

## ОБ ИЗМЕРЕНИИ СКОРОСТИ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ

М. В. Рубцов

При сварке взрывом металлических пластин в режиме струеобразования часто скорость струи определяют из сравнения длин струй на рентгеновских снимках [1, 2] (рис. 1). Скорость струи получается согласно формуле

$$U_c = U_k + U_1 l_1 / l_2, \quad (1)$$

где  $U_k$  — скорость точки контакта;  $U_1$  — скорость втекания металла в системе точки контакта;  $l_1$  и  $l_2$  — длины кумулятивной и пестовой струй соответственно.

Процесс соударения металлических пластин условно можно разбить на два этапа:

1) струи только начинают образовываться, процесс существенно нестационарный;

2) струи сформировались и происходит лишь увеличение их длины. В этом случае процесс можно считать стационарным в системе точки контакта.

Ясно, что зафиксированная в некоторый момент времени на рентгеновском снимке картина процесса несет информацию не только о втором этапе, но и о первом, т. е. длины  $l_1$  и  $l_2$  можно представить в виде

$$\begin{aligned} l_2 &= l_2' + \lambda_0, \\ l_1 &= l_1' + \Delta l_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $l_2'$  — длина пестовой струи без длины начального участка  $\lambda_0$ , соответствующего этапу формирования струи;  $\Delta l_1$  — длина начального участка кумулятивной струи. В принципе скорость струи должна определяться формулой

$$U_c = U_k + U_1 l_1' / l_2'. \quad (3)$$

Вопрос о размерах начального участка важен, поскольку для обоснования справедливости формулы (1) необходимо показать, что эти размеры невелики по сравнению с длинами  $l_1$  и  $l_2$  на рентгеновских

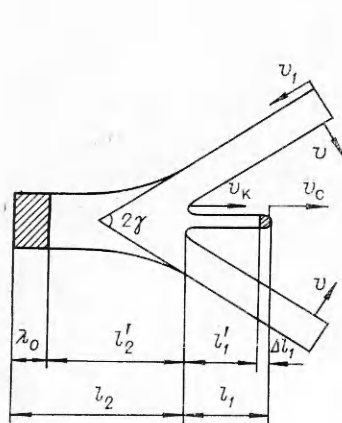


Рис. 1.

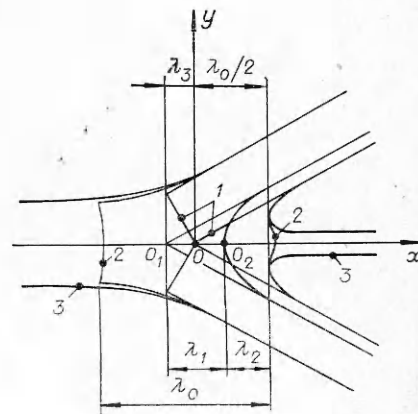


Рис. 2.

снимках. В работе на основе нескольких предположений оценивается наименьшая длина начального участка струй. Показывается, что с уменьшением угла соударения струй начальный участок неограниченно возрастает, хотя для обычных режимов струеобразования его размеры невелики.

1. Рассмотрим процесс соударения двух идеальных жидких пластин, имеющих прямоугольную форму, в системе точки контакта (рис. 2, граница 1).

Пусть деформация происходит таким образом, что после слияния пластин область течения односвязна (нет разбрызгивания) и ограничена гладкой границей 2, лежащей внутри границы 3, соответствующей установившемуся течению. Предположим, что стационарное течение начинается сразу, как только появляются точки перегиба на границе 2 (начинает «выпучиваться» кумулятивная струя), т. е.  $\Delta l_1 = 0$ .

Введенные предположения (об идеальной жидкости, отсутствии разбрызгивания, о выходе на стационарный режим) вполне объяснимы. Известно, что при высокоскоростных соударениях металлы имеют ненулевую вязкость [3], однако ее учет, вероятнее всего, только увеличит длину начального участка. Вязкость металлов может препятствовать разбрызгиванию материала в начале соударения, а относительно малая толщина кумулятивной струи обосновывает правдоподобность третьего предположения.

2. Выберем начало координат в точке  $O$  (см. рис. 2). Обозначим через  $\lambda_0/2$  расстояние от начала координат до границы раздела 2 в момент выхода на стационарный режим. Для  $\lambda_0/2$  справедливо выражение

$$\lambda_0/2 = \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3,$$

где  $\lambda_1$  — расстояние от точки соударения  $O_1$ , образованной пересечением асимптоты нулевой линии тока с осью  $x$ , до критической точки  $O_2$ ;  $\lambda_2$  — расстояние от критической точки  $O_2$  до границы 2 в момент выхода на стационарный режим;  $\lambda_3$  — расстояние от начала координат до точки  $O_1$ . Поскольку процесс деформации металла идет в обе стороны от начала координат, то естественно предположить, что вся длина начального участка

$$\lambda_0 = 2(\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3). \quad (4)$$

Если учесть, что  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  определены как точки области течения в момент выхода на стационарный режим, то для их нахождения можно использовать решение стационарной задачи о соударении двух плоских идеальных струй [4].

3. Для нахождения  $\lambda_1$  запишем решение задачи о стационарном симметричном течении с критической точкой при соударении двух одинаковых плоских идеальных струй:

$$\begin{aligned} \pi w/U &= h_1 \ln(1-v/a_1) + h_2 \ln(1-v/a_2) - k_1 \ln(1-v/b_1) - k_2 \ln(1-v/b_2); \\ \pi z/U &= h_1 \ln(1-v/a_1)/a_1 + h_2 \ln(1-v/a_2)/a_2 - \\ &- k_1 \ln(1-v/b_1)/b_1 - k_2 \ln(1-v/b_2)/b_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $w, z, v$  — соответственно комплексный потенциал  $\varphi + i\psi$ , комплексная координата  $x + iy$ , комплексно-сопряженная скорость  $v_x - iv_y$ ;  $h_1, h_2, k_1, k_2$  — толщины набегающих и расходящихся струй на бесконечности;  $a_1, a_2, b_1, b_2, U$  — комплексно-сопряженные скорости и модуль скорости на бесконечности. В рассматриваемом случае

$$\begin{aligned} h_1 &= h, & k_1 &= h(1 - \cos \gamma), & a_1 &= -Ue^{-i\gamma}, & b_1 &= -U, \\ h_2 &= h, & k_2 &= h(1 + \cos \gamma), & a_2 &= -Ue^{i\gamma}, & b_2 &= -U. \end{aligned} \quad (6)$$

В решении (5) начало координат выбрано в критической точке. Чтобы определить  $\lambda_1$ , надо найти уравнение асимптоты линии тока  $\psi=0$ . Вдали от критической точки ( $|z/h| \gg 1$ ) вдоль нулевой линии тока представим  $v$  в виде

$$\begin{aligned} v &= -U\rho e^{-i(\gamma+\alpha)}, \\ |1-\rho| &\ll 1, \\ |\alpha| &\ll 1. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), выделяя из первого уравнения (5) мнимую часть и приравнявая ее к нулю ( $\psi=0$ ), приходим к соотношению:

$$\rho \sin \alpha / (1 - \rho \cos \alpha) = \operatorname{tg} (\pi \cos \gamma / 2). \quad (8)$$

Подставляя (8) в первый член второго уравнения системы (5), разделяя действительную и мнимую части, получим систему

$$\begin{aligned} \pi (x \cos \gamma + y \sin \gamma) / h &= -\ln (1 - \rho \cos \alpha) + \ln [\cos (\pi \cos \gamma / 2)] + \\ &+ \gamma \sin^2 \gamma \ln (2 \sin \gamma) + \cos \gamma \ln [\operatorname{tg} (\gamma / 2)] + \\ &+ (\pi \sin \gamma) / 2 - \gamma \sin \gamma \cos \gamma (\pi / 2 - \gamma); \\ \pi (y \cos \gamma - x \sin \gamma) / h &= [\gamma \sin (2\gamma) \ln (2 \sin \gamma) / 2 - \sin \gamma \ln [\operatorname{tg} (\gamma / 2)] - \\ &- \gamma (\gamma - \pi / 2) \sin^2 \gamma, \end{aligned}$$

из которой следует уравнение асимптоты

$$\begin{aligned} y &= x \operatorname{tg} \gamma + [h / (\pi \cos \gamma)] [(\gamma \sin (2\gamma) \ln (2 \sin \gamma)) / 2 - \\ &- \sin \gamma \ln (\operatorname{tg} (\gamma / 2)) + \gamma (\pi / 2 - \gamma) \sin^2 \gamma]. \end{aligned} \quad (9)$$

Полагая в (9)  $y=0$  и взяв  $x$  по модулю, получим

$$\lambda_1 = h [\gamma \cos \gamma \ln (2 \sin \gamma) - \ln (\operatorname{tg} (\gamma / 2)) + \gamma (\pi / 2 - \gamma) \sin^2 \gamma] / \pi. \quad (10)$$

Зависимость  $\lambda_1(\gamma)$  изображена на рис. 3, 1.

Для нахождения  $\lambda_2$  представим скорость  $v$  в виде  $v = U\rho e^{-i\beta}$ , подставим  $v$  в (5) и разделим во втором уравнении (5) действительную и мнимую части:

$$\begin{aligned} -\pi x / h &= (\cos \gamma / 2) \{ \ln (1 + 2\rho \cos (\gamma - \beta) + \rho^2) + \ln (1 + 2\rho \cos (\gamma + \beta) + \\ &+ \rho^2) \} + [(1 - \cos \gamma) / 2] \ln (1 - 2\rho \cos \beta + \rho^2) - [(1 + \cos \gamma) / 2] \ln (1 + \\ &+ 2\rho \cos \beta + \rho^2) - \sin \gamma \left\{ \operatorname{arctg} \left[ \frac{\rho \sin (\gamma - \beta)}{1 + \rho \cos (\gamma - \beta)} \right] + \operatorname{arctg} \left[ \frac{\rho \sin (\gamma + \beta)}{1 + \rho \cos (\gamma + \beta)} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \pi y / h &= (\sin \gamma / 2) \{ \ln (1 + 2\rho \cos (\gamma - \beta) + \rho^2) - \ln (1 + \\ &+ 2\rho \cos (\gamma + \beta) + \rho^2) \} + (1 - \cos \gamma) \operatorname{arctg} \left[ \frac{\rho \sin \beta}{1 - \rho \cos \beta} \right] + \\ &+ (1 + \cos \gamma) \operatorname{arctg} \left[ \frac{\rho \sin \beta}{1 + \rho \cos \beta} \right] + \cos \gamma \left\{ \operatorname{arctg} \left[ \frac{\rho \sin (\gamma - \beta)}{1 + \rho \cos (\gamma - \beta)} \right] - \right. \\ &\left. - \operatorname{arctg} \left[ \frac{\rho \sin (\gamma + \beta)}{1 + \rho \cos (\gamma + \beta)} \right] \right\}. \end{aligned}$$

Положим в первом уравнении системы (11)  $\rho=1$ ,  $\beta=\pi/2$ , тогда

$$\lambda_2 = h[\gamma \sin \gamma - \cos \gamma \ln(\cos \gamma)]/\pi.$$

Выражение для  $\lambda_3$  очевидно:

$$\lambda_3 = h(1 - \cos \gamma)/(2 \sin \gamma) = h \operatorname{tg}(\gamma/2)/2.$$

Зависимость  $\lambda_0(\gamma)$ , задаваемая выражением (4), показана на рис. 3, 2. Из рис. 3 видно, что длина начального участка в пределах углов соударения  $2\gamma=30\div 130^\circ$  (область струеобразования) оказывается примерно одинаковой и равной толщине пластины. Учет этой поправки на рентгеновских снимках дает добавку в 10% к величине  $l_1/l_2$ .

При малых углах соударения длина начального участка стремится к бесконечности, однако в эксперименте при этих углах реализуется режим волнообразования и полученные результаты оказываются неприменимыми. В работе приводится оценка наименьшей длины начального участка; реально же величина  $\lambda_0$  должна быть больше вследствие влияния вязких сил на скорость развития нестационарного процесса.

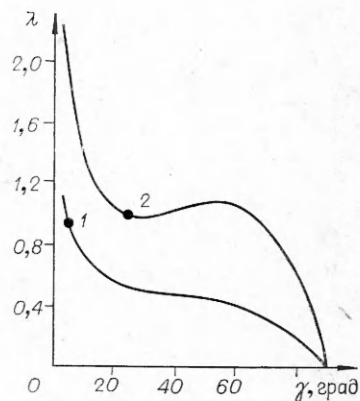


Рис. 3.

Красноярский  
государственный университет

Поступила в редакцию  
30/XI 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. К. Годунов, А. А. Дерибас, В. И. Мали. ФГВ, 1975, 11, 1.
2. А. А. Дерибас, И. Д. Захаренко. ФГВ, 1974, 10, 3.
3. С. К. Годунов, А. А. Дерибас и др. ФГВ, 1971, 7, 1.
4. Л. М. Милн-Томсон. Теоретическая гидродинамика. М., «Мир», 1964.

### О НЕКОТОРЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВЗРЫВОВ АЭРОДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

В. С. Сергеев, В. И. Кулиш, П. М. Петрухин,  
М. И. Нецепляев

Распространение пламени в трубах с постоянной скоростью практически невозможно. Как правило, оно распространяется с переменной скоростью. Исключение составляет только детонация.

Наиболее полно в настоящее время изучены ускоряющиеся пламена в газоздушных и газокислородных смесях, которые приводят к детонации или недетонационному горению с весьма большой скоростью [1]. В последнее время большое внимание уделяется исследованиям по изучению механизма воспламенения и развития взрыва аэродисперсных систем [2—4]. При этом, как правило, изучается горение системы газ —