

раздела метаемой и основной пластин;  $N_2$  — нормальное давление со стороны метаемой пластины;  $H$  — толщина пластины;  $l$  — длина контакта между свариваемыми пластинами;  $\gamma = n \frac{\mu}{1-\mu}$ , где  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Анализ выражения (1) показывает, что с уменьшением толщины свариваемых пластин или при увеличении длины контакта при прочих равных условиях пластическая деформация в поперечном направлении возрастает.

Таким образом, изменение размеров соударяемых пластин приводит к перераспределению энергии в очаге деформации.

УДК 621.791.044.2

В.Н. КОВАЛЕВСКИЙ, канд.техн.наук,  
Ю.Г. АЛЕКСЕЕВ,  
В.С. НИСС (БПИ)

### СХЛОПЫВАНИЕ ТОЛСТОСТЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА

Существующее описание процесса схлопывания металлических труб оказывается некорректным при метании толстостенных труб энергией взрыва. Это связано со значительной инерцией стенки трубы и поэтому начальное состояние газообразных продуктов детонации должно определяться не состоянием Чепмена—Жуге, а моделью мгновенной детонации. При использовании низкобризантного ВВ (аммонит 6ЖВ) на закон движения трубы оказывает влияние сопротивление металла деформированию. На рис. 1 представлены характерные зависимости скорости движения стенки трубы  $V$  от пройденного пути  $S$ : для тонкостенных труб при использовании условия Чепмена—Жуге (кривая А), мгновенной детонации (кривая В), аналитическая аппроксимация (кривая Г),

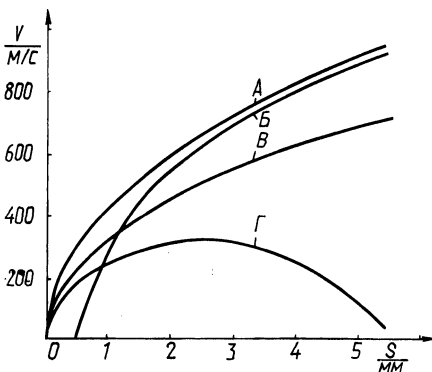


Рис. 1. Изменение скорости  $V$  стенки трубы от пройденного пути  $S$  при наружном метании

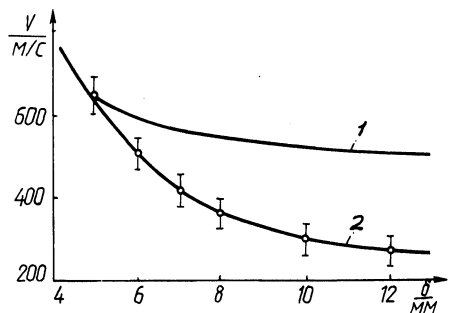


Рис. 2. Зависимость скорости  $V$  стенки трубы из стали 45 от начальной толщины стенки  $\delta$  на зазоре 5 мм: 1 — теоретическая кривая; 2 — экспериментальная кривая

кривой А (кривая Б). Для схлопывания толстостенных труб авторами получена кривая Г.

Для толстостенных труб функция скорости имеет максимум, после которого наблюдается торможение трубы в результате действия сил сопротивления деформации металла.

Экспериментальные исследования осуществлялись с использованием электронных частотомеров ЧЗ-12 с погрешностью не более 2 %.

На рис. 2 представлена зависимость скорости полета трубы (стали 45) на зазоре 5 мм от начальной толщины стенки  $\delta$ . Начальный внутренний радиус трубы  $r_{20} = 22,5$  мм. Заряд – аммонит 6ЖВ толщиной 40 мм. Анализ кривых рис. 1 показывает, что влияние сил прочности сказывается при соотношении  $\delta/r_{20} > 0,2$ .

Математическая модель процесса схлопывания выполнена при следующих предположениях: материал трубы несжимаем; расширение продуктов детонации (ПД) – одномерное; для ПД справедливо уравнение  $P = A\rho^k$ , где  $P$  и  $\rho$  – давление и плотность в ПД;  $A$  и  $k$  – постоянные.

Для элементарного объема скорость изменения работы сил прочности при деформировании

$$\frac{dA_{ci}}{dt} = \left( \sigma_{so} + E' \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{r_0} \right) \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{r} \frac{dr}{dt},$$

где  $\sigma_{so}$  – начальный динамический предел текучести;  $E'$  – модуль упругости;  $r$  – текущий радиус элементарного объема. Переходя от элементарного объема к трубе единичной длины, получим

$$\frac{dA_c}{dt} = \int_0^{2\pi} \int_{r_2}^{r_1} \frac{dA_{ci}}{dt} r d\varphi dr, \quad (1)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – текущие наружный и внутренний радиусы трубы;  $\varphi$  – угловая координата. Решаем уравнение (1) с учетом условий неразрывности течения  $r_1 V_1 = r_2 V_2$  (2) и сохранения объема  $r_1^2 - r_2^2 = r_{10}^2 - r_{20}^2$  (3)

$$\frac{dA_c}{dt} = 2\pi r_1 V_1 \left\{ \frac{2\sigma_{so}}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{2E'}{3} \left[ \ln \frac{r_1}{r_2} \ln(r_1 r_2) - \int_{r_2}^{r_1} \frac{\ln(r^2 + r_{10}^2 - r_1^2)}{r} \cdot dr \right] \right\},$$

где  $V_1$  – текущая скорость наружной поверхности трубы;  $r_{10}$ ,  $r_{20}$  – начальный наружный и внутренний радиус трубы. Скорость изменения кинетической энергии трубы единичной длины определяется выражением

$$\frac{dE}{dt} = 2\pi \rho_1 r_1 V_1 \left\{ V_1^2 \ln \frac{r_1}{r_2} + r_1 \frac{dV_1}{dt} \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{V_1^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \right\}.$$

Скорость изменения работы, совершаемой расширяющимся газом над стенкой трубы, определяется выражением  $\frac{dA}{dt} = -2\pi r_1 V_1 P_1$ , где  $P_1$  — давление ПД на границе с наружной стенкой трубы. Исходя из закона сохранения энергии

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dA_c}{dt} = \frac{dE}{dt},$$

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{r_1 \ln(r_1/r_2)} \left\{ \left[ \frac{2\sigma_{so}}{\rho_1 \sqrt{3}} + \frac{2E'}{3} \ln(r_1 r_2) - V_1^2 \right] \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{V_1^2}{2} \left[ \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 - 1 \right] - \frac{P_1}{\rho_1} - \frac{2E'}{3} \int_{r_2}^{r_1} \frac{\ln(r^2 + r_{10}^2 - r_1^2)}{r} \cdot dr \right\}. \quad (5)$$

Одномерное движение газа описывается уравнениями

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\rho V}{r} = 0. \quad (6)$$

Уравнения (2), (3), (5), (6) образуют замкнутую систему, решение которой осуществлялось методом характеристик на ЭВМ.

Для определения значений  $\sigma_{so}$  и  $E'$  экспериментально строится зависимость  $V$  от  $S$  (кривая Г, рис. 1) для конкретного материала. На ЭВМ подбираются коэффициенты  $\sigma_{so}$  и  $E'$  в уравнении (4), позволяющие аппроксимировать эмпирическую зависимость. Предложенная методика позволяет определять динамические характеристики материала с точностью  $\pm 10\%$ .

Данная математическая модель позволяет описать процесс метания плоских вставок в клиновые пазы, используемый при изготовлении режущего инструмента. Эта задача является частным случаем схлопывания стенки трубы, сходящейся к линии пересечения граней паза. Принимается допущение о радиальном характере движения частиц материала вставки и о незначительном влиянии сил трения по боковым граням.