

ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов Б. В. Взаимодействие газовых ионов с поверхностью металла // *Аэродинамика разреженных газов: Сб. ст./Ленингр. гос. ун-т.*— 1967.— Вып. 3.
2. Шувалов В. А., Резниченко Н. П., Гаврилов А. В. Исследование параметров взаимодействия потока разреженной плазмы с электропроводящими поверхностями с помощью термоанемометрических зондов // *ТВТ.*— 1981.— Т. 19, № 3.
3. Арифов У. А. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твердого тела.— М.: Наука, 1968.
4. Каминский М. Атомные и ионные столкновения на поверхности металла.— М.: Мир, 1967.
5. Фоменко В. С., Подчерняева И. А. Эмиссионные и адсорбционные свойства материалов.— М.: Атомиздат, 1975.
6. Шувалов В. А. Об аккомодации энергии газовых ионов на поверхностях поликристаллов // *ПМТФ.*— 1983.— № 6.
7. Parker J. H. Electron ejection by slow positive ions incident on flashed and gas-covered metallic surfaces // *Phys. Rev.*— 1954.— V. 93, N 6.
8. Ковтуненко В. А., Камеко В. Ф., Яскевич Э. П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов.— Киев: Наук. думка, 1977.
9. Грановский В. А. Электрический ток в газе.— М.: Гостехиздат, 1952.
10. Weber W. J., Armstrong R. J., Trulsen J. Ion-beam diagnostics by means of an electron-saturated plane Langmuir probe // *J. Appl. Phys.*— 1979.— V. 50, N 7.
11. Sanmartin J. R. End effect in Langmuir probe response under ionospheric satellite conditions // *Phys. Fluids.*— 1972.— V. 15, N 6.
12. Шувалов В. А. Об определении интегральной излучательной способности электропроводящих материалов с помощью термоанемометрических зондов // *ТВТ.*— 1984.— Т. 22, № 3.
13. Наседкин Ю. Ф., Левадный Г. Б. и др. Зондовая диагностика пучково-плазменного разряда в электроотрицательных средах // *ТВТ.*— 1985.— Т. 23, № 1.
14. Шувалов В. А., Чурилов А. Е., Турчин В. В. О диагностике струи разреженной плазмы с применением зондового и СВЧ-методов // *ТВТ.*— 1978.— Т. 16, № 1.
15. Поуп Б. Конвективный теплообмен в критической точке при замороженном течении в пограничном слое // *PTR.*— 1968.— Т. 6, № 4.
16. Gilbert I., Scola S. Free molecular heat transfer in the ionosphere // *Interaction of space vehicles with the ionized atmosphere.*— N. Y.: Pergamon Press, 1965.
17. Гордеев А. Н., Колесников А. Ф., Труханов А. С., Якушкин М. И. Метод определения вероятностей рекомбинации атомов азота на материалах // VIII Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов: Тез. докл.— М.: МАИ, 1985.— Т. 1.
18. Жестков Б. Е. Гетерогенная рекомбинация атомов азота и кислорода на кварце и металлах // Взаимодействие разреженных газов с поверхностями: Тр. VIII Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов.— М.: МАИ, 1986.
19. Wood B. J., Wise H. Diffusion and heterogeneous reaction. II. Catalytic activity of solids for hydrogen-atom // *J. Chem. Phys.*— 1958.— V. 29, N 6.
20. Wood B. J., Wise H. Kinetics of hydrogen atom recombination on surfaces // *J. Phys. Chem.*— 1961.— V. 65, N 11.
21. Роберте М., Макки Ч. Химия поверхности раздела металл — газ.— М.: Мир, 1981.
22. Моррисон С. Химическая физика поверхности твердого тела.— М.: Мир, 1981.
23. Гуревич А. В., Смирнова В. В. К теории зондовых измерений в движущейся плазме // *Геомагнетизм и аэронавигация.*— 1970.— Т. 10, № 5.
24. Шувалов В. А., Резниченко Н. П., Губин В. В., Гаврилов А. В. Энергообмен гиперзвуковых потоков разреженного частично ионизованного газа с проницаемыми поверхностями // IX Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов: Тез. докл.— Свердловск: УрГУ, 1987.— Т. 1.
25. Шведов А. В. Расчет аэродинамических характеристик сетчатых поверхностей в гиперзвуковом свободномолекулярном потоке // *Материалы VIII Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов.*— М.: МАИ, 1985.

г. Днепропетровск

Поступила 6/VI 1988 г.

УДК 662.215

А. Е. Войтенко, Б. В. Свердличенко

ОБРАЗОВАНИЕ КРАТЕРА В МЕТАЛЛЕ УДАРОМ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ ПЛАЗМЫ

В последние годы большое внимание уделяется изучению локальных импульсных воздействий на металлы столь высокой интенсивности, что на поверхности металла образуется кратер за счет пластического течения, плавления или испарения материала. При применении взрывных устройств к числу таких воздействий относится кратерооб-

разование при высокоскоростном ударе твердым телом, действии металлической струи кумулятивного заряда, торможении струи продуктов взрыва кумулятивной трубки [1—4].

Настоящая работа посвящена исследованию кратерообразования в металле при ударе сгустком высокоэнтальпийной плазмы из взрывного генератора плазмы (ВГП).

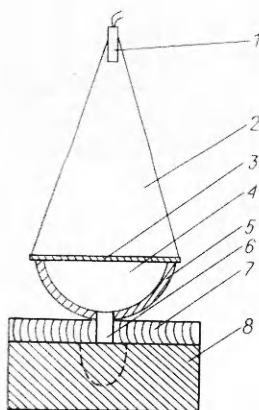
Использовавшееся экспериментальное устройство состоит из ВГП и металлической мишени. На рис. 1 приведена его схема: 1 — электродетонатор, 2 — заряд взрывчатого вещества, 3 — металлическая пластина-поршень, 4 — рабочий газ (воздух при нормальных условиях), 5 — полусферическая камера сжатия ВГП, 6 — отверстие для прохода плазмы, 7 — защитная прокладка, 8 — мишень. Деревянная прокладка предохраняет мишень от непосредственного удара металлической камерой сжатия. Цилиндрические мишени изготавливались из различных металлов и сплавов и имели диаметр, который в несколько раз превышал диаметр образующегося кратера. На рис. 1 кратер показан условно штриховой линией. Общее описание ВГП имеется в [5, 6].

В проведенных опытах применялся порошкообразный заряд из аммонита 6ЖВ массой 0,3 кг. Масса рабочего воздуха в камере сжатия 22 мг, Полная энергия плазмы 7 кДж была измерена калориметрическим методом [7]. Расчетная температура плазмы $\sim 2 \cdot 10^4$ К (без учета примесей, поступающих со стенок). Давление плазмы при характерном объеме 0,25 см³ порядка 10 ГПа. Плотность лучистого теплового потока из плазмы ~ 1 ГВт/м². Указанное давление плазмы превышает порог пластичности всех металлов, а плотность теплового потока достаточна для плавления и испарения поверхностного слоя уже при времени воздействия десятки микросекунд. Эти соображения позволяют предвидеть образование кратера при действии плазмы ВГП на поверхность металла. Задача исследования — получить характеристики кратера и установить основной механизм его образования: либо это пластическая деформация металла, либо выбрасывание его в жидкой или газовой фазе.

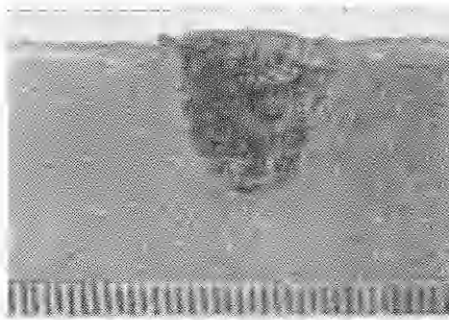
На рис. 2 приведена фотография осевого разреза мишени из Ст. 45 с кратером, который образован ударом плазмы в указанных условиях. Цена масштабного деления 1 мм. Край кратера окружен характерным валом затвердевшего при движении металла, который подобен валу, возникающему вокруг кратера при высокоскоростном ударе [1, 2]. Отношение глубины кратера к его диаметру для исследованных металлов находится в пределах $h/d = 1 \dots 2$. Можно отметить, что кратер при высокоскоростном ударе твердым телом имеет почти полусферическую форму $h/d \approx 0,5$, а каверна, образуемая кумулятивной струей, сильно удлинена ($h/d \gg 1$). Сопоставление этих данных указывает на корреляцию между временем воздействия и относительной глубиной кратера.

Движение материала мишени при образовании кратера наглядно запечатлено на разрезе мишени, составленной из чередующихся слоев стали и алюминия толщиной 1,5 мм (рис. 3). Изгиб пластин показывает, что две верхние пластины на последних фазах образования кратера двигались к свободной поверхности, т. е. навстречу удару, а более глубокие пластины двигались в направлении удара. Сильная остаточная деформация металлических пластин свидетельствует о наличии в момент удара нагрузок, превышающих предел упругости. Форма кратера и остаточная деформация слоев мишени, которые получаются в результате удара плазмой (рис. 2 и 3), оказались аналогичными тем, которые наблюдаются при высокоскоростном ударе твердым ударником [2].

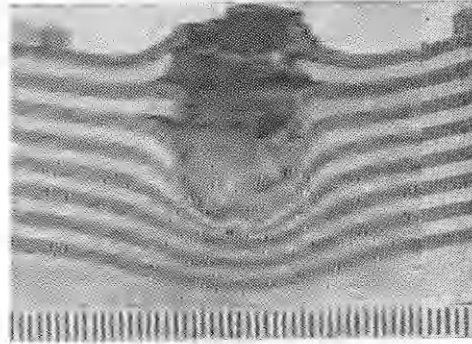
Установлен факт потери части массы мишени: вес ее после опыта становится меньше. Для стальных мишеней теряется объем материала, соответствующий примерно 10 % объема кратера. Таким



Р и с. 1



Р и с. 2



Р и с. 3

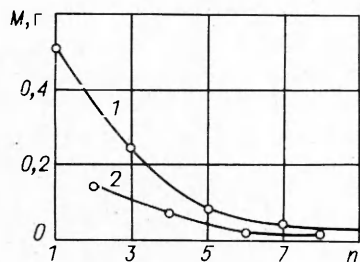
образом, при образовании кратера часть материала мишени выбрасывается, однако этот механизм кратерообразования не является основным.

Определена зависимость потери материала от глубины с помощью взвешивания пластин слоистой мишени, изображенной на рис. 3. На рис. 4 показана зависимость потерянной массы M от номера пластины n (счет пластин начат с поверхности мишени). Кривые 1 и 2 относятся соответственно к стальным и алюминиевым пластинам. Результаты опыта свидетельствуют о том, что выброс материала значительно уменьшается с ростом глубины.

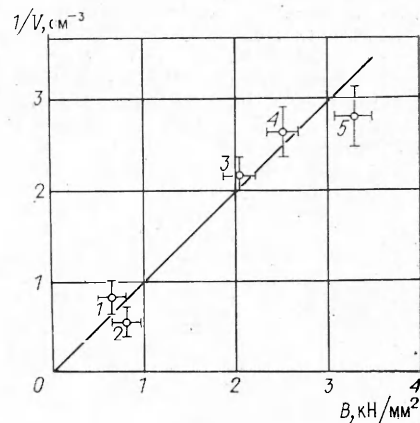
На рис. 5 представлена экспериментально определенная зависимость обратной величины $1/V$ объема кратера V от твердости мишени по Бринеллю B (материалы мишеней: 1 — медь, 2 — сплав алюминия АМц, 3 — Ст. 45, 4 — сплав 9ХС, 5 — сплав титана ВТЗ-1). Твердость мишеней измерялась до проведения опыта, температура мишеней перед опытом 15 ... 20 °С. Объем кратера определялся заполнением его водой из мерной бюретки. Воспроизводимость результатов проверена шестью идентичными опытами со стальными мишенями и оказалась $\sim 15\%$.

Зависимость на рис. 5 может быть представлена формулой $V = C(E/B)$, где C — постоянная, E — энергия плазмы. Аналогичное соотношение имеет место при высокоскоростном ударе твердым телом [1]. Различие состоит в численном значении постоянной: $C = 0,2$ в нашем случае и $C = 0,4$ при высокоскоростном ударе. Таким образом, при ударе плазменного сгустка на образование кратера идет примерно 20 % его энергии, а при высокоскоростном ударе твердым телом — примерно 40 % энергии ударника.

Поверхность стенки кратера имеет нерегулярные неровности (см. рис. 2). Полагаем, что неровности являются следствием известной тейлоровской неустойчивости ускоряющейся границы двух сред разной плотности, в данном случае — границы плазма — металл, хотя нельзя исключить, что неровности — это просто следствие неоднородности динамического напора струи плазмы.



Р и с. 4



Р и с. 5

Проведено металлографическое исследование разреза стенки кратера в Ст. 45 (травление в 4 %-ном растворе азотной кислоты в спирте). На микрошлифах отчетливо выделяются два слоя интенсивного термического влияния горячей плазмы. Поверхность кратера покрыта светлым слоем застывшего расплава без различимой кристаллической структуры (его толщина в различных местах кратера от 10 до 100 мкм). Расчетная оценка дает скорость охлаждения расплавленного слоя более 10^5 К/с за счет быстрого отвода теплоты в глубь холодного металла. При столь больших скоростях охлаждения обычно образуется аморфный металл, что можно предположить и в рассматриваемых условиях. Объем сохранившегося слоя расплава составляет менее 1 % объема кратера.

На стенках кратера в светлом слое имеется множество микропор. Поры являются, по-видимому, следствием выхода паров металла при объемном вскипании слоя перегретого металла в результате резкого уменьшения давления плазмы. На возможность этого процесса указано в [8]. Кроме пор на поверхности стенок кратера в некоторых местах имеются микротрещины, причина появления которых не установлена. Под слоем застывшего расплава расположен слой закаленного металла с увеличенной микротвердостью (его толщина ~ 50 мкм). Слой закалки — также результат нагрева поверхности плазмой и последующего быстрого охлаждения теплоотводом в холодный металл, но пиковая температура и скорость охлаждения меньше, чем в первом слое. Образование подобных слоев расплава и закалки стальных стенок наблюдалось ранее при прохождении плазмы из ВГП по трубке и при заполнении ею полости [9].

Под указанными двумя слоями теплового влияния плазмы находится исходный материал, отличающийся на микрошлифах только некоторой вытянутостью кристаллов по направлению, примерно параллельному стенке кратера. При удалении от кратера растяжение кристаллов уменьшается. Наличие подобной микроструктуры свидетельствует о происшедшем пластическом течении металла.

Описанный феномен кратерообразования ударом высокоэнтальпийной плазмы есть еще один пример импульсного интенсивного воздействия на металл, приводящий к разрушению его поверхности. Совокупность установленных фактов позволяет утверждать, что в данном случае основной механизм образования кратера — пластическое течение металла под действием высокого давления плазмы. Тепловое действие плазмы сказывается в основном в появлении слоев термического влияния на стенках кратера.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Высокоскоростные** ударные явления. — М.: Мир, 1973.
2. **Эйчельбергер Р., Кайнике Дж.** Высокоскоростной удар // Физика быстротекающих явлений процессов/Под ред. Н. А. Элтина. — М.: Мир, 1971. — Т. 2.
3. **Лаврентьев М. А., Шабат Б. В.** Проблемы гидродинамики и их математические модели. — М.: Наука, 1973.
4. **Стадниченко И. А., Титов В. М., Чистяков В. П., Шведов Г. А.** Исследование и некоторые применения взрывных ударных труб // ФГВ. — 1982. — № 3.
5. **Войтенко А. Е.** Ускорение газа при его сжатии в условиях остроугольной геометрии // ПМТФ. — 1966. — № 4.
6. **Романов Г. С., Урбан В. В.** Численное моделирование взрывного плазменного генератора с учетом переноса энергии излучения и испарения стенок // ИФЖ. — 1982. — Т. 43, № 6.
7. **Войтенко А. Е., Кирко В. И.** Коэффициент полезного действия взрывного плазменного компрессора // ФГВ. — 1975. — № 6.
8. **Попов Е. Г.** О механизме абляции металлов под действием плазмы взрыва // ФГВ. — 1984. — № 6.
9. **Кирко В. И.** Воздействие высокоэнтальпийной плазмой, полученной с помощью взрывного источника, на внутреннюю поверхность полости и канала // ФГВ. — 1984. — № 6.

г. Днепропетровск

*Поступила 9/VI 1987 г.,
в окончательном варианте —
3/VIII 1988 г.*