

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ ПЛАЗМЫ, ПОЛУЧЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ ВЗРЫВНОГО ИСТОЧНИКА, НА ВНУТРЕНнюю ПОВЕРХНОСТЬ ПОЛОСТИ И КАНАЛА

В. И. Кирко

(Новосибирск)

В работе рассматривается воздействие плазмы, полученной с помощью взрывного плазменного компрессора, на внутреннюю поверхность полости и канала.

Методика экспериментов. Плазменный компрессор 1—5 (рис. 1), описан в работах [1, 2]. Плазма из компрессора поступала в полость 7 (в канал 9) в стальной ампуле 8. После заполнения полости плазма свободно вытекала через входной канал 6. После опыта из стенок полости (канала) в нескольких местах вырезались образцы для изготовления микрошлифов, проводились металлографические исследования и измерялась микротвердость.

Энергия плазменного сгустка измерялась по методике, описанной в [3]. Скорость движения сгустка по каналу, а также его размер измерялись с помощью СФР-2М. Энергия и удельная энергия плазмы в опытах варьировались соответственно от 5 до 200 кДж и от 20 до 160 кДж/г путем соответствующего подбора компрессора и рабочего вещества 3 в камере сжатия 4. В качестве рабочего вещества использовались $(C_8H_8)_n$ и $(C_6H_{10}O_5)_n$. Стенки полости и каналов готовились из Ст. 3 и Ст. 45.

Воздействие плазмы на внутреннюю поверхность канала. Допустим, что мимо некоторого участка поверхности канала проходит сгусток плазмы конечного размера L_0 со скоростью U_0 . Тогда время воздействия теплового потока на этот участок определяется отношением $\tau_0 = L_0/U_0$, а характерные времена нагрева поверхности этого участка до температур T_ϕ , T_π и T_k , в предположении постоянства потока энергии q на стенку могут быть рассчитаны по следующим выражениям [4]:

$$t_\phi = \frac{2}{3} \cdot \frac{\lambda \rho c (T_\phi)^2}{q^2}, \quad (1)$$

$$t_\pi = \frac{2}{3} \cdot \frac{\lambda \rho c (T_\pi)^2}{q^2}, \quad (2)$$

$$t_k = t_\pi + \frac{(T_k - T_\pi) L_{\pi k}}{q^2}, \quad (3)$$

где $T_k = \frac{T_k^0}{1 - \frac{RT_k^0}{L_k} \ln(\rho_0/\rho_k)}$; λ , ρ , c — теплопроводность, плотность

и удельная теплоемкость материала стенки; L_π , L_k — теплота плавления и кипения; T_ϕ , T_π — температура фазового перехода в стали $\alpha \rightarrow \gamma$ Fe и температура плавления; T_k , T_k^0 — температуры кипения стенки при давлении p_k и p_0 ; R — универсальная газовая постоянная; q — удельный поток энергии на стенку, определяемый из соотношений [5—7]:

$$q = \sigma T^4 + St \rho_0 U_0 H_0, \quad (4)$$

$$St = 0,66 Re^{-1/2} Pr^{-2/3}, \quad (5)$$

$$T = (\gamma - 1) E_0 / R N_0, \quad (6)$$

где St , Re , Pr — числа Стентона, Рейнольдса и Прандтля; E_0 , H_0 — полная энергия плазменного сгустка и его удельная энтальпия; N_0 — число

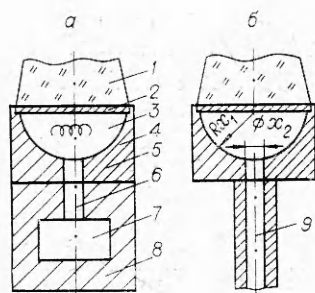


Рис. 1. Схема экспериментов по воздействию высокоэнтальпийной плазмы на стенки полости (а) и канала (б). 1 — заряд ВВ; 2 — метаемая пластина; 3 — рабочее вещество или газ; 4 — камера сжатия компрессора; 5 — выходное отверстие; 6 — выходной канал; 7 — полость; 8 — металлическая ампула; 9 — канал.

молей в плазме σ — постоянная Стефана — Больцмана; ρ_0 — плотность плазмы; γ — эффективный показатель адиабаты ($\gamma = 1,3$).

В зависимости от абсолютных значений времени τ_0 , t_ϕ , t_n и t_k могут наблюдаться различные структурные изменения на поверхности стального канала. В случае, когда $t_n > \tau_0 > t_\phi$, на поверхности образуется зона термического влияния, глубина которой может быть оценена с помощью уравнения [4]

$$T_\phi = q/2b\lambda \cdot (b-y)^2, \quad (7)$$

где $b = \sqrt{6a\tau_0}$. Из этого уравнения следует, что увеличение τ_0 приводит к возрастанию зоны термического влияния.

Если $\tau_0 > t_n$, то поверхность рассматриваемого элемента канала успеет расплавиться за время прохождения сгустка плазмы. Кроме зоны термического влияния здесь появится зона расплава, глубина которой также будет возрастать с увеличением τ_0

$$\delta = q/L_n \rho \cdot (\tau_0 - t_n). \quad (8)$$

Если же в начале движения сгустка $\tau_0 < t_n$, а в конце $\tau_0 > t_n$, следует ожидать в начале канала только зону термического влияния, а в конце — зоны расплава и термического влияния. Поскольку плазма из компрессора имеет высокую скорость ($\sim 10^6$ см/с) и высокую плотность ($\sim 0,5$ г/см³), то в канале, по которому двигается плазменный поток, может реализоваться случай, когда происходит частичный или полный унос расплава с поверхности. При этом глубина снесенного слоя (в предположении постоянного теплового потока на стенку q) не превышает [8]

$$l_m \approx q/\tau \cdot (L_n + cT_n) \rho, \quad (9)$$

где τ — время прохождения сгустком рассматриваемого элемента поверхности, отсчитываемое с момента появления расплава.

Используя экспериментальные данные по энергии, удельной энергии и скорости плазмы, можно рассчитать τ_0 , t_ϕ и t_n , а также удельные потоки энергии на стенку.

Результаты экспериментов. Металлографический анализ микрошлифов показал, что поверхностный слой стенок полости и канала обычно состоит (рис. 2) из зоны застывшего расплава *A* и зоны термического влияния *B*. Между зонами *A*, *B* и *C* проходят резкие границы, которые соответствуют двум температурам: T_n и T_ϕ . Зона *A*, как показано в работе [9], состоит из мартенсита, микротвердость которого достигает 1200 кг/мм² в случае воздействия плазмой на стенки из Ст. 3 и Ст. 45. Для сравнения укажем, что микротвердость малоуглеродистой стали при закалке обычными методами увеличивается на 130 кг/мм², а при комбинированных обработках (термомеханическое упрочнение) на 250 кг/мм² [10]. Образование мартенсита высокой микротвердости, а также существование резких границ между зонами свидетельствуют [10, 11], что на стенку полости и канала поступает поток энергии не менее 10^{12} — 10^{13} эрг/(см²·с), а скорости нагрева и охлаждения поверхности такие же, как и при лазерном облучении материалов, т. е. $\sim 10^8$ град/с.

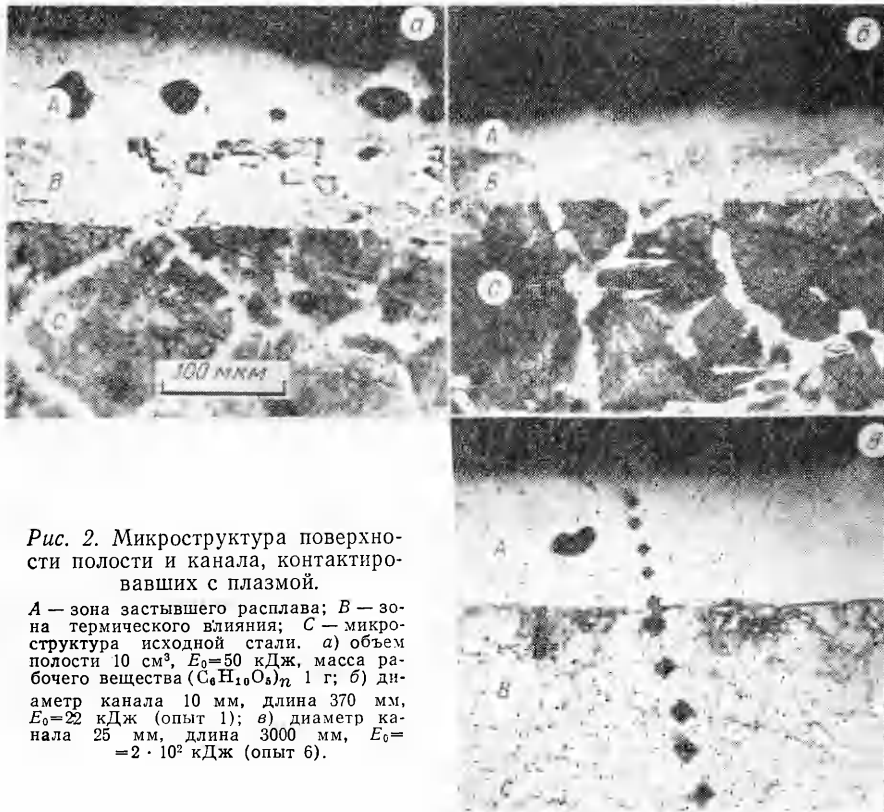


Рис. 2. Микроструктура поверхности полости и канала, контактировавших с плазмой.

А — зона застывшего расплава; В — зона термического влияния; С — микроструктура исходной стали. а) объем полости 10 см³, $E_0=50$ кДж, масса рабочего вещества $(C_6H_{10}O_8)_n$ 1 г; б) диаметр канала 10 мм, длина 370 мм, $E_0=22$ кДж (опыт 1); в) диаметр канала 25 мм, длина 3000 мм, $E_0=2 \cdot 10^2$ кДж (опыт 6).

В таблице приведены параметры опытов по воздействию плазмы на стенки канала, а также результаты измерений микротвердости образовавшихся зон расплава и термического влияния. В этом случае, так же как и после воздействия плазмой на стенки полости, на поверхности образуются зоны термического влияния и зоны застывшего расплава сильно повышенной микротвердости, достигающей 1200 кг/мм² (опыт 3). При этом глубина зоны термического влияния и зоны расплава, если такая существует, возрастает с расстоянием от сопла компрессора (рис. 3). Это объясняется, как было показано в предыдущем разделе, увеличением времени t_0 за счет замедления сгустка плазмы и за счет его расширения.

Измерения, проведенные методом контактных датчиков, показали, что в условиях опыта 1, скорость ударной волны в стальной трубке изменяется от 31 до 18 км/с на расстоянии 10 см от сопла компрессора. Это соответствует тому, что скорость плазмы относительно стенок канала изменяется от 28 до 15 км/с [12]. При этом, как показали эксперименты, проведенные с помощью камеры СФР-2М, размер сгустка L_0 изменяется от 1,5 до 3 см. Используя выражения (1)–(6), можно показать, что:

$$\begin{aligned} t_{\Phi}^H &= 10^{-7} \text{ с}, & t_{\Phi}^K &= 3 \cdot 10^{-7} \text{ с}, \\ t_{\Pi}^H &= 3 \cdot 10^{-7} \text{ с}, & t_{\Pi}^K &= 7 \cdot 10^{-7} \text{ с}, \\ \tau_0^H &= 5 \cdot 10^{-7} \text{ с}, & \tau_0^K &= 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}, \\ \delta^H &= 3 \cdot 10^{-4} \text{ см}, & \delta^K &= 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}, \end{aligned}$$

где индекс н относится к элементам поверхности канала, находившимся на расстоянии 0÷5 см от сопла компрессора, а индекс к — на расстоянии 10÷15 см.

номер опыта	Параметры компрессора					Параметры канала				H_p , кг/мм ²				
	R_{x1} , мм	R_{x2} , мм	материал пластины	толщина пластины, мм	вес ВВ, г	рабочее вещество	вес рабочего вещества, г	энергия плазмы, кДж	материал	длина, мм	диаметр, мм	в зоне термического влияния	в зоне расплава	исходная
1	38	8	Al	2	700	воздух	0,2	22	Ст. 45	370	10	720 ÷ 1050	720 ÷ 990	270
2	38	8	Ст.	1	700	ВК-20	1	80	Ст. 45	300	10	880 ÷ 1100	830 ÷ 1100	200
3	38	8	Al	2	270	(C ₈ H ₈)	2,5	76	Ст. 45	100	14	520 ÷ 1200	680 ÷ 720	200
4	19	4	Al	2	70	(C ₈ H ₈)	0,2	8	Ст. 45	40	4	780 ÷ 1050	Расплава нет	200
5	19	4	Al	2	70	(C ₈ H ₈)	0,2	8	Ст. 45	40	3	420 ÷ 1200	Расплава нет	200
6	80	25	Al	5	6000	воздух	1	2 · 10 ²	Ст. 3	3000	25	190 ÷ 320	340 ÷ 620	160

Металлографический анализ микрошлифов показал, что сплошная зона застывшего расплава в опыте 1 начинается только с расстояния 20 см от компрессора. На поверхности первых 20 см имеются отдельные области застывшего расплава. Их глубина на расстоянии 4 см равна $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ см, а на расстоянии 10 см $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ см, что достаточно хорошо согласуется с глубинами, полученными расчетным путем. В опыте 6 зона застывшего расплава покрывала всю поверхность канала и имела среднюю микротвердость $H_p = 400$ кг/мм² на площади $1,5 \cdot 10^3$ см².

Чисто металлографически трудно отличить случай, когда плазменный ступок проходил по каналу, нагревая его до температуры выше T_{ϕ} , и случай, когда плазменный поток полностью уносит образовавшийся расплав с поверхности. В обоих вариантах наблюдается только зона термического влияния. С целью их отличия ставились контрольные опыты, где в канал помещался пробный снаряд, диаметр которого в два раза меньше диаметра канала. Уменьшение веса снаряда, а также отсутствие расплава на поверхности снаряда и стенках канала, свидетельствовали об уносе расплава плазмой. Так, в опыте 2 в начале канала на расстоянии 2 см от компрессора на стенках канала расплава не обнаружено. Два контрольных опыта показали, что при помещении в канал снаряда его вес уменьшается от 6500 до 6360 мг и от 4610 до 4370 мг. Это соответствует тому, что с 1 см² поверхности снимается слой $1,9 \cdot 10^{-3}$ и $2,2 \cdot 10^{-3}$ см. Оценка по формуле (9), если положить $q = 10^{14}$ эрг/(см²·с) и $\tau = 2 \cdot 10^{-6}$ с, дает значение $l_m = 2,3 \cdot 10^{-3}$ см, что согласуется с экспериментальными данными.

Итак, экспериментально и расчетами показано, что при контакте плазмы из взрывного источника с поверхностью полости или канала удельный поток энергии на стенку достигает $10^{12} - 10^{14}$ эрг/(см²·с), а скорость нагрева и охлаждения стенки достигает $\sim 10^8$ град/с. Эти условия нагрева и охлаждения подобны тем, которые обычны при лазерном и электронно-лучевом облучении материалов. При воздействии плазмы на стенки из низко- и среднеуглеродистой стали на поверхности образуется упроченный слой, микротвердость



Рис. 3. Изменение глубины зоны застывшего расплава и зоны термического влияния в опыте 6 (а) и в опыте 1 (б).

x — расстояние от компрессора; d — диаметр канала; y — глубина зоны термического влияния.

которого достигает 1200 кг/мм^2 . Подбирая соответствующие параметры плазмы, можно добиться различных структурных превращений в стенке, что может быть важно при практическом использовании данного воздействия.

Автор выражает свою признательность А. А. Дерibasу и А. Е. Войтенко за обсуждение результатов работы.

Поступила в редакцию
16/XI 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Войтенко. Докл. АН СССР, 1964, 158, 6.
2. А. Е. Войтенко. ПМТФ, 1966, 112, 4.
3. А. Е. Войтенко, В. И. Кирко. ФГВ, 1975, 11, 6.
4. Б. А. Урюков. Изв. СО АН СССР. Серия техн. наук, 1975, 2, 21, 8.
5. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М., Гостехиздат, 1952.
6. С. И. Анисимов, Я. А. Имас и др. Действие излучения большой мощности на металлы. М., «Наука», 1970.
7. Л. Г. Лойцанский. Механика жидкости и газа. М., «Наука», 1976.
8. Х. С. Карслоу, Д. К. Эгер. Теплопроводность твердых тел. М., «Наука», 1964.
9. Н. В. Губарева, В. И. Кирко, Т. М. Соболенко. ФГВ, 1977, 13, 3.
10. Т. М. Аверьянова, Л. И. Миркин и др. ПМТФ, 1965, 6, 84.
11. А. А. Углов, Н. Н. Рыкалин, А. Н. Кокора. Лазерная обработка материалов. М., Машиностроение, 1975.
12. Н. М. Кузнецов. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М., Машиностроение, 1965.
13. А. А. Дерibas, Н. В. Губарева и др. — В сб.: Тезисы докладов и сообщений Всесоюзного научно-технического совещания «Новые методы нанесения покрытий напылением». 12—14 октября 1976 г. Ворошиловград, 1976.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ДЕТОНАЦИИ ОДНОРОДНЫХ ВВ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

А. Г. Антипенко, А. Н. Дремин, В. В. Якушев

(Черноголовка)

В работах [1—3] для изучения инициирования детонации конденсированных ВВ использовалось явление ударной поляризации. Метод основан на том, что характерные особенности электрических сигналов связаны с определенными фазами процесса инициирования. В ряде слу-