

УДК 621.762.5:621.35

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Академик АН УССР И. М. ФЕДОРЧЕНКО, Г. Л. БУРЕНКОВ,
А. И. РАЙЧЕНКО, А. В. ХРИЕНКО

СПЛАВООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОМ СПЕКАНИИ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ

Процессы образования сплавов и выравнивания химического состава (гомогенизация) при спекании многокомпонентных порошковых композиций широко известны и повседневно применяются в порошковой металлургии (см., например, (1-3)). Гомогенизация при обычной термической обработке (спекании) порошковых смесей контролируется, как правило, скоростью атомной диффузии и продолжается несколько часов.

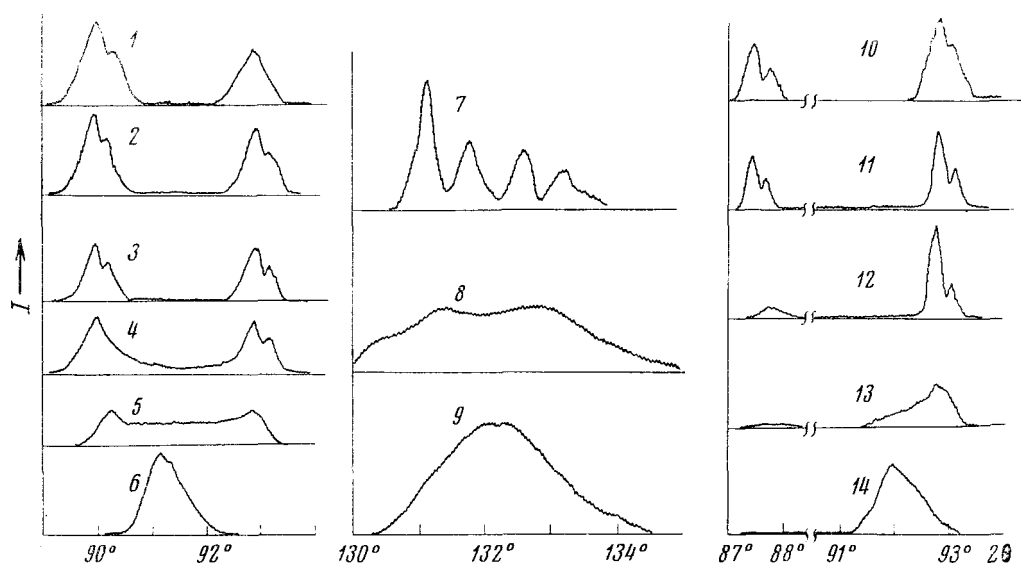


Рис. 1. Профили интенсивности I рентгеновских интерференций от образцов, полученных электроразрядным спеканием с различными энергозатратами E .

1-6 — Cu-Ni, (311) $\text{CuK}\alpha$; 7-9 — W-Mo, (321) $\text{CuK}\alpha$; 10-14 — Ni-Mo, $\text{CuK}\alpha$, (311) от Ni и раствора на его основе, (222) от Mo.

1, 7, 10 — механическая смесь исходных порошков, $E \cdot 10^{-5} \text{ (а}^2 \cdot \text{сек/ (г} \cdot \text{см))} = 10,7$ (2); 11,8 (3); 13,5 (4); 16,5 (5); 27,6 (6); 37,0 (8); 48,0 (9); 33,8 (11); 43,2 (12); 52,3 (13); 66,7 (14)

θ — угол Вульфа — Брегга, интенсивность I в произвольных единицах

Среди методов активированного спекания наиболее эффективных результатов удается достичь с помощью метода электроразрядного спекания (4-7). Теоретические оценки предсказывают повышение интенсивности массопереноса на несколько порядков при такого рода обработке по сравнению с изотермическим спеканием с равными энергозатратами (8). Экспериментальные исследования закономерностей сплавообразования при электроразрядном спекании порошковых смесей нам неизвестны. Цель настоящей работы — экспериментально проверить теоретическое положение об интенсификации процесса гомогенизации двухкомпонентных сплавов из порошков.

Объектами исследования служили порошковые смеси Cu—Ni (дисперсность <40 мкм), W—Mo (дисперсность <10 мкм) и Mo—Ni (дисперсность Mo <10 мкм, Ni <40 мкм). Обработка объектов производилась на установке электроразрядного спекания, сконструированной и изготовленной в нашем институте.

Для характеристики энергетического воздействия на порошок использовалась, по аналогии с работой (9), величина

$$E = \frac{I^2 t l_{\text{ср}}}{gS},$$

которую можно назвать удельной энергозатратой (I — эффективный ток, проходящий через порошок (а), t — время спекания (сек.), $l_{\text{ср}} = 1/2 (l_{\text{н}} + l_{\text{к}})$ — средний за время спекания размер образцов в направлении пропускания тока, $l_{\text{н}}$, $l_{\text{к}}$ — начальный и конечный размеры образцов соответственно (см), g — масса образца (г), S — площадь поперечного сечения образца (см²)).

Для рентгеновского исследования использовали установку ДРОН-0,5. Измеряли также электросопротивление.

На рис. 1 (кривые 1—6) представлены профили интенсивности рентгеновских интерференций, полученных при съемках Cu—Ni-образцов, спекавшихся в течение 30 сек. с использованием тока различной плотности.

Кривая 1 относится к исходной смеси порошков; профили размыты, что свидетельствует о некоторой дефектности использованных порошков.

Повышение энергозатраты в пределах $E \leq 11,8 \cdot 10^5 \text{ а}^2 \cdot \text{сек}/(\text{г} \cdot \text{см})$ не приводит еще к заметному сплавлению: рентгеновские линии не испытывают заметных смещений (рис. 1, 2, 3); здесь при прохождении тока в результате нагрева металла происходит отжиг дефектов кристаллической решетки, о чем свидетельствует сужение линий и отчетливое разрешение дублета.

Дальнейшее увеличение энергозатрат ($11,8 \cdot 10^5 < E \leq 16,5 \cdot 10^5 \text{ а}^2 \cdot \text{сек}/(\text{г} \cdot \text{см})$) приводит к заметному диффузионному взаимодействию: наблюдается смещение и уширение рентгеновских рефлексов, появляется значительная интенсивность рентгеновского излучения во всем угловом интервале между максимумами по краям (рис. 1, 4, 5).

При удельной энергозатрате $E = 26,7 \cdot 10^5 \text{ а}^2 \cdot \text{сек}/(\text{г} \cdot \text{см})$ образуется почти однородный сплав окончательного состава (рис. 1, 6).

Аналогичных результатов удалось достичь путем изменения длительности электроразрядного спекания при неизменном токе. Например, прямым сравнением рентгенограмм было установлено, что гомогенизация, обеспечиваемая обычным спеканием при температуре 1050°С в течение 4 час., достигается электроразрядным спеканием в течение 45 сек. ($E = 44,5 \cdot 10^5 \text{ а}^2 \cdot \text{сек}/(\text{г} \cdot \text{см})$).

Измерения электросопротивления дополняют картину хода электроразрядного спекания смеси Cu—Ni (рис. 2). При переходе от режима с $E = 29,6 \cdot 10^5 \text{ а}^2 \cdot \text{сек}/(\text{г} \cdot \text{см})$ к режиму с $E = 31,8 \cdot 10^5 \text{ а}^2 \cdot \text{сек}/(\text{г} \cdot \text{см})$ (путем

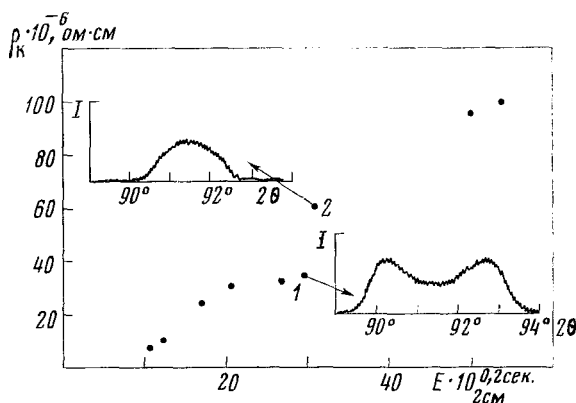


Рис. 2. Изменение электросопротивления ρ_k медно-никелевых образцов

удлинения процесса) имеет место особо интенсивная гомогенизация (см. профили интенсивности интерференций, соответствующих этим сплавам, изображенные в «окнах» у точек 1 и 2 на рис. 2). Общая тенденция сопротивления к повышению с увеличением энергозатрат вполне понятна, такого типа зависимость наблюдается и при обычном спекании порошковых смесей ⁽²⁾.

На рис. 1 (кривые 7–9) изображены профили интенсивности рентгеновских интерференций композиции W–Mo. Обработка такой композиции электроразрядным методом ($E=37,0 \cdot 10^5 \text{ а}^2 \cdot \text{сек}/(\text{г} \cdot \text{см})$, $t=60 \text{ сек.}$) приводит к заметному диффузионному взаимодействию (рис. 1, 7).

Увеличение энергозатрат до $E=48 \cdot 10^5 \text{ а}^2 \cdot \text{сек}/(\text{г} \cdot \text{см})$ приводит к образованию неомогенного сплава, причем максимум интенсивности ($2\theta=132^\circ 13'$) соответствует параметру решетки среднего состава ($a=3,1548 \text{ \AA}$). Полная гомогенизация столь тугоплавкой композиции может быть достигнута при еще большей затрате энергии.

Сравнение этих результатов с данными по обычному спеканию этой порошковой смеси ⁽¹⁰⁾ показало, что спекание при температуре 2200° в течение 2 час. приводит к значительно меньшей степени гомогенности, чем электроразрядное спекание в течение 1 мин. с указанной выше энергозатратой.

Весьма быстрое сплавообразование при электроразрядном спекании наблюдается не только у порошковых систем, состоящих из компонентов с неограниченной взаимной растворимостью (каковыми являются системы Cu–Ni и W–Mo), но и в случае ограниченной взаимной растворимости компонентов и ярко выраженной униполярной диффузии. Ход сплавообразования в этом случае продемонстрирован на примере системы Ni–Mo (рис. 1, 10–14). Как следует из семейства кривых 10–14, при электроразрядном спекании указанной смеси порошков достаточно обработки длительностью 90 сек. ($E=66,7 \cdot 10^5 \text{ а}^2 \cdot \text{сек}/(\text{г} \cdot \text{см})$) для полного исчезновения молибдена и образования α -твердого раствора на основе никеля (гомогенизация этого сплава, однако, еще не достигается). Для сравнения заметим, что никель-молибденовый сплав, аналогичный спеченному методом электроразрядного спекания по указанному выше режиму, получается обычным спеканием при температуре 1200° в течение 2 час. ⁽¹¹⁾.

Сопоставление полученных нами экспериментальных данных с результатами расчетов ⁽⁸⁾ показывает, что предсказание об интенсификации диффузии при электроразрядном спекании оправдывается с «превышением». Причиной такого сверхбыстрого сплавообразования может служить то, что механизм массопереноса не сводится лишь к атомной диффузии (каковая рассматривалась в работе ⁽⁸⁾): по-видимому, при электроразрядном спекании часть металла плавится и испаряется и имеет место турбулентное перемешивание жидких (а также частично газообразных) металлов. Об этом свидетельствуют модельные эксперименты по припеканию частиц Cu и Ni с помощью энергии лазерного излучения.

Профили концентрационных кривых часто имеют немонотонный характер: в глубине одного из металлов встречаются зоны, обогащенные другим металлом, что объясняется, по-видимому, струйным характером переноса массы. И при электроразрядном спекании возможно возникновение турбулентной диффузии, что должно приводить к существенному сокращению путей атомной диффузии и соответственно к весьма быстрой гомогенизации смесей, подвергаемых этому виду обработки.

Авторы выражают благодарность Д. А. Левиной и С. М. Солонину за полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ *И. М. Федорченко, Р. А. Андриевский*, Основы порошковой металлургии, Изд. АН УССР, Киев, 1961.
- ² *А. И. Райченко*, Диффузионные расчеты для порошковых смесей, Киев, «Наукова думка», 1969.
- ³ *Я. Е. Гегузин*, Физика спекания, М., «Наука», 1967.
- ⁴ *I. Kiyoshi*, U. S. Pat 3241956, Cl. 75—226, 1966.
- ⁵ *Иноуэ Киёси*, Яп. патент № 14573, кл. 10A603, 1968.
- ⁶ *R. W. Boesel, M. I. Jacobson, I. S. Yoshioka*, Mater. Eng., v. 70, № 4, 32 (1969).
- ⁷ *А. И. Райченко, Д. А. Левина и др.*, Тез. докл. XII Всесоюз. научн.-техн. конфер. Новейшие методы получения легиров. порошков и их компактир., Рига, 1975.
- ⁸ *А. И. Raichenko, G. L. Burenkov, V. I. Leschinskii*, Phys. Sintering, v. 5, № 2/2, 215 (1973).
- ⁹ *Сакаи Тэцую, Итабаси Масао, Хара Дзэнсиро*, Сэйсан кэнкю, v. 18, № 2, 35 (1966).
- ¹⁰ *Л. А. Алешина, Э. В. Врублевская и др.*, Физика и химия обработки материалов, № 6, 111 (1973).
- ¹¹ *Л. И. Чернышев*, Канд. дисс., Киев, 1971.