплитудно-частотных характеристик колебаний иглы варьируем безразмерными параметрами системы в установленных пределах.

При установившемся режиме работы стана динамическое состояние иглы или оправки с экспандером в потоке металла определяется изменением по всей рабочей длине иглы амплитуд возмущений и частоты колебаний системы. Затухание возмущений иглы в процессе прошивки заготовки или экспандирования гильзы, вызваны периодическими смещениями точки в направлении движения потока металла. Отметим, что они гораздо слабее по сравнению с возмущениями, вызванными силой, приложенной к концу иглы. Увеличение отношения скорости прошивки к длине иглы приводит к затуханию виброактивности, вызванной периодическими возмущениями (смещениями) коренной точки иглы в направлении потока металла и более сильному подавлению возмущений, вызванных приложенной к концевому участку крепления иглы или иглы с экспандером периодической силой в противоположном направлении. Характерные изменения по длине иглы амплитуд возмущений, вызванных периодическими смещениями коренной точек иглы, и приложенной к игле периодической силой, для определенных параметров системы и режимов прошивки или экспандирования приведены на рис. 4 и рис. 5.

Кривые, приведенные на рис. 4 и рис. 5 отображают характерные условия возникновения параметрических колебаний иглы под действием подвижной температурной нагрузки в процессе экспандирования заготовки. Очевидно, для прошивного пресса, в условиях неравномерного нагрева и механического воздействия со стороны прошиваемого металла или экспандируемой гильзы в осевом направлении, параметрические колебания стержня имеют сложную форму. Анализ виброактивности системы показывает, что при увеличении скорости прошивки с 0,2 м/с до 0,25 м/с заметен определенный рост амплитуд колебаний иглы.

Для оценки параметрической устойчивости стержневой системы в рамках постановки задачи и полученной динамической

модели системы удобно воспользоваться диаграммой динамической устойчивости Айнса – Стретта согласно [10] (рис. 6).

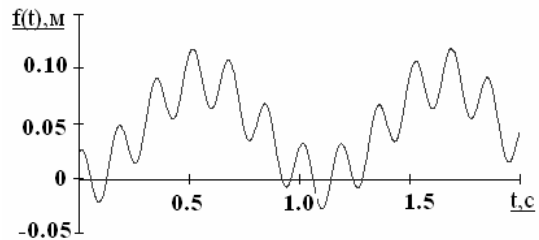


Рис. 4. Колебания оправки с экспандером прошивного пресса 12 МН трубопрессовой установки 31.5 МН ($T=1180^{\circ}\text{C}$, сталь 08Х18Н10Т, $\varnothing 230$, $V=0.25\text{ м/с}$)

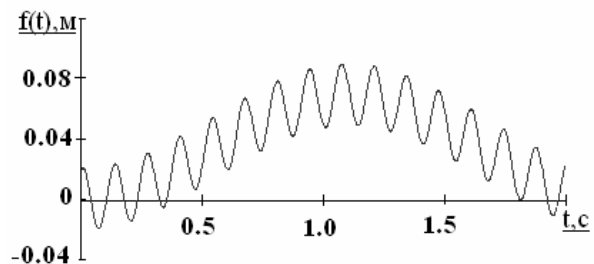


Рис. 5. Колебания оправки с экспандером прошивного пресса 12 МН трубопрессовой установки 31.5 МН ($T=1210^{\circ}\text{C}$, сталь 12Х18Н10Т, $\varnothing 250$, $V=0.2\text{ м/с}$)

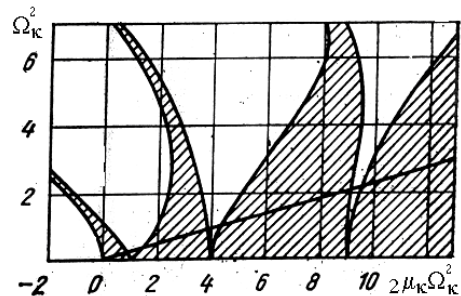
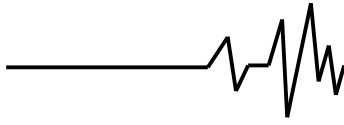


Рис. 6. Обобщенная диаграмма Айнса – Стретта областей параметрической устойчивости функционирования иглы прошивного пресса

Достоверность полученных результатов и правильность функционирования системы при параметрических колебаниях иглы проверялась с помощью тестовых расчетов для случаев, когда экспериментальное решение задачи известно [2, 7, 10]. Заштрихованная часть диаграммы представляет области параметрической устойчивости функционирования иглы прошивного пресса.

Соответствие математической модели колебаний иглы или иглы с экспандером поведению системы в обтекающем потоке металла проверялась путем выбора шага итерационного процесса для выбранного метода Рунге – Кутта. Численное решение



задачи позволяет определить мгновенные конфигурации линии оси иглы, а также временные зависимости (динамические прогнозы) различных ее сечений. Анализ зависимостей динамических смещений различных изображающих точек иглы во времени отчетливо показывает воздействие возмущений, приложенных к игле по ходу прессования труб. Внешние возмущения иглы определяются периодическим смещением ее точек и вызваны приложенной к концу иглы усилием прошивки или экспандирования и подвижной температурной нагрузкой трубы. Это взаимодействие проявляется в виде взаимного модулирования амплитудно – частотных характеристик колебаний иглы или иглы с экспандером.

Результаты промышленного испытания прошивного пресса 12 МН трубопрессовой установки 31.5 МН в условиях реализации рационального технологического процесса, например, при прошивке или экспандирования заготовок $\varnothing 250$ из нержавеющей стали 12X18H10T, подтверждают правомерность выдвинутых теоретических предположений и соответствие выбранной математической модели реальным процессам прошивки или экспандирования. При этом, путем снижения продольной и поперечной разностенности, достигнуто существенное увеличение качества производимых бесшовных труб.

Выводы

1. Разработана математическая модель динамических процессов, позволяющая определить некоторые основные условия возникновения параметрических колебаний иглы прошивного пресса.

2. Для принятой расчетной схемы и динамической модели квазистационарного процесса прошивки или экспандирования получено дифференциальное уравнение колебаний иглы в однородном обтекающем потоке металла.

3. Для решения дифференциального уравнения колебаний иглы с выбранными краевыми и начальными условиями применен метод Рунге–Кутта с использованием современных компьютерных технологий.

4. Численным решением задачи определены мгновенные конфигурации оси иглы, а также временные зависимости (динамические прогнозы) различных ее сечений. Установлены изменения амплитуд возмущений по длине иглы, вызванные периодическими смещениями коренной точки и приложенных к игле сил, для определенных параметров динамической системы и режимов прошивки.

5. Путем математического моделирования процессов прошивки заготовок или экспандирования гильз намечены направления интенсификации технологического процесса на прошивном прессе.

6. Выявлено, что увеличение отношения скорости прошивки или экспандирования к длине иглы приводит к уменьшению затухания возмущений, вызванных периодическими возмущениями со стороны прошиваемого металла или гильзы.

7. Значительное повышение динамической устойчивости системы и тем самым улучшение качества прокатываемых труб достигается использованием существующей системы охлаждения стержня (иглы) и выбором рациональных параметров процессов прошивки или экспандирования на соответствующих этапах проектирования или реализации технологических процессов.

Литература

1. Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин В.Г. Горячая прокатка и прессование труб. – М.: Металлургия, 1972.–576 с.

2. Медведев М.И., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А. Совершенствование процесса прессования труб. – М.: Металлургия, 1986. – 151 с.

3. Перлин И.Л. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1964. – 344 с.

4. Гуляев Г.И., Притоманов А.Е., Дробич О.П. и др. Прессование стальных труб и профилей. – М.: Металлургия, 1973.– 192 с.

5. 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 с.

6. Коликов А.П., Полухин П.И., Крупин А.В. и др. Новые процессы деформации металлов и сплавов. – М.: Высшая школа, 1986. – 351 с.

7. Безухов Н.И., Бажанов В.Л., Гольденблатт И.И., Николаенко Н.А., Синюков А.М. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур, М., Машиностроение, 1965. - 340 с.

8. Николаенко Н.А. Введение в термоупругость, Киев, Наукова думка, 1965. – 470 с.

9. Гохфельд Д.А. Несущая способность конструкций в условиях теплосмен. М., Машиностроение, 1970. – 475 с.

10. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. Гостехиздат, 1956. – 694 с.