

**ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПОРИСТЫХ
ФРАКТАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ
ПЛАЗМЕННО-ВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ**

Л. Г. Болховитинов, Ю. Б. Хвостов

*Институт динамики геосфер РАН,
117334 Москва*

В экспериментах по торможению плотной металлической плазмы, полученной при взрывном нагружении пористых образцов, на поверхности мишени обнаружено образование высокопористого покрытия. Покрытие имеет вихревую структуру, на поверхности вихрей располагаются мелкодисперсные фрактальные нити. Напыленная поверхность состоит из перекристаллизованного материала пористого образца с небольшими добавками материала мишени. При торможении многокомпонентной плазмы покрытие имеет аналогичную структуру и состоит из равномерно распределенных по поверхности компонентов образца и материала мишени.

В настоящее время значительный интерес вызывают фрактальные структуры, т. е. сильно разреженные структуры, типа аэрогелей или нитей с весьма низкой плотностью (10^{-2} г/см³), состоящие из малых частиц и обладающие большой удельной площадью внутренней поверхности. Связанные с этим необычные физические свойства таких структур могут иметь как научное, так и прикладное значение.

Экспериментальные методы получения фрактальных структур подробно описаны в [1], однако они касаются относительно низкоэнергетических способов воздействия на вещество. Большие возможности в этой области могут иметь взрывные способы воздействия на пористые, и особенно, высокопористые вещества. Генерируемая при этом неидеальная плазма при расширении быстро конденсируется и может образовывать фрактальные структуры. Большие массы плазмы и высокие скорости разлета плазменных потоков способствуют быстрой конденсации материала и получению «замороженных» состояний вещества.

В данной работе приводятся результаты экспериментов по торможению на стальных преградах неидеальной плазмы, образующейся при взрывном нагружении высокопористых металлических образцов. Метод создания высокопористых потоков плотной плазмы, распространяющихся со скоростями 15–25 км/с, основан на эффекте перехода высокопористого вещества в плазменное состояние непосредственно во фронте ударной волны [2–4].

В экспериментах по торможению расширяющихся плазменных потоков цилиндрический заряд ВВ диаметром 20 и высотой 100 мм, состоящий из смеси литого тротила и гексогена 50/50, окружался высокопористым коаксиальным образцом и располагался вдоль оси стеклянного цилиндра. Образец высокопористого вещества представлял собой структуру, состоящую из полосок металлической фольги толщиной 0,02, шириной 1–2 и длиной 200 мм, переплетенных между собой и спрессованных до начальной пористости $K = \rho_0/\rho_{00} = 25$ (где ρ_0 и ρ_{00} — начальные плотности сплошного и пористого материала). Образцы готовили из медной и алюминиевой фольги и их смеси. Толщина слоя высокопористого вещества, располагающегося вокруг заряда, равнялась 10 мм. На расстоянии 30 мм от поверхности высокопористых образцов на внутренней поверхности стеклянного цилиндра располагались несколько мишеней — стальных дисков диаметром 30 и толщиной 5 мм, на которых происходило торможение на-

летающего потока плазмы. Эксперименты по торможению проводились в вакууме при $p = 10^{-4}$ Торр и в воздухе.

После прохождения по высокопористому образцу скользящей ударной волны (УВ), инициируемой детонацией заряда взрывчатого вещества, с боковой поверхности образца наблюдается разлет образованной металлической плазмы. При разлете поток остывает и частично конденсируется, но при торможении на мишени вновь интенсивно увеличивается температура плазмы. При этом у поверхности мишени образуется зона радиационного прогрева налетающего потока и материала мишени. Вслед за этим от мишени отходит отраженная УВ, за которой плазма и частично испаренный материал мишени повторно конденсируются. Максимальные параметры плазменных струй, получаемых в экспериментах, составляли: скорость разлета струи 15 км/с, гидродинамический поток энергии 10^{10} Вт/см², удельная гидродинамическая энергия 20 КДж/г, время торможения 10^{-5} с. Распределение параметров по длине струи приведено в [4].

Поверхности получаемых при напылении образцов исследовали на растровом электронном микроскопе CamScan 4DV, а фазовый состав определяли на рентгеновском дифрактометре Rigacu. На рис. 1 представлены типичные фотографии напыленных в вакууме поверхностей. Нанесенное на стальную мишень медное покрытие имеет высокопористую структуру.

Образующийся при детонации заряда ВВ поток медной плазмы подлетает к мишени под углом, вследствие чего образуются одинаково направленные гребни напыленного вещества. Расстояние между гребнями

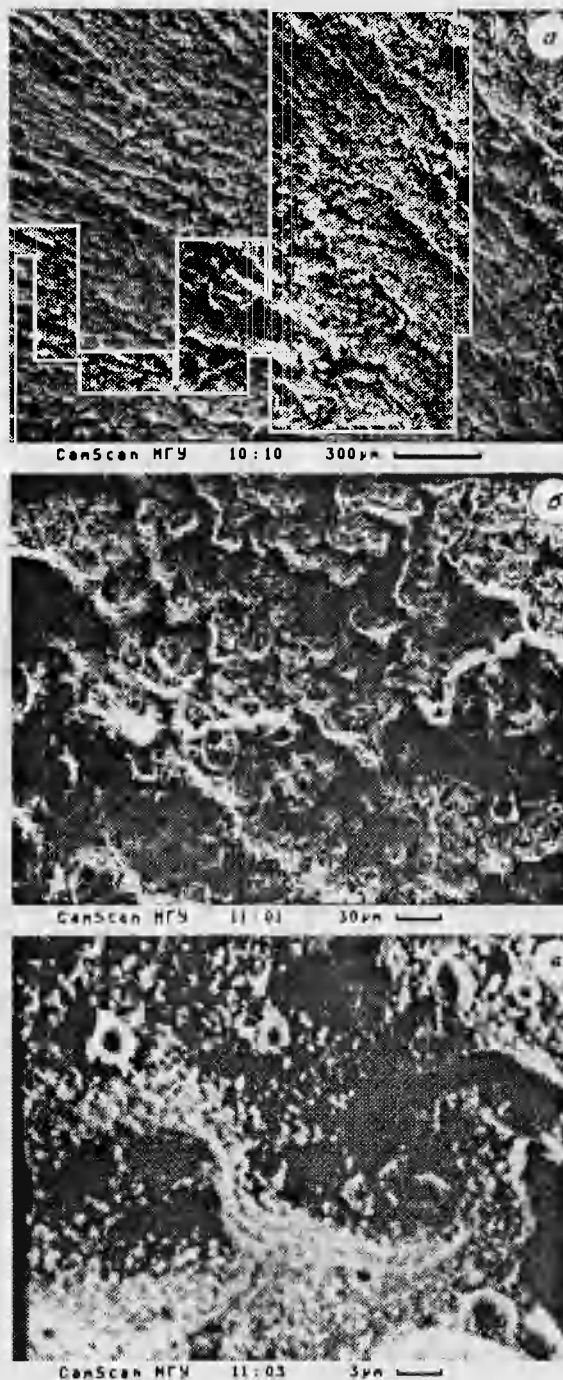


Рис. 1. Микроструктура напыленной медной поверхности.

равняется 100–200 мкм (рис. 1,а). Рассмотрение структуры застывшего вещества при больших увеличениях показывает, что выделенное направление в потоке исчезает, покрытие состоит из хаотически расположенных вихревых структур с характерным размером 10–30 мкм (рис. 1,б). Сами вихревые структуры, в свою очередь, состоят из частиц значительно меньшего размера. Размер частиц, из которых формируется верхняя видимая нитеобразная часть гребней, равняется 100–200 нм (рис. 1,в). Кроме того на вспененной поверхности видны кратеры размером ~ 1 мкм, с характерным застывшим выбросом вещества. Эти кратеры являются следствием бомбардировки уже напыленной поверхности подлетающими позднее остатками неиспаренного материала. Структура поверхности, получаемой при торможении потока плазмы на мишени в воздухе, качественно совпадала со структурой, получаемой в вакууме. Покрытие также имеет вспененную структуру, однако пористость материала снизилась, уменьшилось количество вихревых структур и мелкодисперсных нитей.

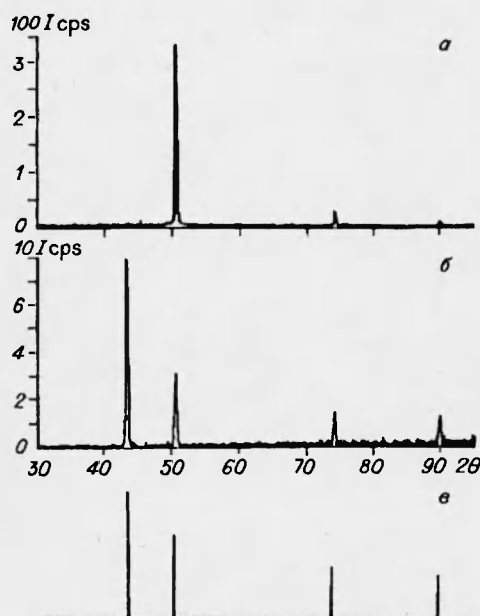


Рис. 2. Рентгенограмма и данные каталога:

а — исходная медная фольга; б — напыленное медное покрытие; в — данные каталога для меди.

Рентгеноструктурный анализ напыленной медной поверхности показал, что она состоит из перекристаллизованной в процессе ударного испарения меди. Об этом свидетельствует различие в интенсивности пиков меди исходного материала медной фольги и напыленного материала. Исходный материал из-за механической обработки при прокатывании имел отличную от эталона интенсивность пиков. Это различие при ударном испарении исчезло, интенсивность пиков напыленного вещества и эталона совпала, что свидетельствует о перекристаллизации вещества (рис. 2). В процессе торможения потока медной плазмы на мишени частично испаряется ее материал, кроме того, из-за значительных градиентов давления при торможении успевает произойти частичное диффузионное перемешивание материала потока и мишени. С этими про-

цессами связано наличие до 10 % железа в напыленном слое, регистрируемое в рентгенограммах.

Ударное сжатие высокопористых смесевых образцов позволяет получать многокомпонентную плазму [5]. Для образования покрытий, состоящих из смеси различных материалов, проделаны эксперименты по торможению многокомпонентной плазмы на преграде. Высокопористые образцы состояли из равных по объему частей алюминия и меди с пористостью $K = 25$ и средней плотностью $\rho_{00} = 0,23$ г/см³.

Качественно структура напыленной поверхности оставалась такой же. Напыленная поверхность состояла из высокопористого смесевых материала, компоненты которого были равномерно распределены по поверхности. Наличие в составе высокопористых образцов трудноиспаряемого алюминия привело к увеличению температуры плазменного потока,

и как следствие, к большему проникновению материала мишени в напыляемый слой. Количественный анализ состава напыленного образца показал в разных точках наличие 25–35 % Al, 35–30 % Cu и 40–35 % Fe.

С технологической точки зрения метод получения высокопористых покрытий оказывается весьма простым. Опыты показали, что таким способом можно напылять материал не только на внешние, но и на внутренние поверхности труб и более сложных конструкций. Использование пластических листовых ВВ позволяет наносить покрытия на большие поверхности.

Область применения подобных покрытий определяется структурой получаемых поверхностей. Большая удельная внутренняя поверхность получаемых материалов может быть использована для создания каталитических покрытий. Существенное перемешивание напыленного материала и материала мишени позволяет получать прочно связанные с подложкой антикоррозионные покрытия.

Таким образом, при напылении плазменно-взрывным способом на поверхности мишени образуется металлическое высокопористое вихревое покрытие. На внешней поверхности вихрей располагаются фрактальные нитевидные образования с размером частиц 100–200 нм. Напыленные поверхности могут иметь многокомпонентный состав.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Б. М. Энергетические процессы в макроскопических фрактальных структурах // Успехи физ. наук. 1991. Т. 161, № 6. С. 171–200.
2. Volkhovitinov L. G., Khvostov Yu. B. Rankine-Hugoniot relation for shock waves in very porous media // Nature. 1978. V. 274, N 5674. P. 882.
3. Хвостов Ю. Б. Получение неидеальной плазмы при ударном сжатии высокопористых металлов // Докл. АН СССР. 1987. Т. 294, № 2. С. 302–306.
4. Болховитинов Л. Г., Хвостов Ю. Б. Измерение параметров плотной плазмы, образовавшейся при ударном сжатии пористых образцов свинца и меди // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 5. С. 119–122.
5. Хвостов Ю. Б. Исследование ударной сжимаемости многокомпонентных высокопористых металлов // IV Всесоюз. совещ. по детонации: Докл. Черноголовка: Изд-во ИХФ, 1988. Т. 1. С. 83.

Поступила в редакцию 5/XI 1993 г.
