

УДК 621.744.35

В.Н. Данченко, д.т.н., проф., О.Г. Гоман, д.ф.-м.н., проф., С.Р. Рахманов
Национальная металлургическая академия, г. Днепропетровск

ВИБРАЦИОННАЯ ПРОШИВКА ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ НА ПРОШИВНОМ ПРЕССЕ ТРУБОПРЕССОВОЙ УСТАНОВКИ

Получена динамическая модель волновых процессов в очаге деформации прошивного пресса, состоящая из пластической области и области с трещинообразованием. Математическим моделированием волновых процессов в металле установлены особенности реализации технологии вибрационной прошивки трубной заготовки на прошивном прессе

The dynamic model of wave processes in the deformation centre of piercing process has been received. The model consists of plastic strain area and fissure formation area. Characteristics of implementation of a hollow billet vibration piercing on the piercing press were determined by means of mathematical modeling of wave processes in metal

Повышение эффективности процессов прошивки (экспандирования) трубной заготовки путем применения высокочастотных вибраций создает определенные возможности для расширения технологичности эксплуатируемого прессового оборудования. Разработка новых, высокоэффективных технологий производства труб выдвигает ряд актуальных задач. Весьма перспективным направлением интенсификации режимов деформации при прошивке трубных заготовок является использование высокочастотных ультразвуковых колебаний или механических вибраций. Применение передовых вибрационных технологий при производстве бесшовных труб требует нового подхода к задаче вибрационной прошивки, что, в свою очередь, связано с отработкой режимов деформации, прогнозированием показателей стойкости технологического инструмента, оптимизацией качества бесшовных труб и повышением надежности функционирования оборудования [1, 2].

Современные технологические процессы прошивки или экспандирования трубных заготовок из малопластичных и труднодеформируемых металлов на прошивных прессах трубопрессовых установок, с применением высокочастотных вибраций, выдвигают ряд актуальных вопросов по совершенствованию как технологии производства труб, так и модернизации технологического оборудования [3, 4].

Совершенствование существующих и разработка современных вибрационных технологий производства бесшовных труб требует кардинально нового подхода к задаче оптимизации качества выпускаемой продукции. Последнее непосредственно связано с отработкой рациональных режимов деформации и прогнозированием показателей стойкости технологического инструмента, надежности функционирования прессового оборудования для реализации самих высокочастотных вибраций [5](рис. 1).

Технологические процессы прошивки трубных заготовок или экспандирования гильз в случае модернизации прессового оборудования предусматривают применение управляемых высокочастотных вибраций. Однако, в силу недостаточной изученности эти процессы не находят широкого применения в практике производства бесшовных труб. В частности, задачи по повышению эффективности процессов прошивки или экспандирования трубной заготовки на прошивном прессе, в условиях применения высокочастотных вибраций, решаются без должного исследования и, как правило, экспериментально.

Выполнение операций прошивки трубной заготовки на прошивном прессе сопровождается значительными потерями рабочего усилия на преодоление сил сопротивления, характерного для процесса неравномерности деформаций по всему объему обрабатываемого металла. Наиболее благоприятные условия деформации прошиваемого металла достигаются в условиях использования высокочастотных вибраций, что получило свое отражение в ряде фундаментальных исследований как в теоретическом плане, так и экспериментального характера.

Для обоснования и принятия решений по ведению вибрационной прошивки трубной заготовки в активном, управляемом режиме остановимся на некоторых важных моментах известных процессов пластической деформации металлов, моделировании возникающего волнового процесса, в условиях применения высокочастотных активных вибраций.

Остановимся на некоторых наиболее важных моментах технологического процесса вибрационной прошивки. Процесс прошивки трубной заготовки или экспандирования предварительно сверленных гильз на прошивных прессах производится следующим образом: предварительно нагретая заготовка 2 для прошивки поступает в контейнер 3, имеющий температуру 380 – 420°C. Игла (оправка) 4 принудительно, посредством вибрируемого высокочастотным вибратором 1 стержня 1 внедряется в заготовку 2. При дальнейшем движении вибрируемой оправки 4 вдоль оси прошивки металл 2 уплотняется и занимает ограниченный объем пространства контейнера 3. Следует принимать во внимание то, что при этом в процессе вибрационной прошивки или экспандирования трубной заготовки в очаге деформации в поперечном направлении возникают волновые процессы, которые сопровождаются большими динамическими нагрузками, действующими на металл и технологические инструменты (рис.2) [5, 6].

Определение некоторых скрытых возможностей существующих технологий и разработка новой технологии вибрационной прошивки трубных заготовок требует создания новых математических моделей данных процессов, адекватно отражающих условия реализации процесса прошивки или экспандирования гильз на современных прошивных прессах, схема которого приведена на рис. 1.

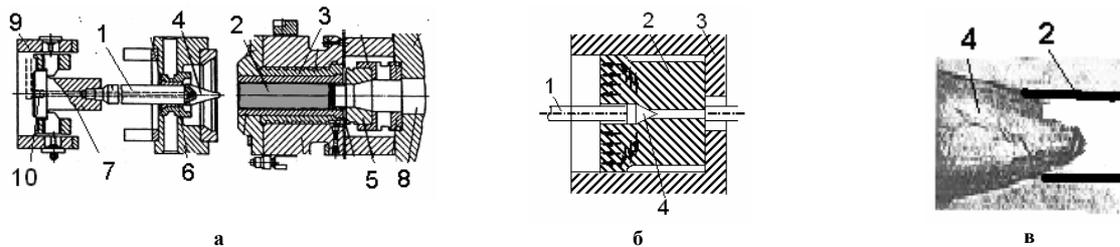


Рис. 1. Схема расположения технологического инструмента на прошивном прессе 12 МН: а – прошивной пресс; б – процесс экспандирования заготовки; в – мгновенный очаг деформации в процессе прошивки; 1 – стержень иглы; 2 – трубная заготовка; 3 – контейнер; 4 – игла (оправка) или экспандер; 5 – опорное кольцо; 6 – направляющая стержня иглы; 7 – иглодержатель; 8 – станина пресса; 9 – траверса; 10 – место расположения установка для высокочастотной вибрационной прошивки

Разработка новых вибрационных технологических процессов производства труб на современных гидравлических прошивных прессах требует создания корректных математических моделей процессов, адекватно отражающих необходимые условия реализации вибрационной прошивки трубных заготовок или экспандирования предварительно сверленых гильз.

В основу разработки ряда математических моделей и создания механизмов для вибрационного нагружения металла положены теоретические и экспериментальные разработки В.Н. Потураева, В.М. Клименко, М.Г. Цейтлина, А.М. Онищенко, В.Н. Шаповала и других авторов, анализ этих разработок обобщен и наиболее полно представлен в работе [2]. Большинство исследователей подтверждает тот факт, что применение высокочастотных вибраций при обработке металлов давлением приводит к уменьшению предела текучести материала и, как следствие, к значительному снижению энергосиловых параметров очага деформации. Полученные результаты указывают на важную роль фактора формирования рациональной объемной деформации металла и уменьшения внешних контактных и внутренних сил трения. Отметим, что результатами ряда исследований, приведенных в работе [2], установлена некоторая зависимость усилия прессования от частоты колебаний при вибрационном прессовании. При этом выявлено, что для достижения чисто вибрационного режима деформирования заготовки необходимо установление зависимости между частотой, амплитудой и кинематическими параметрами процесса. Следовательно, амплитудно-частотная характеристика базовых технологических инструментов (оправки, иглы), оказывает существенное влияние на эффективность процесса, поскольку формирует вибрационное деформирование заготовки в процессе прошивки.

Отметим, что, в случае необходимости модернизации прошивного пресса 16 МН высокочастотные механические или ультразвуковые колебания от вибровозбудителя 7 непосредственно следует подвести к оправке 6 через стержень иглодержателя 2 (рис. 2).

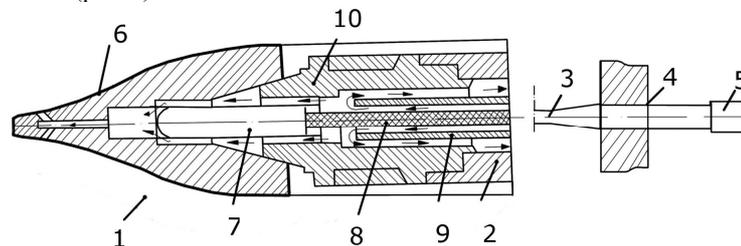


Рис. 2. Схема подвода высокочастотных колебаний к оправке прошивного пресса:

1 – гильза; 2 – стержень оправки (иглодержателя); 3 – концентратор энергии вибрации; 4 – устройство для крепления системы к прессу; 5 – преобразователь высокочастотных колебаний; 6 – оправка; 7 – вибровозбудитель; 8 – гибкий вал; 9 – трубка системы охлаждения оправки и иглы; 10 – мундштук оправки

При этом, рассмотрим нетрадиционную постановку и решение задачи о прошивке предварительно нагретой трубной заготовки вибрируемой оправкой 6, выполненной в виде тела вращения, движущейся с определенной скоростью в металле 1. Оправка, используемая в качестве технологического инструмента прошивного пресса, представляет собой осесимметричное абсолютно твердое тело с заостренным наконечником. В ходе выполнения технологической операции высокочастотной вибрационной прошивки, вибрируемая оправка 6 внедряется в металл 1 (однородную среду), занимающую некоторое полупространство $x \leq 0$, нормально к его свободной поверхности $x = 0$. Возмущенное движение прошиваемого металла, вызванное вибрируемой оправкой, в процессе прошивки, в радиальном направлении, предполагаем строго осесимметричным.

Выбираем следующую расчетную схему процесса прошивки трубной заготовки: используем цилиндрическую систему координат с началом в точке соприкосновения оправки с прошиваемой заготовкой; время прошивки отсчитываем от момента соприкосновения оправки с металлом, причем ось X направляем вдоль оси прошиваемой заготовки (рис. 4).

Решение задачи волнового движения металла в процессе прошивки, основанное, на использовании строгих нелинейных дифференциальных уравнений, в силу больших деформаций, в настоящее время, из-за недостаточного развития математического аппарата, является затруднительным. Поэтому, на данной стадии исследования, наиболее приемлемы методы, которые позволяют получить уточненное решение задачи в аналитической форме. Очевидно, также, что данные методы хотя и обладают определенной погрешностью, но, в основном, охватывают физическую суть явлений, происходящих в процессе прошивки цилиндрических заготовок в гильзы заданных размеров.

Пусть $H(t)$ – есть глубина внедрения оправки в металл в момент времени t . Если уравнение образующей поверхности оправки задано в виде $r = f(x), (x \geq 0)$, то положение оправки в выбранной цилиндрической системе координат в момент времени $t \geq 0$ определяется $r = f[x + H(t)]$.

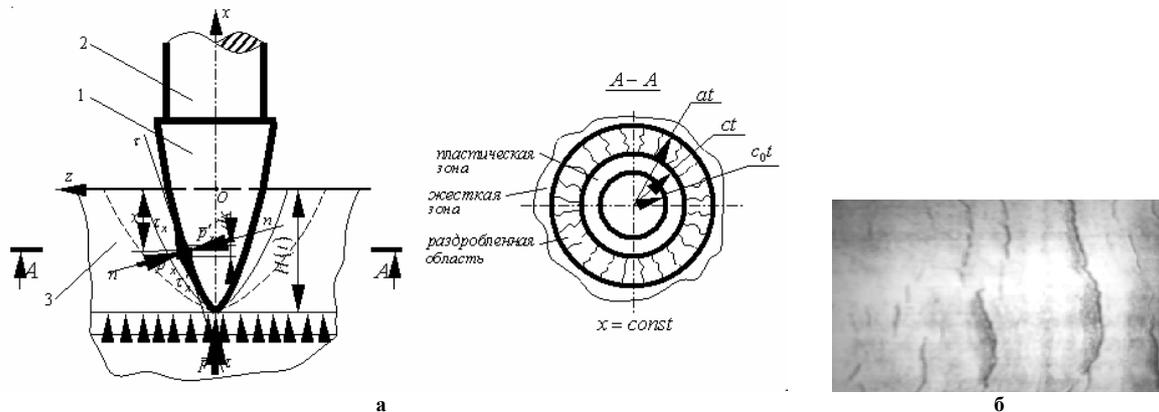


Рис.4. Расчетная схема динамических процессов прошивки на прессе и трубная заготовка с характерной зоной трещинообразования: 1 – оправка; 2 – стержень оправки; 3 – трубная заготовка.
а – расчетная схема процесса прошивки трубной заготовки на прошивном прессе;
б – тимплет трубной заготовки с зоной трещинообразования

В некоторой фиксированной плоскости $x = const$ сечение движущейся оправки в каждый момент времени представляет собой окружность переменного радиуса $r_0(t) = f[t + H(t)]$, изменяющуюся в радиальном направлении со скоростью

$$c_0(t) = \dot{r}_0(t) = \frac{d}{dt} f(x + H(t)) = f'(x + H(t))u_0(t), \quad (1)$$

где $u_0(t) = \dot{H}(t)$ – скорость прошивки; $f'(x + H(t))$ – тангенс угла наклона образующей оправки к оси X на некоторой заданной глубине прошивки $x = const$.

Если оправка, удерживаемая стержнем, выполнена в виде эквивалентного конуса с углом полураствора θ_s , то $f(x) = x \operatorname{tg} \theta_s$, и скорость расширения поперечного сечения оправки в плоскости $x = const$ будет равна $c_0(t) = u_0(t) \operatorname{tg} \theta_s$.

Принимаем во внимание то, что технологический процесс прошивки заготовки на прессе ведется в установившемся режиме с постоянной скоростью. Поэтому, можно в первом приближении считать, что $u_0(t) = u_0 = const$. При этом, каждое поперечное сечение оправки при ее перемещении расширяется с постоянной скоростью $c_0 = u_0 \operatorname{tg} \theta_s = const$, что дает основание движение металла рассматривать как автомодельное.

Подход к решению задачи вибрационной прошивки состоит в следующем: считается, что каждый слой металла в некоторой фиксированной плоскости $x = const$, движется независимо от других слоев, причем, движение начинается с того момента времени, когда наконечник оправки достигает данной плоскости. При этом, исходная задача сводится к задаче о расширении цилиндрической каверны в сплошной среде (заготовке). Данная задача представляет собой задачу о распространении одномерных радиальных волн в слое, перпендикулярном направлению движения оправки в процессе прошивки металла. Таким образом, можно сказать, что предлагаемый подход к решению задачи основывается исключительно на методе плоских сечений, что позволяет развить теоретические положения процессов прошивки заготовки технологическим инструментом (оправкой).

Результаты ряда экспериментальных исследований [2, 6] указывают на необходимость поэтапного исследования деформированного состояния прошиваемого металла в стесненном очаге деформации между технологическими инструментами. Напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации показывает, что при существующих скоростях прошивки в цилиндрической заготовке (металле), кроме зоны упругого состояния, преимущественно, возникает зона пластического состояния, а в некоторых случаях, и зона разрушения металла. Поэтому, первоначально, рассмотрим отдельно указанные зоны и дадим решение динамической задачи для каждой из них. Пластическая область очага деформации расположена в зоне непосредственного контакта металла с оправкой. В рамках рассматриваемой задачи и выбранной динамической модели процесса в каждом сечении $x = const$ данная зона представляет собой концентрическую область, ограниченную окружностью радиусом (поперечное сечение оправки) $r_0(t)$, которая расширяется со скоростью $c_0(t)$, и окружностью некоторого радиуса $R(t)$, которая определяет границу пластической области со стороны внешней зоны и расширяется с неизвестной заранее скоростью $c = \dot{R}(t)$.

Область, примыкающая к пластической зоне по окружности $r = R(t)$, как будет показано в дальнейшем, может рассматриваться как область, подверженная, в некоторых случаях, определенному виду трещинообразного разрушения.

В выбранной цилиндрической системе координат законы сохранения массы и количества движения для радиального перемещения металла в рассматриваемом слое очага деформации $x = const$ имеют вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial r} = -\rho \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = -\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где $\rho(r, t)$ – плотность металла; $v(r, t)$ – радиальная скорость частиц металла (положительная в сторону возрастания размеров оправки); σ_r, σ_θ – соответственно радиальная и окружная компоненты напряжения (положительные при сжатии).

Уравнения (2) и (3) пригодны как для пластической зоны, так и для упругой зоны. Пластичность металла (рабочей среды), при рассматриваемом подходе, наиболее удобно описывать критерием текучести по Треску, который в нашем случае имеет вид

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \tau_0, \quad (4)$$

где $\tau_0 = const$ – предел текучести прошиваемого металла.

Кроме того, необходимо отметить, что относительное изменение объема, как известно из [7, 8], является упругой деформацией, которая обычно в теории пластичности считается пропорциональной давлению

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_x).$$

Итак, предполагаем, что между гидростатическим давлением p и изменением объема очага деформации существует линейная зависимость, которую представим в виде

$$p = K \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right), \quad (5)$$

где ρ_0, ρ – соответственно начальная и текущая плотность прошиваемого металла;

K – объемный модуль упругости прошиваемого материала.

Система четырех уравнений (2), (3), (4) и (5) не является замкнутой, так как содержит пять неизвестных функций: $v, \rho, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_x$.

Классическая теория пластичности при рассмотрении движений металла с цилиндрической симметрией использует различные гипотезы и предположения относительно взаимосвязи напряжения σ_x с другими компонентами полного напряжения и деформаций. Одним из таких предположений в теории пластичности является предположение о линейности связи между девиатором тензора напряжений и девиатором тензора деформаций. Совместно с условием об отсутствии осевой деформации указанное предположение приводит к следующей связи между напряжениями

$$\sigma_x = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) - G\varepsilon, \quad (6)$$

где ε – объемная деформация материала.

Поскольку ε величина достаточно малая, то в уравнении (6) часто пренебрегают последним членом, в результате чего получаем $\sigma_x = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta)$, что рекомендуется Хиллом в работе [7]. Результаты исследования [8] говорят о том, что вместо условия (14) в ряде случаев можно использовать условие $\sigma_x = \sigma_\theta$.

Необходимо указать, что оба последних условия принадлежат к классу более общего параметрического условия $\sigma_x = s\sigma_\theta + (1-s)\sigma_r$, соответственно при значениях параметра $s = 1/2$ и $s = 1$. Если использовать условие (6), то для давления металла $p = \frac{1}{3}[(2-s)\sigma_r + (1+s)\sigma_\theta]$. В силу записанного, последнего, с учетом условия текучести, имеем

$$1 - \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{1}{K} \left[\sigma_r - \frac{1}{3}(1+s)\tau_0 \right]. \quad (7)$$

Исключив из уравнений (2) и (9) σ_θ при помощи условия (6) и ρ при помощи равенства (7), получим

$$\left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\tau_0}{r} \right) \left(K - \sigma_r + \frac{1+s}{3}\tau_0 \right) = -\rho_0 K \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right), \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \left(K - \sigma_r + \frac{1+s}{3}\tau_0 \right) = - \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial t} + v \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right). \quad (9)$$

Для оправки с произвольной криволинейной образующей $r = f(x)$ и произвольным законом движения $u_0(t)$, именно эти два уравнения определяют пластическое движение металла в области очага деформации $r_0(t) \leq r \leq R(t)$.

Предположим, что оправка внедряется в трубную заготовку с постоянной скоростью U_0 и имеет конический наконечник (носик). В этом случае граница контакта пластической зоны с оправкой движется с постоянной скоростью $c_0 = u_0 \tan \theta_s$ и задача (8), (9) оказывается автомодельной, поскольку не имеет характерного размера. В этом случае скорость распространения пластической зоны c также постоянна и равна $R(t) = ct$. Перейдя в (8) и (9) к безразмерным величинам, $\bar{v} = \frac{v}{c}$; $\bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_r}{K}$; $\bar{\tau}_0 = \frac{\tau_0}{K}$, которые являются функциями только автомодельной

переменной, которую удобнее взять в виде $\xi = \frac{r}{ct}$, получим систему двух обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\left[1 - \bar{\sigma}_r + \frac{1}{3}(1+s)\bar{\tau}_0\right] \left(\frac{d\bar{\sigma}_r}{d\xi} + \frac{\bar{\tau}_0}{\xi}\right) = \beta^2 \frac{d\bar{v}}{d\xi} (\xi - \bar{v}), \quad (10)$$

$$\left[1 - \bar{\sigma}_r + \frac{1}{3}(1+s)\bar{\tau}_0\right] \left(\frac{d\bar{v}}{d\xi} + \frac{\bar{v}}{\xi}\right) = \frac{d\bar{\sigma}_r}{d\xi} (\xi - \bar{v}), \quad (11)$$

где $\beta = \frac{c}{c_p}$, $c_p = \frac{K}{\rho_0}$.

Система уравнений (10) и (11) описывает пластическое течение в области $c_0t < r < ct$, которая в автомодельных переменных является интервалом $\xi_0 \leq \xi \leq 1$. Здесь ξ_0 – нижний предел автомодельной переменной $\xi_0 = \frac{c_0}{c} < 1$ соответствует границе контакта металла с оправкой.

Обратим внимание на тот факт, что граница $r = R(t)$ заранее неизвестна, и в автомодельной задаче (из-за выбора в качестве характерной скорости величины C) неизвестным оказывается значение ξ_0 на границе с оправкой. Таким образом, в подвижной области $r_0(t) < r < R(t)$, с заранее неизвестной границей $R(t)$, для оправки с произвольной криволинейной образующей, решение задачи сводится, в пластической зоне, к решению системы нелинейных уравнений в частных производных (8) и (9).

Для случая внедрения оправки, выполненной в виде строго конического тела, с постоянной скоростью u_0 в трубную заготовку, задача, в конечном итоге, сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений (10) и (11) в области с фиксированными границами $\xi = \xi_0 < 1$ и $\xi = 1$ с заранее неизвестной величиной

ξ_0 . Из граничных условий при $\xi = \xi_0$ известно значение скорости $v = c_0$ или $\bar{v} \Big|_{\xi=\xi_0} = \frac{c_0}{c} = \xi_0$, условия на

границе $\xi = 1$ должны определяться из условия стыковки решения в пластической зоне с решением в зоне, которая примыкает к пластической. Отметим, что линеаризованная задача для пластической области базируется на основных предположениях линейной теории пластичности [7, 9].

Результаты анализа задачи показывают, что хотя изменение плотности прошиваемой заготовки происходит, но величина $\rho_0/\rho \approx 1$. Кроме того, величины $v \frac{\partial \rho}{\partial r}$ и $v \frac{\partial v}{\partial r}$ имеют второй порядок, поэтому, в линейном приближении задачи, вместо уравнений (8) и (9) воспользуемся уравнениями

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\tau_0}{r} = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (13)$$

Исключив из уравнений (12) и (13) ρ , при помощи уравнения (7), придем к следующей системе уравнений [6, 7]

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\tau_0}{r} = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial t} + K \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) = 0, \quad (15)$$

которая является линеаризованным вариантом системы (8) и (9).

Для оправки, с коническим наконечником, при постоянной скорости внедрения u_0 , задача (30) и (31) является автомодельной и в безразмерных переменных приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{d\bar{\sigma}_r}{d\xi} + \frac{\bar{\tau}_0}{\xi} = \beta^2 \xi \frac{d\bar{v}}{d\xi}; \quad (16)$$

$$\frac{d\bar{v}}{d\xi} + \frac{\bar{v}}{\xi} = \xi \frac{d\bar{\sigma}_r}{d\xi}. \quad (17)$$

на интервале переменной $\xi_0 \leq \xi \leq 1$.

Ограничимся, в дальнейшем, только решением линеаризованной системы уравнений (16) и (17), которая, как показывает сравнение с численным решением нелинейной системы (8) и (9), имеет удовлетворительную точность, но обладает тем преимуществом, что линеаризованная система допускает замкнутое аналитическое решение. Из (16) и (17) имеем самостоятельное уравнение для определения \bar{v}

$$\left(1 - \beta^2 \xi^2\right) \frac{d\bar{v}}{d\xi} + \frac{\bar{v}}{\xi} = -\bar{\tau}_0, \quad (18)$$

Причем, при $\xi = \xi_0$, должно удовлетворяться граничное условие $\bar{v} \Big|_{\xi=\xi_0} = \xi_0$. Решение уравнения (18), удовлетворяющее последнему условию, имеет вид

$$\bar{v}(\xi) = D_0 \frac{\sqrt{1-\beta^2\xi^2}}{\beta^2\xi} - \frac{\bar{v}_0}{\beta^2\xi}, \quad (19)$$

где $D_0 = \frac{\beta^2\xi_0^2 + \bar{v}_0}{\sqrt{1-\beta^2\xi_0^2}}$.

Теперь из (16) получаем выражение для определения $\bar{\sigma}_r(\xi)$

$$\bar{\sigma}_r(\xi) = D_0 \ln \frac{1 + \sqrt{1-\beta^2\xi^2}}{\beta\xi} + D_1, \quad (20)$$

где D_1 – произвольная постоянная.

Постоянная D_1 и безразмерная скорость распространения пластической зоны $\beta = \frac{c}{c_p}$ должны быть

определены из условия сопряжения пластической зоны с внешней зоной, примыкающей к пластической. Так как, для внешней зоны могут применяться различные математические и физические модели, то здесь использованы две наиболее распространенные модели: модель упругой зоны и модель зоны, разрушенной радиальными трещинами в заготовке.

Следует отметить, что при реализации некоторых режимов прошивки, предварительно нагретой, трубной заготовки осесимметричной цилиндрической оправкой в металле, наряду с пластической зоной, возникает некоторая раздробленная область (рис.2). В связи с этим, исследование динамических явлений в области с трещинообразованиями является наиболее актуальным.

Известно, что для многих сталей и сплавов, из которых путем вскрытия полости изготавливаются гильзы (трубы), предел прочности на разрыв σ_0 гораздо меньше по величине, чем предел прочности на сжатие. При прошивке металла оправкой, образующая которой изношена или калибрована неудачно, в некоторой области очага деформации возникают значительные растягивающие окружные усилия, теоретически превосходящие предел прочности на разрыв. Иначе говоря $\sigma_\theta < -\sigma_0$. В условиях реализации существующего технологического процесса прошивки в таких областях деформируемый металл теряет способность сопротивляться напряжениям и разрушается, причем дробление проявляется в виде образования большого количества радиальных трещин. Например, зачастую, это имеет место при производстве (прошивке) толстостенных труб на оправках определенной геометрической формы. В связи с этим, в тех случаях, когда появляются окружные растягивающие напряжения, которые превосходят предел прочности на разрыв, расчетная схема должна быть изменена таким образом, чтобы отображала возможность появления указанной разрушенной зоны (рис. 4).

В зоне, разрушенной радиальными трещинами, связанность материала вдоль окружных волокон нарушается и, поэтому, можно предположить, что окружное усилие становится равным нулю. Следовательно, в такой зоне $\sigma_\theta = 0$.

Поэтому уравнение (13) для зоны с трещинообразованием в линейном приближении будет иметь вид

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r}{r} = -\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (21)$$

где $u(r, t)$ – смещение металла в раздробленной зоне.

В этом случае, уравнение неразрывности (8) можно представить через смещение $u(r, t)$ в виде

$$1 - \frac{\rho_0}{\rho} = -\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r}\right). \quad (22)$$

При условии (6) из (7) получим, что давление равно $p = \frac{2-s}{3} \sigma_r$, ($0 \leq s \leq 1$) а из (18) получим следующую взаимосвязь между плотностью прошиваемого металла и радиальным напряжением σ_r

$$\frac{2-s}{3} \sigma_r = K \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right). \quad (23)$$

Из (22) и (23) получим уравнение

$$\frac{2-s}{3} \frac{\sigma_r}{K} = -\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r}, \quad (24)$$

которое в комбинации с (21) дает отдельное уравнение для движения металла в очаге в виде деформации $u(r, t)$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (25)$$

где $a = \sqrt{\frac{3K}{\rho_0(2-s)}}$ – скорость распространения переднего фронта зоны разрушения.

Решим уравнение (25) для случая внедрения в прошиваемый металл вибрируемой оправки, произвольной формы, с постоянной скоростью при $a \geq 0$. Схема решения задачи в сочетании с вышесказанным складывается из следующих основных предположений: Замкнутое решение задачи можно осуществить путем конструирования

областей возмущения, состоящих из внутренней пластической в сочетании с внешней разрушенной зоной. Поэтому схема решения задачи предлагается следующая. Сначала решается задача в предположении, что возмущенная область состоит из пластической зоны и зоны упругости. При этом, сначала, решается уравнение для определения параметра β (относительной скорости волны пластичности), а затем, по формулам (8) и (9), восстанавливаются поля напряжений и скоростей. Далее проверяется выполнение условия $\sigma_\theta > -\sigma_0$ во всей возмущенной области. Если это условие выполняется, то указанным решением ограничиваемся. Если же указанное условие для σ_θ в какой то области нарушается, то рассматривается случай, когда возмущенная область состоит из пластической зоны, зоны, разрушенной трещинами и жесткой зоны, лежащей перед фронтом распространения области разрушения. Очевидно, что решение задачи начинается с определения величины β .

Путем моделирования волновых процессов в металле, установим некоторые особенности технологии управляемой вибрационной прошивки трубной заготовки. Перейдем к детальному анализу математической модели возмущенной области очага деформации согласно (25) и изучению волновых процессов в прошиваемом металле.

С учетом определенных начальных и граничных условий реализации задачи

$$u|_{t=0} = f(r); \quad \frac{du}{dr}|_{t=0} = F(r); \quad \frac{du}{dr}|_{r=R} = 0, \quad (26)$$

решение уравнения (25) представим по методу Фурье в виде

$$u(r, t) = T(t) W(r). \quad (27)$$

После подстановки (27) в дифференциальное уравнение волновых процессов (25) разделяя переменные задачи после некоторых преобразований запишем

$$\frac{W''(r) + \frac{2}{r}W'(r)}{W(r)} = \frac{T''(t)}{a^2 T(t)} = -\lambda^2 \quad (28)$$

Из уравнения (28) имеем следующую систему независимых дифференциальных уравнений

$$W''(r) + \frac{2}{r}W'(r) + \lambda^2 W(r) = 0; \quad (29)$$

$$T''(t) + \lambda^2 a^2 T(t) = 0. \quad (30)$$

Решения дифференциальных уравнений (29) и (30) согласно [11], соответственно, запишем в виде

$$W(r) = C_1 \frac{\sin(\lambda r)}{r} + C_2 \frac{\cos(\lambda r)}{r}; \quad (31)$$

$$T(t) = A \cos(\lambda a t) + B \sin(\lambda a t) \quad (32)$$

где C_1, C_2, A, B – постоянные интегрирования задачи.

Дифференциальное уравнение (29) представляет известное уравнение согласно [11]. Отметим, что в приведенном решении (31), при $r=0$, вторая слагаемая обращается в нуль. Следовательно, при этом, для удовлетворения начальных условий задачи постоянные интегрирования задачи соответственно определены в виде $C_1 = 1; C_2 = 0$.

Тогда решение уравнения (31) в данном случае представим в виде

$$W(r) = \frac{\sin(\lambda r)}{r}. \quad (33)$$

Чтобы решение задачи удовлетворяло выбранным граничным условиям справедливо $\frac{dW}{dr}|_{r=R} = 0$.

Необходимо подчеркнуть, что, при этом, из последнего условия находим требуемые собственные числа (корни) уравнения (31) в виде

$$\lambda R \cos(\lambda R) - \sin(\lambda R) = 0. \quad (34)$$

Из решения уравнения (34) с учетом некоторой замены $\lambda R = \mu$ находим все $\mu_k = tg(\mu_k), k = 1, 2, 3, \dots$.

Отметим, что соответствующим собственным числам $\lambda_k = \mu_k / R$ уравнения (34) соответствует определенная собственная функция задачи

$$W(r) = \frac{\sin(\frac{\mu_k r}{R})}{r} \quad (35)$$

Согласно методу Фурье общее решение уравнения (25), с учетом собственного числа $\lambda_0 = 0, \lambda_k$, выражений (32) и (35) представим в виде

$$u(r, t) = A_0 + B_0 t + \sum_{k=1}^{\infty} \left[A_k \cos(\frac{\mu_k a t}{R}) + B_k \sin(\frac{\mu_k a t}{R}) \right] \frac{\sin(\frac{\mu_k r}{R})}{r} \quad (36)$$

Исходя из принятых начальных условий задачи (26) запишем

$$f(r) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \frac{\sin(\frac{\mu_k r}{R})}{r} \quad \text{и} \quad F(r) = B_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_k r}{R} B_k \frac{\sin(\frac{\mu_k r}{R})}{r}, \quad (37)$$

соответственно определяем постоянные интегрирования задачи A_0, A_k, B_0 и B_k в виде

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{3}{R^3} \int_{R_1}^{R_2} r^2 f(r) dr; \quad A_k = \frac{2}{R} \left(1 + \frac{1}{\mu_k^2} \right) \int_{R_1}^{R_2} r f(r) \sin\left(\frac{\mu_k r}{R}\right) dr; \\ B_0 &= \frac{3}{R^3} \int_{R_1}^{R_2} r^2 F(r) dr; \quad B_k = \frac{2}{aR} \left(1 + \frac{1}{\mu_k^2} \right) \int_{R_1}^{R_2} r F(r) \sin\left(\frac{\mu_k r}{R}\right) dr. \end{aligned} \quad (38)$$

Следовательно, общее решение задачи представим в стандартной форме, в виде волновых-колебательных процессов

$$u(r, t) = A_0 + B_0 t + \sum_{k=1}^{\infty} \tilde{A}_k \sin\left(\frac{\mu_k a t}{R} + \varphi_k\right) \frac{\sin\left(\frac{\mu_k r}{R}\right)}{r}, \quad (39)$$

где $\tilde{A}_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$ – амплитуды волновых процессов в возмущенной области прошиваемого металла;

$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{A_k}{B_k}$ – начальные фазы волновых процессов.

Из выражения (39) следует, что период волновых процессов (вынужденных колебаний) в прошиваемом металле определяется

$$T_k = \frac{2\pi}{K_k}, \quad (40)$$

где $K_k = \sqrt{\frac{\mu_k a}{R}}$ – частота волнового процесса.

Предлагается следующая возможная схема решения задачи. Сначала рассматривается задача в предположении, что возмущенная область состоит из пластической зоны и раздробленной зоны. Сначала решается уравнение для определения параметра β (относительной скорости волны пластичности), а затем, по формулам (8) и (9), восстанавливаются истинные поля напряжений и скоростей. После проверяется выполнение условия $\sigma_\theta > -\sigma_0$ во всей возмущенной области очага деформации. Если это условие выполняется, то указанным решением задачи ограничиваемся. Далее, задавшись определенными начальными и граничными условиями активных вынужденных гармонических колебаний технологического инструмента (оправки или иглы) в виде $f(r) = r(t) \sin(\omega t)$ и $F(r) = r'(t) \omega \cos(\omega t)$ заданной частоты ω , математическим моделированием, определяем эффективные параметры вибрационной прошивки трубной заготовки на этапе назначения технологического процесса.

Необходимо подчеркнуть, что поскольку, процессы прошивки в рамках выбранной динамической модели в поперечном направлении очага деформации, представляют волновые процессы, то путем приложения внешних активных управляющих воздействий, например, высокочастотных колебаний определенной частоты $\omega = 0,5 - 7,5$ кГц, со стороны вибрируемого технологического инструмента прошиваемому металлу, возможно добиться ускоренного внедрения оправки 6 в трубную заготовку 1 без трещинообразования. Отметим, что возбудитель высокочастотных колебаний 7 непосредственно установлен внутри самой оправки 6 и подвергается интенсивному охлаждению существующей системой охлаждения 6 инструментов (рис. 3). Кроме этого, под воздействием управляющих высокочастотных колебаний, достигается значительное уменьшение предела текучести и упругости прошиваемого металла, что обеспечивает снижение усилия прошивки и приводит к увеличению эффективности процесса. Стабилизацией параметров объемного напряженно-деформированного состояния металла, например, при прошивке трубных заготовок из стали 0X18N10T диаметром 270 мм на прошивном прессе 12 МН достигается снижение усилия прошивки на 19 %, повышение стойкости экспандера в три раза, за счет преодоления сил контактного трения, характерного для процесса. Со снижением усилия прошивки достигается устойчивость функционирования иглодержателя и стержня оправки в процессе прошивки, что приводит к существенному снижению разностенности и повышению качества выпускаемых труб. В данном случае, уменьшение разностенности труб из нержавеющей стали составляет примерно 16 %.

Необходимо особо подчеркнуть тот факт, что с применением высокочастотных вибраций так же устраняется зона, разрушенная радиальными трещинами в силу того, что связанность материала вдоль окружных волокон не нарушается. Полученные результаты показывают, что технологические процессы прошивки трубных заготовок из различных марок сталей и их сплавов, с применением высокочастотной вибрации по рассматриваемой схеме, достаточно корректно моделируются представленной математической моделью.

Математическая модель процесса вибрационной прошивки расширяет возможности анализа динамических явлений в очаге деформации. Решение задачи по определению напряженно-деформированного состояния очага деформации, как видно из выбранной динамической модели, базируется на реализации стандартного математического аппарата. Уточненные динамические особенности очага деформации существенно дополняют имеющиеся представления о напряженно-деформированном состоянии металла в процессе вибрационной прошивки трубной заготовки. Полученные результаты позволяют наметить пути совершенствования технологического процесса прошивки и реализовать управляемые режимы деформации трубной заготовки на прошивном прессе.

Предложенная методика исследования технологического процесса прошивки трубных заготовок в полые гильзы из различных марок сталей и их сплавов на прошивном прессе по существующей схеме прошивки

существенно расширяет возможности анализа напряженно-деформированного состояния очага деформации и уточняет параметры функционала осевого сопротивления согласно [2, 6].

Как видно, в этом случае, имеющие место волновые процессы и характерное напряженно-деформированное состояние металла в условиях реализации вибрационных технологий являются определяющими для очага деформации. Уточнение параметров осевого сопротивления осесимметричной оправки в потоке прошиваемого металла в этом случае не требует реализации достаточно сложного математического аппарата.

Установленные динамические особенности очага деформации развивают имеющиеся представления о напряженно-деформированном состоянии прошиваемого металла. Полученные результаты указывают на эффективность применения процесса вибрационной прошивки заготовки и позволяют наметить пути совершенствования технологического процесса, определить рациональную форму образующей оправки. Для повышения эффективности процесса прошивки или стабилизации энергосиловых параметров очага деформации математическим моделированием определены требуемые амплитудно-частотные характеристики технологического инструмента (оправки).

Выводы

1. Разработана динамическая модель процесса прошивки (экспандирования) заготовки и получены уравнения расширения границ, соответствующих пластической зоне и зоне с трещинообразованием в очаге деформации.

2. Определены величины скорости распространения фронта пластической волны и фронта трещинообразования, напряжения и деформации в зависимости от скорости расширения границы вибрируемой оправки.

3. Показано, что высокочастотные колебания способствуют повышению эффективности технологического процесса прошивки трубных заготовок или экспандирования предварительно сверленных гильз.

4. Путем выбора рациональных геометрических параметров как образующих самих оправок, так и амплитудно-частотных характеристик высокочастотных вибраторов технологического инструмента достигнуто заметное повышение качества гильз (труб).

Список литературы

1. 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.
2. Клименко В.М., Шаповал В.Н. Вибрационная обработка давлением. Киев: Техника, 1977. – 128 с.
3. Медведов М.И., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А. Совершенствование процесса прессования труб. – М.: Metallurgia, 1986. – 151 с.
4. Перлин И.Л. Теория прессования металлов. – М.: Metallurgia, 1964. – 344 с.
5. Гуляев Г.И., Притоманов А.Е., Дробич О.П. и др. Прессование стальных труб и профилей. – М.: Metallurgia, 1973. – 192 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. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1978. – 512 с.
8. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т. 7. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
10. Гендуков В.М. Тело вращения минимального сопротивления в упругопластических и пластических сжимаемых средах. – В кн. «Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред», Ереван. Изд-во АН Армянской ССР, 1984. С.116 – 121
11. Сагомонян А.Я. Проникание. – М.: МГУ, 1956. – 300 с.
12. Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики. / Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.И.// М.: Высшая школа, 1970. – 712 с.