

## ВИБРАЦИОННАЯ ПРОШИВКА ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ НА ПРОШИВНОМ ПРЕССЕ ТРУБОПРЕССОВОЙ УСТАНОВКИ

*Рахманов С.Р., к.т.н., доцент кафедры теоретической механики  
и сопротивления материалов (npfvostokplus@gmail.com)*

**Национальная металлургическая академия Украины**  
(49600, Украина, Днепр, ул. Акинфеева, 18)

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы использования высокоэффективных технологий при производстве труб на прошивном прессе трубопрессовой установки. Проанализированы существующие базовые и перспективные направления интенсификации режимов деформации в процессах обработки металлов давлением с использованием активных управляемых высокочастотных вибраций. Установлено, что в силу недостаточной изученности вибрационные процессы не находят широкого применения при производстве бесшовных труб. Путем анализа и синтеза ряда известных фундаментальных исследований показано, что благоприятные условия деформации металла достигаются при использовании высокочастотных вибраций. Выявлено, что операция прошивки трубной заготовки на прошивном прессе сопровождается значительными потерями на преодоление сил технологического сопротивления, характерного для процесса неравномерности деформаций по всему объему обрабатываемого металла. Установлены некоторые ранее неизвестные явления, возникающие при реализации существующих технологий прошивки трубных заготовок, что потребовало создания новых математических моделей таких процессов, адекватно отражающих условия осуществления процесса прошивки или экспандирования заготовок на современных прошивных прессах. Составлена математическая модель динамических волновых процессов, возникающих в обрабатываемом металле. Для квазистационарного процесса прошивки трубной заготовки получены дифференциальные уравнения образования волн на соответствующих границах зон очага деформации, характерных для пластической зоны и зоны с трещинообразованием в прошиваемом металле. Определены параметры границы распространения волн в прошиваемой трубной заготовке на сопрягаемых фронтах пластической зоны с зоной возникновения трещинообразования. Установлено, что деформации и напряжения в прошиваемом металле зависят от скорости расширения характерных волн на границе контакта с технологическими инструментами. Обоснована высокоэффективная инновационная технология вибрационной прошивки трубной заготовки на прошивном прессе трубопрессовой установки. Установлены особенности реализации технологии активной управляемой вибрационной прошивки трубной заготовки на прошивном прессе трубопрессовой установки. Показано, что применение высокочастотных колебаний на прессе способствует значительному повышению эффективности технологического процесса прошивки или экспандирования трубных заготовок. Выбором рациональных параметров высокочастотных вибраторов (амплитудно-частотных характеристик), встроенных в систему, получено заметное снижение энергосиловых параметров в процессе прошивки трубной заготовки и достигнуто существенное повышение качества производимых гильз.

**Ключевые слова:** пресс, труба, прошивка, экспандер, контейнер, оправка, модель, зона пластичности, волна, зона разрушения, напряжение, вибрация, высокочастотный вибратор.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-156-163

Разработка новых, высокоэффективных технологий производства труб выдвигает ряд актуальных задач. Весьма перспективным направлением интенсификации режимов деформации при прошивке трубных заготовок является использование высокочастотных механических колебаний или вибраций. Применение передовых вибрационных технологий при производстве бесшовных труб обуславливает новый подход 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 прессового оборудования [1 – 3].

Высокоэффективные технологические процессы прошивки трубных заготовок предусматривают модернизацию прессового оборудования применением управляемых высокочастотных вибраций. Однако в силу недостаточной изученности эти процессы не на-

ходят широкого применения в практике производства бесшовных труб. В частности, задачи по повышению эффективности процессов прошивки 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 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 так и экспериментальном планах.

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.

Определение некоторых скрытых возможностей существующих технологий и разработка технологии вибрационной прошивки трубных заготовок требуют создания новых математических моделей процессов, адекватно отражающих условия реализации процесса прошивки или экспандирования гильз на современных прошивных прессах. Схема такого пресса приведена на рис. 1.

Остановимся на некоторых наиболее важных моментах технологического процесса вибрационной прошивки трубных заготовок. Процесс вибрационной прошивки трубной заготовки или экспандирования предварительно сверленных гильз на прошивных прессах производится следующим образом: предварительно нагретая заготовка 2, имеющая температуру 1200 – 1250 °С (например, из нержавеющей стали 12Х18Н10Т) для реализации процесса поступает в контейнер 3. Оправка (экспандер) 4 принудительно, посредством стержня 1, внедряется в трубную заготовку 2. Стержень оправки 1 снабжен генератором высокочастотных вибрации 10. При дальнейшем движении вибрируемой оправки 4 вдоль оси прошивки прошиваемый металл 2 значительно 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, помимо всего, в прошиваемом металле возникают волновые процессы (далее в работе будет показано). При совпадении частот высокочастотных вибраторов с частотой волновых процессов в прошиваемой заготовке (за счет снижения сопротивления деформации в прошиваемом металле) происходит активизация процесса прошивки трубной заготовки в гильзы требуемых размеров [1, 4].

Разработка новых технологических процессов производства труб на современных гидравлических про-

шивных прессах требует создания корректных математических моделей процессов, адекватно отражающих необходимые условия реализации вибрационной прошивки трубных заготовок или экспандирования предварительно сверленных гильз.

В основу разработки ряда математических моделей и создания механизмов для вибрационного нагружения металла положены теоретические и экспериментальные работы В.М. Клименко, В.Н. Потураева, Г.Б. Бухвалова, В.П. Сверденко, В.И. Залесского, В.Н. Шаповала и других авторов, анализ этих разработок обобщен и наиболее полно представлен в работах [3, 5 – 18]. Большинство исследователей подтверждается 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 работах [3 – 21], 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 колебаний базовых технологических инструментов (экспандера, оправки) оказывает существенное влияние на эффективность процесса, поскольку формирует вибрационное деформирование трубной заготовки.

Отметим, что процессы прошивки трубных заготовок из малопластичных и труднодеформируемых металлов на прошивных прессах трубопрессовых установок с применением высокочастотных вибраций выдвигают ряд актуальных вопросов по совершенствованию как

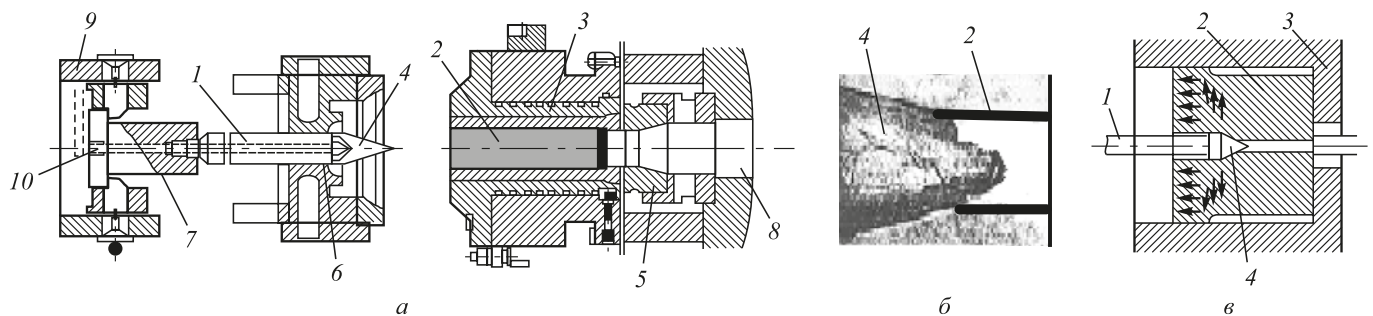


Рис. 1. Схема расположения технологического инструмента на прошивном прессе (а) и процесс экспандирования трубной заготовки (б, в): 1 – стержень иглы с вибратором; 2 – трубная заготовка; 3 – контейнер; 4 – игла (оправка) или экспандер; 5 – опорное кольцо; 6 – направляющая стержня иглы; 7 – иглодержатель; 8 – станина пресса; 9 – траверса; 10 – место установки генератора высокочастотного вибратора

Fig. 1. Scheme of technological tool location on the piercing press (a) and the process of pipe billet expanding (b, c):

1 – needle stem with a vibrator; 2 – pipe billet; 3 – container; 4 – needle (mandrel) or expander; 5 – support ring; 6 – needle stem liner; 7 – needle holder; 8 – press frame; 9 – counterplate; 10 – location of the generator of high-frequency vibrator

технологии производства труб, так и модернизации технологического оборудования [3 – 21]. В частности, при модернизации прошивного прессы усилием 16 МН высокочастотные колебания от вибровозбудителя 7 непосредственно подводятся к оправке 6 через стержень иглодержателя 2 (рис. 2).

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

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. 3).

Решение задачи вибрационного (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 этой стадии исследования наиболее приемлемы методы, ко-

торые позволяют получить уточненное решение задачи в аналитической форме.

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 параметром  $r = f[x + H(t)]$ .

В некоторой фиксированной плоскости  $x = \text{const}$  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

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

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  $x = \text{const}$ .

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

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  $u_0(t) = u_0 = \text{const}$ . При этом каждое поперечное сечение оправки при ее перемещении расширяется с постоянной скоростью  $c_0 = u_0 \text{tg}(\theta_s) = \text{const}$ , что дает основание движение металла рассматривать как автомодельное.

Подход к решению задачи прошивки состоит в следующем: считается, что каждый слой металла в некоторой фиксированной плоскости  $x = \text{const}$  движется

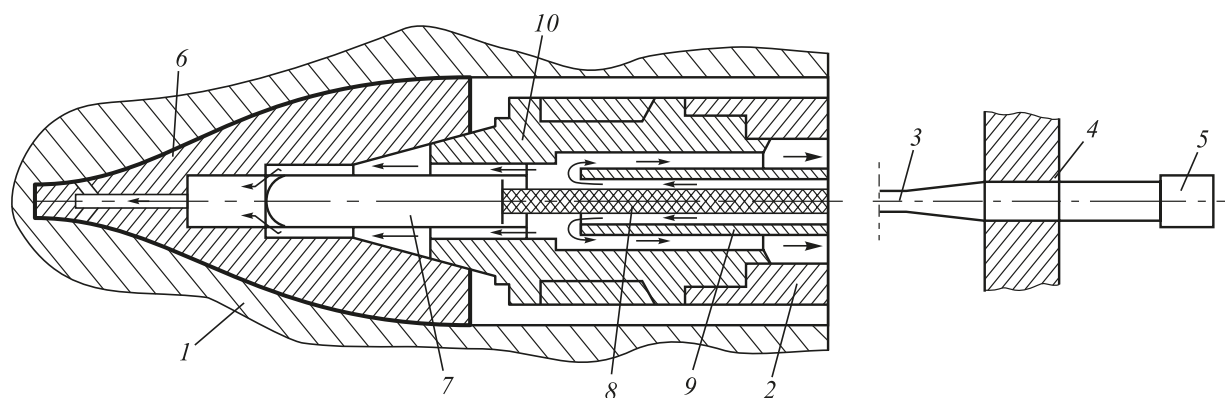


Рис. 2. Схема подвода высокочастотных колебаний к оправке прошивного прессы:

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

Fig. 2. The scheme of high-frequency vibrations supply to the mandrel of the piercing press:

1 – pipe billet; 2 – mandrel (needle holder) stem; 3 – vibration energy concentrator; 4 – device for system fixing to the press; 5 – converter of high-frequency vibrations; 6 – mandrel (expander); 7 – vibration exciter; 8 – flexible shaft; 9 – mandrel and needle cooling system tube; 10 – die carrier

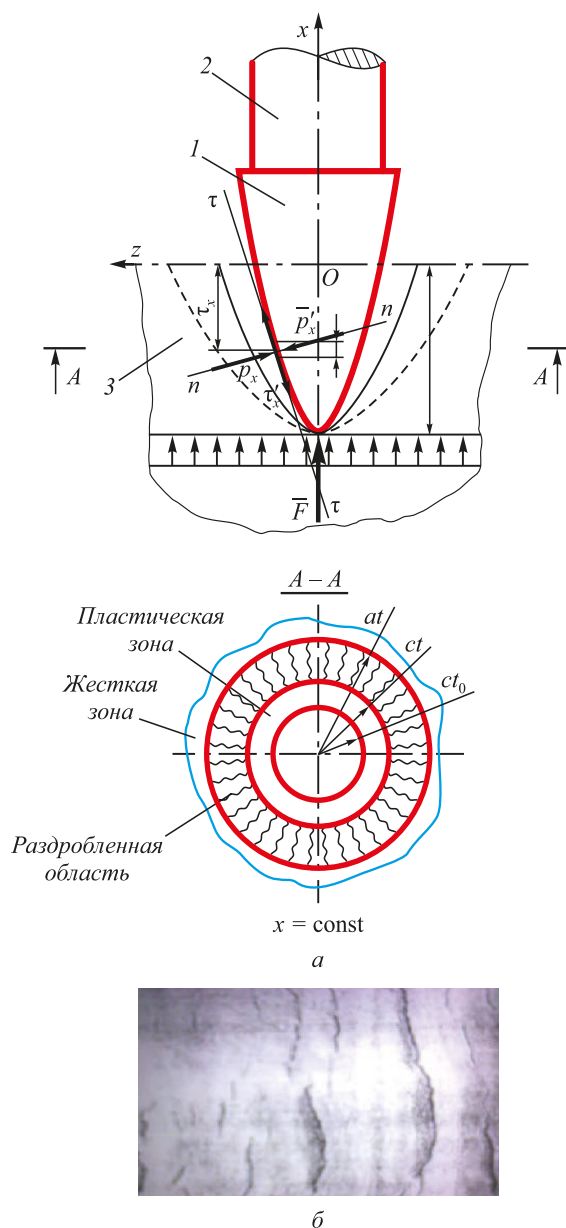


Рис. 3. Расчетная схема динамических процессов прошивки (а) и темплет трубной заготовки с характерной зоной трещинообразования (б):

1 – оправка; 2 – стержень оправки; 3 – трубная заготовка

Fig. 3. Calculation scheme of dynamic processes of piercing (a) and a template of pipe billet with a typical zone of crack formation (b):

1 – mandrel; 2 – mandrel stem; 3 – pipe billet

зависимо 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) и представляет собой задачу о распространении одномерных радиальных волн в слое, перпендикулярном направлению движения оправки в прошиваемом металле. Таким образом, можно сказать, что предлагаемый подход к решению задачи основывается исключительно на методе плоских сечений, что позволяет развивать теоретические положения

процессов прошивки заготовки технологическим инструментом (оправкой).

Результаты ряда известных исследований [3, 5 – 18] указывают на необходимость поэтапного исследования состояния обработанного давлением металла между технологическими инструментами в стесненном очаге деформации. Напряженно-деформированное состояние металла показывает, что при существующих скоростях прошивки в цилиндрической заготовке (металле), кроме зоны упругого состояния, преимущественно возникает зона пластического состояния, а в некоторых случаях и нежелательная зона разрушения металла. Поэтому первоначально рассмотрим указанные зоны и дадим решение динамической задачи для них. Пластическая область очага деформации расположена в зоне непосредственного контакта металла с оправкой. В рамках выбранной динамической модели процесса в каждом сечении  $x = \text{const}$  эта зона представляет собой concentricкую 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.

Для внешней зоны могут применяться различные математические и физические модели. Следует отметить, что при реализации некоторых режимов прошивки предварительно нагретой трубной заготовки осесимметричной цилиндрической оправкой, наряду с пластической зоной, возникает раздробленная область [4, 20]. 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  $\sigma_0$  гораздо меньше по величине, чем предел прочности на сжатие. При прошивке металла оправкой, образующая которой частично изношена или калибрована неудачно, в некоторой области очага деформации возникают значительные растягивающие окружные усилия, теоретически превосходящие предел прочности на разрыв. 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. 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. 3).

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 напряжение  $\sigma_\theta = 0$ .

Поэтому уравнение для зоны с трещинообразованием будет иметь вид

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r}{r} = -\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_r$  – радиальные напряжения;  $\rho$  – текущая плотность металла;  $u(r, t)$  – смещение металла в раздробленной зоне.

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

$$1 - \frac{\rho_0}{\rho} = -\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r}\right), \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – начальная плотность металла.

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

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

где  $K$  – коэффициент объемной деформации металла;  $s$  – параметр конфигурации реологии металла ( $0 \leq s \leq 1$ ).

Из соотношений (2) и (3) имеем уравнение

$$\frac{2-s}{3} \frac{\sigma_r}{K} = -\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r}, \quad (4)$$

которое в комбинации с выражением (1) дает отдельное дифференциальное уравнение для анализа движения металла в очаге деформации  $u(r, t)$  в виде

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (5)$$

здесь  $a = \sqrt{\frac{3K}{\rho_0(2-s)}}$  – скорость распространения переднего фронта волны в зоне, разрушенной радиальными трещинами.

Перейдем к детальному исследованию математической модели возмущенной области очага деформации и анализу волновых процессов в прошиваемом металле.

С учетом определенных начальных и граничных условий реализации задачи

$$u|_{t=0} = f(r); \quad \frac{du}{dr}\bigg|_{t=0} = F(r); \quad \frac{du}{dr}\bigg|_{r=R} = 0 \quad (6)$$

решение уравнения (5) представляем по методу Фурье.

Следовательно, общее решение уравнения (5) согласно [4] представим в форме

$$u(r, t) = A_0 + B_0 t + \sum_{k=1}^{\infty} \tilde{A}_k \sin\left(\frac{\mu_k a t}{R}\right) + \varphi_k \left(\frac{\sin\left(\frac{\mu_k r}{R}\right)}{r}\right), \quad (7)$$

где  $A_0$  и  $B_0$  – начальные параметры возмущенной области;  $\tilde{A}_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$  – амплитуды волновых процессов в возмущенной области прошиваемого металла;  $\text{tg} \varphi_k = \frac{A_k}{B_k}$  – начальные фазы волновых процессов;  $R$  – радиус границы втулки контейнера.

Из выражения (7) следует, что период соответствующих волновых процессов (вынужденных колебаний) в прошиваемом металле определяется как

$$T_k = \frac{2\pi}{K_k}, \quad (8)$$

где  $K_k = \sqrt{\frac{\mu_k a}{R}}$  – частота распространения волн в прошиваемом металле;  $\mu_k$  – положительные корни характеристического уравнения, согласно (5) [21].

Предлагается следующая возможная схема решения задачи. Рассматривается задача в предположении, что возмущенная область состоит из пластической и раздробленной зон. Решается уравнение для определения относительной скорости волны пластичности, а затем восстанавливаются истинные поля напряжений и скоростей. Далее проверяется выполнение условия  $\sigma_\theta > -\sigma_0$  во всей возмущенной области очага деформации. Если это условие выполняется, то указанным решением задачи ограничиваемся. Затем, задавшись определенными начальными и граничными условиями активных вынужденных гармонических колебаний технологического инструмента (оправки) в виде  $f(r) = r(t) \sin(\omega t)$  и  $F(r) = \dot{r}(t) \cos(\omega t)$  заданной частоты  $\omega$ , математическим моделированием определяем эффективные параметры вибрационной прошивки трубной заготовки на этапе назначения технологического процесса ее прессования.

Необходимо подчеркнуть, что поскольку процессы прошивки в рамках выбранной динамической модели очага деформации представляют волновые процессы, то путем приложения внешних активных управляющих воздействий, например, высокочастотных колебаний определенной частоты  $\omega = 0,5 - 15,0$  кГц со стороны вибрируемого технологического инструмента прошиваемому металлу возможно добиться ускоренного внедрения оправки  $b$  в трубную заготовку  $l$  без трещинообразования в прошиваемом металле. Отметим, что возбудитель высокочастотных колебаний  $7$  непосредственно установлен внутри самой оправки  $b$  и подверга-

ется интенсивному охлаждению существующей системой охлаждения оправки 6 (инструментов) (рис. 2). Кроме этого, под воздействием управляющих высокочастотных колебаний достигается значительное уменьшение пределов 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 12Х18Н10Т диам. 190 мм на 16-МН прессе с совмещенными операциями прошивки и прессования 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 рассматриваемом случае уменьшение разностенности труб из нержавеющей стали составляет примерно 16 %.

Необходимо особо подчеркнуть тот факт, что с применением активных высокочастотных вибраций также 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 корректно описываются представленной математической моделью.

Отметим, что разработанная математическая модель процесса вибрационной прошивки трубной заготовки создает определенные возможности для 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 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 из различных марок сталей и их сплавов на прошивном прессе существенно расширяет возможности анализа напряженно-деформированного состояния очага деформации.

Как видно, в этом случае имеющие место сопровождающие волновые процессы и характерное напря-

женно-деформированное состояние металла в условиях реализации вибрационных технологий являются определяющими для очага деформации. Установленные динамические особенности очага деформации развивают имеющиеся представления о напряженно-деформированном состоянии прошиваемого металла.

**Выводы.** Для квазистационарного процесса прошивки трубной заготовки получены уравнения расширения характерных границ очага деформации, соответствующих пластической зоне и зоне с трещинообразованием. Определены параметры границы распространения фронта волны зоны трещинообразования в прошиваемом металле. Установлено, что деформации и напряжения в прошиваемом металле зависят от скорости расширения волны на границе контакта с вибрируемой оправкой. Показано, что высокочастотные колебания способствуют повышению эффективности процесса прошивки или экспандирования трубных заготовок в гильзы на прессе.

Путем выбора рациональных параметров оправки высокочастотных вибраторов (амплитудно-частотных характеристик), встроенных в стержень, получено заметное снижение энергосиловых параметров в процессе прошивки трубной заготовки и достигнуто повышение качества производимых гильз.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. Медведев М.И., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А. Совершенствование процесса прессования труб. – М.: Металлургия, 1986. – 151 с.
3. Боборыкин Ю.А. Некоторые вопросы обработки металлов давлением с применением вибраций. Материалы семинара «Применение вибраций для интенсификации процессов штамповки». – М.: МДНТП, 1961. С. 27 – 32.
4. Рахманов С.Р., Гоман О.Г. Динамические процессы при прошивке трубной заготовки на прессе // Сталь. 2010. № 6. С. 73 – 78.
5. Иванов В.С. Механизм пластической деформации при действии циклических нагрузок // Металловедение и термическая обработка металлов. 1960. № 4. С. 7 – 13.
6. Бухвалов Г.Б., Скрябин Н.П., Волегов В.П. Обработка металлов в условиях вибрационного нагружения. – В кн.: Доклады четвертой научно-технической конференции молодых специалистов. – М.: ВНИИМЕТМАШ, 1961. С. 17 – 25.
7. Залеский В.И., Волков И.П. Исследование деформации при осадке в условиях вибрационного нагружения // Изв. вуз. Черная металлургия. 1965. № 9. С. 12 – 16.
8. Залеский В.И., Мендыбаев О.С. Вибрационное прессование с применением гидровинтового вибратора // Изв. вуз. Черная металлургия. 1965. № 11. С. 7 – 12.
9. Потураев В.Н., Миронюк А.Ф. Некоторые результаты исследования вибропрессования. – М.: Металлургия, 1966. – 254 с.
10. Стеблов В.И., Тартаковский И.П. Определение параметров вибрационных прессов для штамповой зачистки деталей // Технология и автоматизация машиностроения. 1968. Вып. 3. С. 15 – 19.
11. Зайцев В.С., Павлов И.М., Буханов С.Ф. Геометрические условия вибрационной прокатки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1969. № 5. С. 51 – 58.

12. Матвеев И.Б. Выбор принципиальной схемы вибрационного пресса // Кузнечно-штамповочное производство. 1973. № 8. С. 24 – 28.
13. Николаев В.А. Давление и момент при прокатке полосы с вибрационным нагружением // Изв. вуз. Черная металлургия. 1971. № 9. С. 32 – 39.
14. Сверденко В.П., Добровольский И.Г., Булах В.Н. Изучение влияния низкочастотных колебаний на силовые параметры при вибрационной осадке // Изв. вуз. Черная металлургия. 1971. № 7. С. 21 – 27.
15. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
16. Несис Е.И. Методы математической физики: Учебное пособие. – М.: Просвещение, 1977. – 199 с.
17. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. – М.: Мир, 1968. – 432 с.
18. Клименко В.М., Шаповал В.Н. Вибрационная обработка давлением. – Киев: Техника, 1977. – 128 с.
19. Winsper C.T., Sansome D.H. The superposition of longitudinal sonic oscillations at the wire drawing progress. Proc. Inst. Mch. Engrs. 1968, No. 25.
20. Рахманов С.Р. Математическое моделирование процессов вибрационной прошивки трубной заготовки на прошивном прессе // Вибрация в технике и технологиях. 2010. № 3. С. 99 – 108.
21. Гуляев Ю.Г., Чукмсов С.А., Губинский А.В. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. – Киев: Наукова думка, 1986. – 240 с.

Поступила 13 февраля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 2, pp. 156–163.

## VIBRATION PIERCING OF PIPE BILLET ON THE PIERCING PRESS OF PIPE-ROLLING MILL

S.R. Rakhmanov

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-156-163

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

### REFERENCES

**Abstract.** The issues of using highly efficient technologies in the production of pipes on the piercing press of a pipe press installation are considered. The existing basic and perspective directions of intensification of deformation modes in the processes of metal forming using active controlled high-frequency vibrations are analyzed. It was established that, due to insufficient study, vibration processes do not find wide application in the production of seamless pipes. By analyzing and synthesizing a number of known fundamental studies, it has been shown that favorable conditions for metal deformation can be achieved by using high-frequency vibrations. It was revealed that the operation of the pipe billet piercing on the piercing press is accompanied by considerable losses to overcome the forces of technological resistance, characteristic for the process of deformations unevenness throughout the volume of the processed metal. Some previously unknown phenomena that arise during the implementation of existing technologies for pipe billets piercing have been established, which required the creation of new mathematical models of such processes that adequately reflect the conditions of the process of piercing or expanding the billets on modern piercing presses. A mathematical model of the dynamic wave processes arising in the processed metal is made. For the quasistationary process of pipe billet piercing differential equations of wave formation are obtained at the corresponding boundaries of the zones of the deformation center, characteristic for the plastic zone and the zone with cracking in the pierced metal. The parameters of the wave propagation boundary in the pierced pipe billet on the conjugate fronts of the plastic zone with the zone of crack formation are determined. It was established that deformations and stresses in the pierced metal depend on the rate of expansion of characteristic waves at the interface of contact with technological tools. A highly effective innovative technology of vibration piercing of a pipe billet on a piercing press of a pipe-rolling mill is substantiated. The features of realizing the technology of active controlled vibration piercing of the pipe billet on the piercing press of a pipe-rolling mill are determined. It is shown that the use of high-frequency oscillations on the press contributes to a significant increase in the efficiency of the technological process of piercing or expansion of pipe billets. The choice of rational parameters of high-frequency vibrators (amplitude-frequency characteristics), built into the system, resulted in a noticeable decrease in the energy-strength parameters during the piercing of the pipe billet and a significant improvement in the quality of the produced sleeves.

**Keywords:** press, pipe, insertion, expander, container, mandrel, model, plasticity zone, wave, destruction zone, tension, vibration, high-frequency vibrator.

1. Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romantsev B.A., Samusev S.V. *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva. Uchebnik dlya vuzov* [Pipe production technology. Textbook for universities]. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2002, 640 p. (In Russ.).
2. Medvedev M.I., Gulyaev Yu.G., Chukmasov S.A. *Sovershenstvovanie protsessov pressovaniya trub* [Improvement of pipe pressing process]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 151 p. (In Russ.).
3. Boborykin Yu.A. Selected issues of vibration-assisted metal forming. In: *Materialy seminarov: Primenenie vibratsii dlya intensivatsii protsessov shtampovki* [Papers of the seminar "Vibration application in for intensification of die-stamping processes"]. Moscow: MDNTP, 1961, 27–32 p. (In Russ.).
4. Rakhmanov S.R., Goman O.G. Dynamic processes during pipe billet piercing on pressing machine. *Stal'*. 2010, no. 6, pp. 73–78. (In Russ.).
5. Ivanova V.S. Plastic deformation mechanism under cycling loads. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1960, no. 4, pp. 7–13 (In Russ.).
6. Bukhvalov G.B., Skryabin N.P., Volegov V.P. Metal treatment under vibration stressing. In: *Doklady chetvertoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii molodykh spetsialistov* [Papers of the 4th Scientific Conference of Young Specialists]. Moscow: VNIIMETMASH, 1961, pp. 17–25 (In Russ.).
7. Zaleskii V.I., Volkov I.P. Study of sinking strain deformation at vibration stressing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1965, no. 9, pp. 12–16. (In Russ.).
8. Zaleskii V.I., Mendybaev O.S. Vibration pressing with screw hydraulic vibrator. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1965, no. 11, pp. 7–12. (In Russ.).
9. Poturaev V.N., Mironyuk A.F. *Nekotorye rezul'taty issledovaniya vibropressovaniya* [Selected results of the study of vibration pressing]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 254 p. (In Russ.).
10. Steblyuk V.I., Tartakovskii I.P. Determination of parameters of vibration presses for stamp chipping of the tool elements. *Tekhnologiya i avtomatizatsiya mashinostroeniya*. 1968, vol. 3, pp. 15–19. (In Russ.).
11. Zaitsev V.S., Pavlov I.M., Bukhanov S.F. Geometry conditions of vibration rolling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1969, no. 5, pp. 51–58. (In Russ.).
12. Matveev I.B. Selection of the principal scheme of vibration press. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 1973, no. 8, pp. 24–28. (In Russ.).

13. Nikolaev V.A. Pressure and moment coefficient at strip rolling under vibration stressing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1971, no. 9, pp. 32–39. (In Russ.).
14. Sverdenko V.P., Dobrovol'skii I.G., Bulakh V.N. Study of low-frequency vibrations influence on power parameters under vibration sinking strain. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1971, no. 7, pp. 21–27. (In Russ.).
15. Biderman V.L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy: Uchebnik dlya vuzov* [Theory of mechanical oscillations: Textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 408 p. (In Russ.).
16. Nesis E.I. *Metody matematicheskoi fiziki: Uchebnoe posobie* [Methods of mathematical physics: Manual]. Moscow: Prosveshchenie, 1977, 199 p. (In Russ.).
17. Chihiro Hayashi. *Nonlinear oscillations in physical systems*. McGraw-Hill, 1964, 392 p. (Russ.ed.: Hayashi Ch. *Nelineinye kolebaniya v fizicheskikh sistemakh*. Moscow: Mir, 1968, 432 p.).
18. Klimenko V.M., Shapoval V.N. *Vibratsionnaya obrabotka davleniem* [Vibration assisted pressure metal treatment]. Kiev: Tekhnika, 1977, 128 p. (In Russ.).
19. Winsper C.T., Sansome D.H. The superposition of longitudinal sonic oscillations at the wire drawing progress. *Proc. Inst. Mch. Engrs*. 1968, no. 25.
20. Rakhmanov S.R. Mathematic modeling of pipe billet piercing processes at piercing press. *Vibratsiya v tekhnike i tekhnologiyakh*. 2010, no. 3, pp. 99–108. (In Russ.).
21. Gulyaev Yu.G., Chukmsov S.A., Gubinskii A.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem* [Mathematical modeling of metal forming processes]. Kiev: Naukova dumka, 1986, 240 p.

**Information about the author:**

**S.R. Rakhmanov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Theoretical Mechanics and Strength of Materials  
(npfvostok@mail.ru)

Received February 13, 2017