

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2023-11-282-12-15

В. В. Пай, д-р физ.-мат. наук, Я. Л. Лукьянов, с. н. с., Л. Л. Фрумин*, д-р физ.-мат. наук**О ВЛИЯНИИ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ
НА ПРОЦЕСС ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА***Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, pai@hydro.nsc.ru*** Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, lfrumin@yandex.ru*

В работах [1–4] разными методами измерения были получены величины коэффициентов вязкости металлов, причем их значения для одинаковых металлов различаются в разы, а в некоторых случаях на порядки. Одной из причин такого расхождения в результатах является использование уравнений Навье–Стокса с постоянным коэффициентом вязкости. В данной работе проведен численный расчет коллапса медной трубы с учетом зависимости коэффициента вязкости от температуры. Путем сравнения результатов такого расчета с данными работы [1] показано, что влияние изменения вязкости с ростом температуры сильно меняет динамику процесса сжатия трубы.

Ключевые слова: сварка взрывом, кумуляция, вязкость металла***V. V. Pai, Ya. L. Lukyanov, L. L. Frumin******ABOUT INFLUENCE OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF VISCOSITY COEFFICIENT
ON THE PROCESS OF HIGH-SPEED DEFORMATION OF METAL***Lavrentyev Institute of hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, pai@hydro.nsc.ru*** Institute of automation and electrometry SB RAS, Novosibirsk, lfrumin@yandex.ru*

In [1–4], different measurement methods were used to obtain the values of viscosity coefficients of metals, and their values for the same metals differ by times, and in some cases by orders of magnitude. One of the reasons for this discrepancy in the results is the use of Navier-Stokes equations with a constant viscosity coefficient. In this paper, a numerical calculation of the collapse of a copper pipe is carried out, taking into account the dependence of the viscosity coefficient on temperature. By comparing the results of this calculation with the data of [1], it is shown that the effect of viscosity change with temperature increase strongly changes the dynamics of the pipe compression process.

Keywords: explosive welding, cumulation, metal viscosity

Процессу экспериментального определения вязкости металлов при их высокоскоростном деформировании посвящен ряд работ [1–4]. Разные методы измерения величин коэффициентов вязкости одинаковых металлов, примененные в этих работах, дали значения, различающиеся в разы, а в некоторых случаях на порядки. Например, в работах [1, 4] значения коэффициентов вязкости меди различаются в 3 раза. Из сравнения результатов вышеперечисленных работ следует, что использование уравнений Навье–Стокса для вычисления величин коэффициентов вязкости по полученным экспериментальным данным позволила авторам [1–4] получить только их некоторые интегральные значения, зависящие от характера процесса деформации.

Рассмотрим здесь влияние условий деформации меди в работах [1] и [4] на трехкратное расхождение значений коэффициента вязкости, определенного разными методами. В работе [1] коэффициент вязкости вычисляется по деформации метки при соударении медных пластин в условиях сварки взрывом. При этом, конфигурация метки сопоставляется с рассчитанной по модели Навье–Стокса в области, не включающей зону волнообразования, где как скорости деформации, так и сами деформации на порядки превышают таковые в области их сравнения. Вычисленный таким образом динамический коэффициент вязкости оказался равен $2,0 - 2,7 \cdot 10^5$ пуаз.

В работе [4], путем измерения зависимости скорости сжатия медной трубки от вре-

мени и сравнения с результатами расчетов, выполненных в предположении постоянства коэффициента вязкости, получено значение $0,7 \cdot 10^5$ пуаз. Как следует из работы [4], основные диссипативные процессы, отвечающие за торможение процесса сжатия трубки, происходят на заключительной стадии ее сжатия, не допуская ее полного коллапса. Рассчитанная температура внутренних слоев трубки при этом превышает 10^5 К, что указывает на неприменимость модели вязкой несжимаемой жидкости с постоянным значением коэффициента вязкости для описания этого процесса.

В данной работе численно исследуется процесс инерционного сжатия медной трубы в двумерной постановке с учетом зависимости коэффициента вязкости от температуры.

Рассмотрим осесимметричное инерционное сжатие медной трубы (кольца) в двумерной постановке (Рис. 1). Плотность

меди $\rho = 8930$ кг/м³, теплоемкость $C = 383$ Дж/кг · град, начальная температура $T = 20^0$ С, коэффициент вязкости $\nu(T)$, внутренний и внешний начальные радиусы кольца $R(0) = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $R_1(0) = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м соответственно, начальная скорость внутренней поверхности кольца $V(0) = \dot{R}(0) = 10^3$ м/с, теплообменом пренебрегаем. Уравнение движения внутренней поверхности цилиндрической оболочки [4]:

$$\frac{d}{dt} \left[\pi \rho (R \dot{R})^2 \ln \frac{R_1}{R} \right] = - \int_R^{R_1} \frac{8 \pi \rho \nu(T) (R \dot{R})^2 dr}{r^3} \quad (1)$$

т.к. мощность диссипативных потерь на единицу объема в жидкой частице с координатой $r(t)$ [4]

$$N = \frac{4 \rho \nu R^2 V^2}{r^4},$$

где $\nu = \nu(T)$

Тогда изменение температуры в этой частице:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{4 \nu(T) R^2 V^2}{C r^4}, \quad \frac{dT}{\nu(T)} = \frac{4 R^2 V dR}{C r^4} \quad (2)$$

В левой части уравнения (1) стоит произ-

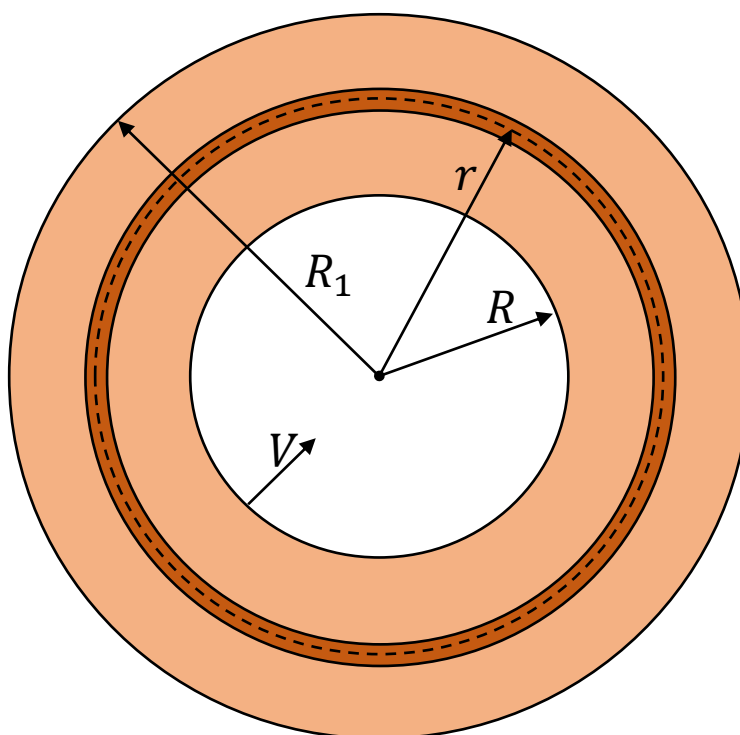


Рис. 1. Осесимметричное инерционное сжатие медной трубы (кольца) в двумерной постановке

водная по времени от кинетической энергии кольца, а в правой части мощность диссипативных потерь из-за вязкости. Сделав замену $\frac{d}{dt} = V \frac{d}{dR}$, перейдем к уравнению:

$$\frac{dV}{dR} + \frac{1}{R} \left(1 + \frac{\frac{R^2}{R_1^2} - 1}{2 \ln \frac{R_1}{R}} \right) V + \frac{4}{\ln \frac{R_1}{R}} \int_R^{R_1} \frac{v(T(r)) dr}{r} = 0 \quad (3)$$

Решая численно совместно уравнения (2) и (3), получим зависимость скорости внутренней поверхности от радиуса $\dot{R}(R)$, температуры $T(r, R)$, вида функции $v = v(T)$. Для расчета кольцо разбивалось на 10^5 слоев одинаковой толщины и выполнялось 10^6 шагов по радиусу. На рисунке 2 (а) приведены зависимости скорости внутренней поверхности кольца $\dot{R}(R)$ от его внутреннего радиуса для $v = v_0 = 0,625 \text{ м}^2/\text{с}$ и 2 (б) для $v = v(T)$, где $v = v_0 = 0,625 \text{ м}^2/\text{с}$ в интервале температур от комнатной до 720°С и линейно спадает до $v = 0,382 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ при температуре $T = 1080^\circ \text{С}$ (вязкость расплавленной меди [5]), после чего с повышением температуры остается неизменной.

Как видно из сравнения этих двух расчетов, в случае постоянной вязкости радиус остановки равен $R_* \approx 1,07 \text{ мм}$ (рис. 2 а), а с учетом зависимости вязкости от температуры (рис. 2 б) сжатие кольца продолжается. При этом динамика движения внутренней поверхности начиная с радиуса 3 мм сильно различается. Следовательно, значение коэффициента вязкости металла, полученное путем сравнения экспериментальной зависимости $\dot{R}(R)$ с рассчитанной по модели вязкой несжимаемой жидкости с постоянным коэффициентом вязкости, будет зависеть от фазы движения. Например, величина коэффициента вязкости, полученная по измеренному радиусу остановки коллапсирующей трубы, может, сколь угодно сильно отличаться от вычисленной по начальному участку кривой ее сжатия.

Таким образом, результаты численных расчетов показали, что для экспериментального определения коэффициента вязко-

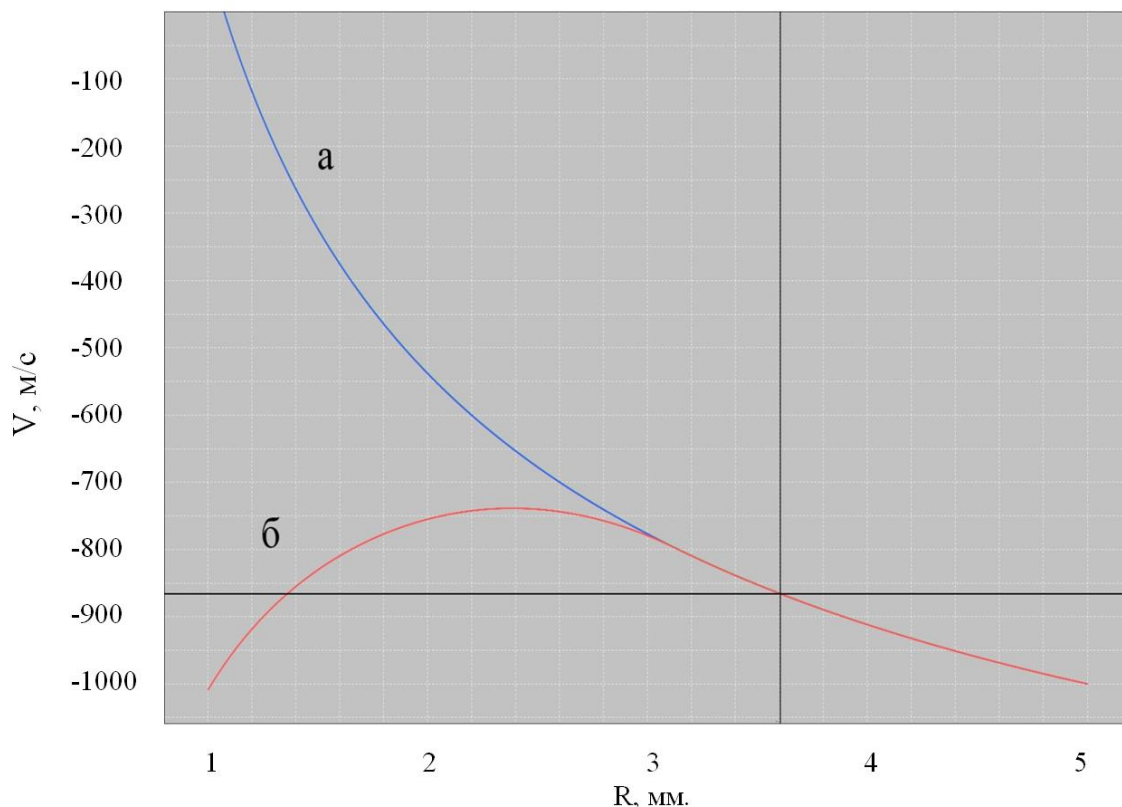


Рис. 2. Зависимости скорости внутренней поверхности кольца от его внутреннего радиуса

сти при высокоскоростном деформировании металлов необходимо учитывать зависимость этого коэффициента от температуры.

Библиографический список

1. Дерибас, А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерибас. – 2-е изд. доп. перераб. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.
2. Ильюшин, А. А. Инженерный сборник = Engineering review / кол. авт. Академия наук СССР, Институт механики; отв. ред. А.А. Ильюшин, Ю.Н. Работнов. –

Москва: Издательство Академии наук СССР, 1941. – т. 1, вып. 1. – 140 с.

3. Экспериментальное исследование устойчивости ударных волн и механических свойств вещества при высоких давлениях и температурах / А. Д. Сахаров, Р. М. Зайдель, В. Н. Минеевы, Л. Г. Олейник // Доклады Академии наук СССР. – 1964. – Т.159, N 5. – С.1019-1022.

4. Матюшкин, Н. И. О некоторых эффектах при взрывном обжатии вязкой цилиндрической оболочки / Н. И. Матюшкин, Ю. А. Тришин // Прикладная механика и техническая физика. – 1978. – № 3. – С. 99-112.

5. Борздыка, А. М. Методы горячих механических испытаний металлов / А. М. Борздыка. – Москва : Металлургиздат, 1955. – 352 с.