

## ЛИТЕРАТУРА

1. D. J. Steinberg, S. G. Cochran, H. W. Guinan. J. Appl. Phys., 1980, 51, 3, 1498.
2. J. Lipkin, J. R. Asay. J. Appl. Phys., 1977, 48, 1, 182.
3. Д. Д. Гилман. Механика. Сб. переводов. № 2. М.: Наука, 1970.
4. J. M. Gupta. J. Appl. Phys., 1975, 46, 8, 3395.
5. J. R. Asay, D. L. Hicks, D. V. Holdridge. J. Appl. Phys., 1975, 46, 10, 4316.
6. П. В. Макаров, В. А. Скрипняк. Изв. вузов. Физика. 1982.
7. С. М. Бахрах, А. Г. Иванов и др.— В кн.: Детонация. Черногловка, 1978.
8. Г. И. Канель. ПМТФ, 1982, 2, 105.
9. Е. А. Дынин. МТТ, 1981, 2, 56.
10. J. E. Vorthman, G. E. Divall. J. Appl. Phys., 1982, 53, 2, 3605.
11. L. E. Murri. Scripta Metallurgica, 1978, 12, 201.
12. А. Н. Дремин, Г. И. Канель, О. Б. Черникова. ПМТФ, 1981, 4, 132.
13. L. C. Chhabildas, J. R. Asay. J. Appl. Phys., 1979, 50, 4, 2749.
14. Л. В. Альтшулер, С. Б. Корнер, А. А. Баканова и др. ЖЭТФ, 1960, 38, 1061.
15. D. R. Curran. J. Appl. Phys., 1963, 34, 9, 2677.
16. J. O. Erkmann. J. Appl. Phys., 1967, 38, 12, 5395.
17. A. S. Kusubol, M. van Thiel. J. Appl. Phys., 1969, 40, 2, 593.
18. С. А. Новиков, Л. М. Спницын. ПМТФ, 1970, 6, 107.
19. Л. В. Альтшулер, М. Н. Бражник, Г. С. Телегин. ПМТФ, 1971, 6, 159.
20. И. В. Симонов, Б. С. Чекин. ФТВ, 1975, 11, 2, 274.
21. А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ПМТФ, 1976, 2, 146.
22. J. R. Asay, J. Lipkin. J. Appl. Phys., 1978, 49, 7, 4342.
23. J. R. Asay.— In: Shock Waves and High-Strain—Rate Phenomena in Metals Ed. Meyers A. and Lawrence E. Murr. N. Y.: Plenum Publishing Corporation, 1981.

УДК 663.414 : 66.175

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВОМ НАПЫЛЕНИИ ПОРОШКОВ

*Т. П. Шмырева*

*(Днепропетровск)*

Одна из разновидностей использования энергии детонации газовой смеси для практических целей — детонационно-газовое напыление покрытий [1], для чего в длинную цилиндрическую, открытую с одного конца трубу помещают навеску порошка и подают смесь кислорода с ацетиленом. Электрической искрой инициируется взрыв газовой смеси. Частицы порошка разогреваются в продуктах детонации и транспортируются вместе с ними к открытому концу трубы. Напротив него помещают деталь, частицы тормозятся о ее поверхность и образуют слой покрытия толщиной около 10 мкм. Последовательно напыляя слой на слой, суммарную толщину покрытий доводят до 1—2 мм.

Высокие температуры и давления, контакт частиц с химически активной газовой средой, деформация частиц при соударении с деталью облегчают протекание различных физико-химических процессов в напыляемых материалах, позволяют изменять их структуру и свойства. Ранее в [2] показано, что методом детонационно-газового напыления можно получать различные метастабильные соединения. При напылении никелевых порошков в зависимости от состава детонирующей смеси в покрытии образуются пересыщенный твердый раствор углерода в никеле и метастабильный карбид никеля ( $\text{Ni}_3\text{C}$ ) или оно сохраняет состав исходного порошка. При напылении порошков эвтектических сплавов ( $\text{Fe-P-C}$ ,  $\text{Fe-Cr-P-C}$ ,  $\text{Fe-V-C}$  и др.) двухмиллиметровый слой покрытия имеет аморфную структуру. Получение и исследование этих метастабильных соединений позволило установить, что при детонационном напылении имеет место расплавление частиц порошка. За короткое время транспортировки в продуктах детонации расплавленные частицы успевают взаимодействовать с углеродом, образующимся при неполном сгорании ацетилена детонирующей смеси. При попадании на подложку расплавленные частицы охлаждаются со скоростью более  $10^6$  К/с, что позволяет зафиксиро-

Газонасыщенность напыленных слоев

Исследуемый образец	Растворимый газ, % по массе		
	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Исходный кристаллический порошок Fe — P <sub>13</sub> — C <sub>5</sub>	0,04	—	—
Напыленный аморфный слой Fe — P — —C	1,05	0,010	0,40
Порошок никеля	0,06	0,002	—
Никелевое покрытие с метастабиль- ными фазами	0,24	0,024	0,25
Никелевое покрытие без метастабиль- ных фаз	0,15	0,009	0,16

вать в покрытии избыточные количества углерода в твердом растворе, а для эвтектических сплавов получить массивный твердый слой с аморфной структурой жидкости.

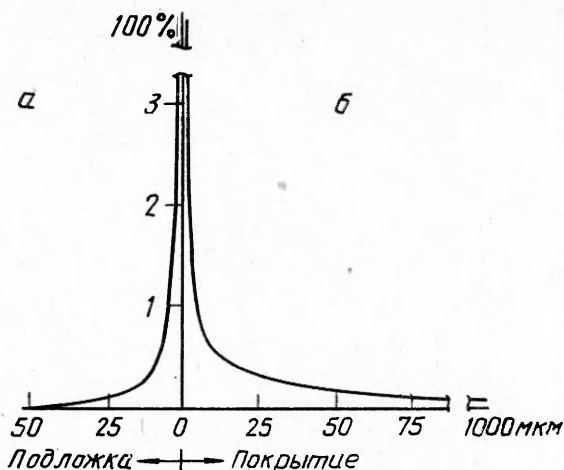
В процессе транспортировки порошка перегретыми газами возможно насыщение ими расплава, а последующая сверхбыстрая его закалка способствует сохранению повышенных концентраций газов в твердом металле. Проведенные измерения газонасыщенности [3] позволили установить, что в слоях с аморфной структурой количества растворенных газов (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) значительно превышают равновесные (см. таблицу). Сопоставление содержания газов в слоях с кристаллической структурой, напыленных никелевым порошком, показало, что в слое с метастабильными фазами содержание кислорода, водорода, азота близко к концентрациям этих газов в аморфных покрытиях. Напыленные никелевые слои без метастабильных фаз имеют значительно меньшую газонасыщенность. Таким образом, получение аморфных или кристаллических метастабильных фаз при детонационном напылении позволяет аномально увеличить концентрацию растворенных газов в напыленных слоях.

При столкновении частиц с подложкой (деталью) и при напылении каждого последующего слоя покрытия подложки ранее напыленные слои и частицы порошка подвергаются импульсному деформационному и тепловому воздействию, что, как известно [4], может значительно влиять на кинетику и механизм диффузионных процессов. Поэтому проведены количественные микрорентгеноспектральные исследования перераспределения концентраций элементов между покрытием и основой. Для исследований выбраны следующие пары металлов: никелевое покрытие на титановой основе, никелевое покрытие на железной основе, железное покрытие на меди, железное покрытие на алюминии. Установлено, что во всех случаях имеет место эффект сверхбыстрого массопереноса в обе стороны — из покрытия в подложку и из подложки в покрытие (см. рисунок). Глубина проникновения материала покрытия в подложку составляет около 50 мкм. Зарегистрировано плавное без всплесков и перепадов снижение концентрации от границы с покрытием в глубь подложки, что указывает на образование в приграничной зоне твердого раствора металла покрытия в металле подложки с постепенно уменьшающейся концентрацией растворенного элемента по мере удаления от границы с покрытием. Концентрационные кривые для всех исследованных пар металлов (никель в титане, никель в железе, железо в меди и железо в алюминии) находятся в пределах одного и того же доверительного интервала, составляющего 0,05%.

Наибольший интерес представляет массоперенос (растворение) железа в алюминиевой подложке. В равновесных условиях растворимость железа в алюминии практически отсутствует [5]. А при детонационном напылении, как показали проведенные исследования, становится возможным проникновение атомов железа в алюминий на достаточно большую глубину (около 50 мкм) и растворение железа в алюминии в количествах, значительно превышающих равновесную концентрацию. Металл подложки остается при этом в твердом состоянии. При металлографических исследованиях в этом слое не обнаружено каких бы то ни было следов

Массоперенос через границу между детонационным покрытием и подложкой.

а) изменение концентрации металла покрытия по глубине подложки (Ni в Ti, Ni в Fe, Fe в Cu, Fe в Al); б) изменение концентрации металла подложки по толщине покрытия (Ti в Ni, Fe в Ni, Cu в Fe).



оплавления — изменений формы или размера зерен или выделения новых фаз.

Материал основы проникает в покрытие на всю его толщину — 2 мм. Концентрация металла подложки плавно снижается от границы раздела в глубь покрытия в слое шириной около 40 мкм до определенного значения и по всей остальной толщине покрытия остается на этом уровне. В никелевом покрытии на железе по всей толщине покрытия присутствует около 0,1% железа, в никелевом покрытии на титане — 0,1% титана, в железном покрытии на медной основе — 0,1% меди. Таким образом, установлено, что при детонационном напылении происходит взаимное легирование покрытия и подложки за счет эффекта сверхбыстрого массопереноса. В подложке — это массоперенос в твердой фазе под действием циклического теплового и ударного нагружения. В покрытии имеет место перераспределение из твердой в жидкую фазу с последующей сверхбыстрой закалкой жидкости.

Обнаруженные при детонационно-газовом напылении эффекты аномального повышения растворимости газов в метастабильных соединениях и сверхбыстрого массопереноса расширяют имеющиеся представления о влиянии импульсного нагружения на физико-химические свойства материалов, позволяют расширить технологические возможности метода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Бартнев, Ю. П. Федько, А. И. Григоров. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982.
2. Т. П. Шмырева, Г. М. Воробьев, М. Т. Величко. — В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1980.
3. Т. П. Шмырева, В. А. Алексеев, А. П. Бабичев и др. Письма в ЖТФ, 1982, 8, 2, 109.
4. Л. Н. Лариков, В. Ф. Мазанко, В. М. Фельченко. Докл. АН СССР, 1975, 221, 8, 1073.
5. М. Хансен, К. Андерко. Структуры двойных сплавов. Т. 1. М.: Metallurgizdat, 1962.

УДК 539.63

### О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ РАСПЛАВОВ ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В. Ф. Нестеренко  
(Новосибирск)

Известен ряд способов получения переохлажденных расплавов, основанных на их быстром охлаждении [1, 2]. При этом вещество переводится в область температур значительно ниже температуры плавления  $T_m$ ,