

УДК 621.771.23 : 621.771.8  
DOI 10.17073/1997-308X-2015-1-8-11

## Механическое плакирование дисперсных систем Fe–Al и Fe–Cu при динамических нагрузках

© 2015 г. Ю.В. Концевой, А.В. Долматов, Э.А. Пастухов, Т.Ф. Григорьева

Институт металлургии (ИМЕТ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Институт химии твердого тела и механохимии (ИХТТМ) СО РАН, г. Новосибирск

Статья поступила в редакцию 20.05.14 г., доработана 05.08.14 г., подписана в печать 11.08.14 г.

**Концевой Ю.В.** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории физической химии металлургических расплавов ИМЕТ УрО РАН (620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101). Тел.: (343) 232-90-44. E-mail: kuv.45@mail.ru.

**Долматов А.В.** – канд. хим. наук, ст. науч. сотр. той же лаборатории. Тел.: (343) 232-91-35. E-mail: dolmatov.imet@gmail.com; d.aleksey@gmail.com.

**Пастухов Э.А.** – чл.-кор. РАН, докт. хим. наук, проф., зав. этой лабораторией. Тел.: (343) 232-90-21.

**Григорьева Т.Ф.** – докт. хим. наук, ст. науч. сотр. лаборатории химического материаловедения ИХТТМ СО РАН (630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18). Тел.: (383) 233-24-10 (доб. \*431). E-mail: grig@solid.nsc.ru.

Представлены результаты разработки устройства для механического плакирования порошков их соударением при колебательном движении. Экспериментальное плакирование произведено в системах Fe–Al и Fe–Cu. Показано значительное влияние механических свойств плакируемых металлов на качество и интенсивность плакирования, а также влияние глубины проникновения пластической деформации на параметры промежуточного слоя.

**Ключевые слова:** металлические порошки, плакирование, промежуточные слои, температура и степень деформации, глубина проникновения пластической деформации.

The results of the development of the facility for mechanical plating by their collision during the oscillatory motion. Experimental plating is performed in Fe–Al and Fe–Cu systems. Considerable influence of mechanical properties of plated metals on plating quality and intensity as well as the influence of the penetration depth of the plastic deformation on parameters of the intermediate layer are shown.

**Keywords:** metal powders, plating, intermediate layers, deformation temperature and degree, penetration depth of the plastic deformation.

### Введение

Одной из технологических операций, обеспечивающей специальные свойства металлических порошков, является плакирование порошков [1]. Наиболее распространенный метод плакирования — напыление плакирующего материала на дисперсоиды [2–4]. Тем не менее заметное значение имеет механическое плакирование порошков. Наиболее распространенный способ механического плакирования — обработка в мельницах [5–7]. Однако при таком способе плакирования обрабатываемые дисперсоиды зачастую изменяют свою морфологию. В ИМЕТ УрО РАН разработаны способ и устройство механического плакирования порошков (УМПП), устраняющие указанный недостаток [8]. В этом способе используется сила соударения плакируемых и плакирующих дисперсоидов при их совместном колебательном движении в плакираторе.

### Методика исследований

Внешний вид установки показан на рис. 1. Она представляет собой вибратор с кривошипно-шатунным приводом, создающий условия плавного регулирования частоты и амплитуды колебаний. На вибраторе установлен цилиндрический, герметично закрывающийся контейнер из нержавеющей стали с трубопроводами, предназначенными для создания заданной атмосферы испытаний. Для обеспечения высокоскоростного нагрева при термической обработке порошков после соударений используется индукционная установка трансформаторного типа ВЧИН-15.

В экспериментах по изучению служебных возможностей данного способа и влияния технологических характеристик процесса на качество плакирования применяли стальную дробь диаметром 1 мм и алюминиевый порошок с частицами сферической формы размером 0,01–0,16 мм, а также



**Рис. 1.** Внешний вид установки для механического плакирования порошков  
 1 – виброустановка, 2 – контейнер с порошками (плакиратор), 3 – индукционный нагреватель ВЧИН-15

железный порошок с фракциями 0,03–0,05 мм и медный порошок с частицами 0,001–0,01 мм. Дисперсные массивы обрабатывали на УМПП при соотношении объемов стальной дробы и алюминиевого порошка 1 : 2, железного и медного порошков — при соотношении масс 1 : 2. Обработку порошков вели при частотах колебания контейнера 15, 30 и 50 Гц с амплитудой от 3 до 8 мм в течение 3, 5 и 15 мин. Нагрев порошковой массы осуществляли с помощью муфельной печи СУОЛ (скорость нагрева 2 и 20 град/с) и индукционного нагревателя ВЧИН-15 (скорость нагрева 50, 100 и 200 град/с).

При проведении экспериментов использовались следующие методики и инструменты.

Частоту колебаний контейнера находили через скорость вращения привода кривошипно-шатунного механизма, определяемую с помощью бесконтактного тахометра СЕМ-АТ-8.

Температуру нагрева при скоростях нагрева до 20 град/с измеряли посредством термопары, изготовленной из проволоки сечением 0,2 мм, а при скоростях нагрева 50, 100 и 200 град/с — определяли по ранее разработанной методике [9] через изменение сопротивления стенок контейнера-плакиратора во время нагрева материала.

Исследования поверхности дробинки проводили на стереомикроскопе МЕИИ EMZ-13TR, а анализ микроструктуры шлифов — на оптическом микроскопе «Olympus GX-51», оснащенной системой анализа изображений.

Скорость движения соударяющихся дисперсоидов определяли теоретически по методике, представленной в работе [10].

Время контакта ( $\tau$ ) соударяющихся сферических тел, их максимальное сближение ( $a_{\max}$ ) при соударении и величины их деформации ( $p_{\max}$ ) (пластической и упругой) рассчитывали следующим образом [11]:

$$\tau = 4,53 \left[ \frac{(\delta_1 + \delta_2)m_1m_2}{m_1 + m_2} \right]^{2/5} \left( \frac{R_1 + R_2}{v_0 R_1 R_2} \right)^{1/5}, \quad (1)$$

$$a_{\max} = \left[ \frac{15\pi v_0^2 (\delta_1 + \delta_2)m_1m_2}{16(m_1 + m_2)} \right]^{2/5} \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)^{1/5}, \quad (2)$$

$$p_{\max} = 0,2515 \left[ \frac{v_0^2}{(\delta_1 + \delta_2)^4} \frac{m_1m_2}{m_1 + m_2} \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)^3 \right]^{1/5}, \quad (3)$$

где  $\delta \equiv (1 - \mu^2)/(E\pi)$ ;  $E$  — модуль Юнга;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $m_1, m_2$  — массы соударяющихся дисперсоидов;  $R_1, R_2$  — их радиусы;  $v_0$  — скорость сближения дисперсоидов перед соударением.

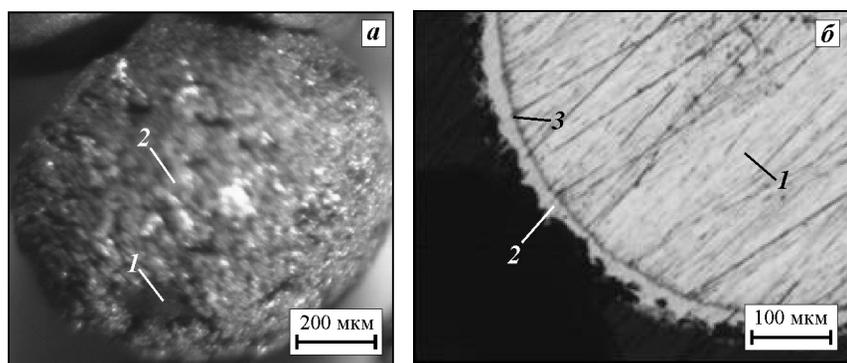
Имея эти данные, расчетным путем определяли глубину и степень пластической деформации на каждой из сфер с учетом роста предела текучести материала при данной скорости деформации.

## Результаты и их обсуждение

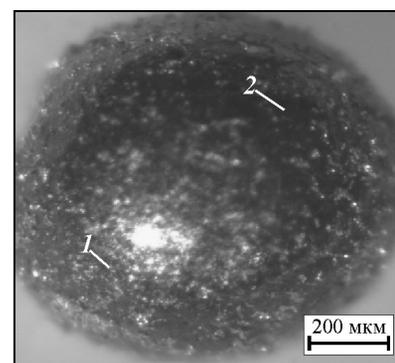
На рис. 2, а представлена фотография стальной дробинки, покрытой алюминием при обработке в УМПП с частотой колебаний 30 Гц и амплитудой 7 мм в течение 5 мин. Видно, что покрытие полное и равномерно распределенное по поверхности дробинки — это подтверждает и фотография металлографического шлифа (рис. 2, б).

Несколько иной результат получен при такой же обработке стальной дробы и медного порошка даже при большей продолжительности обработки.

На рис. 3 видно, что покрытие меди на дробы представляет собой множество точек плакирования, но полного покрытия поверхности не успевает произойти даже за 15 мин, т.е. покрытие равномерное, но не полное. Кроме того, морфология точек покрытия показывает, что при таких режимах колебания и комнатной температуре порошок меди слабо деформируется и представляет собой полусферы. На основании этого в результате экспериментов была высказана гипотеза, что качество плакирования и режимы во



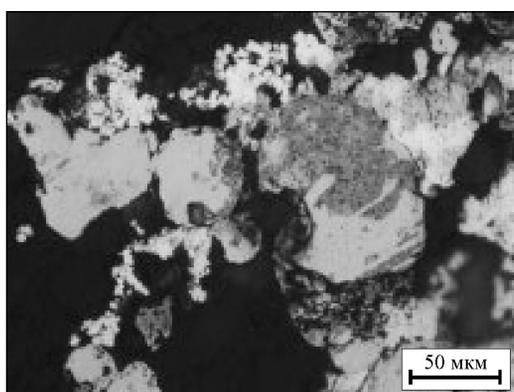
**Рис. 2.** Внешний вид (*а*) и микроструктура шлифа (*б*) плакированной дробинки диаметром 1 мм после 5-минутной обработки в УМП совместно с алюминиевым порошком  
 1 – стальная дробинка, 2 – алюминиевое покрытие, 3 – интерметаллический слой  $Fe_2Al_5$



**Рис. 3.** Покрытие стальной дробинки после 15-минутной обработки в УМП совместно с медным порошком  
 1 – Cu-покрытие, 2 – поверхность дробы

многим зависят от механических характеристик обрабатываемых материалов. Для проверки этой гипотезы было решено за счет повышения температуры порошков при обработке довести прочностные показатели меди до их значения у алюминия. С этой целью железный и медный порошки нагревали с помощью ВЧИН-15 до  $t = 720 \div 750$  °С. Во избежание окисления порошков нагрев проводили в атмосфере водорода. Нагретые порошки обрабатывали с ранее указанными характеристиками колебаний в течение 5 мин. В итоге были получены дисперсоиды железного порошка, полностью покрытые медью (рис. 4). Данный результат, на наш взгляд, подтверждает гипотезу о значительном влиянии механических характеристик плакируемых материалов на качество плакирования.

В ходе экспериментов было изучено также влияние скорости нагрева и условий деформации на



**Рис. 4.** Железный порошок с медным покрытием (время обработки в УМП 5 мин)

структуру переходного слоя. Известно, что высокая скорость нагрева обеспечивает быстрое диффузионное взаимопроникновение контактирующих материалов. Так, в работе [9] при плакировании стального листа порошковым алюминием способом совместной их прокатки толщина слоя, содержащего интерметаллические соединения, составила 23–47 мкм при длительности нагрева 3 с (скорость нагрева 250 град/с) без термической выдержки. В нашем случае, при плакировании дисперсоидов за счет соударения частиц в процессе колебаний в одинаковых термических и химических условиях, проникновение в алюминиевый слой образовавшихся интерметаллических соединений произошло на глубину 2–3 мкм. Причина такого различия, на наш взгляд, состоит в том, что при прокатке проникновение пластической деформации идет на всю толщину обрабатываемого материала. При плакировании в УМП, как показали расчеты по вышеприведенным формулам, проникновение пластических деформаций происходит лишь на глубину 1–2 мкм. Это согласуется с выводами [12] о существенном влиянии пластической деформации материала на «эффективный» коэффициент диффузии. Было установлено [12], что пластическая деформация, наряду со скоростью нагрева, оказывает доминирующее влияние на интенсивность диффузионных процессов. Аналогичным образом влияют глубина деформации и скорость нагрева на твердофазное взаимодействие железа и меди при диффузионном образовании твердого раствора.

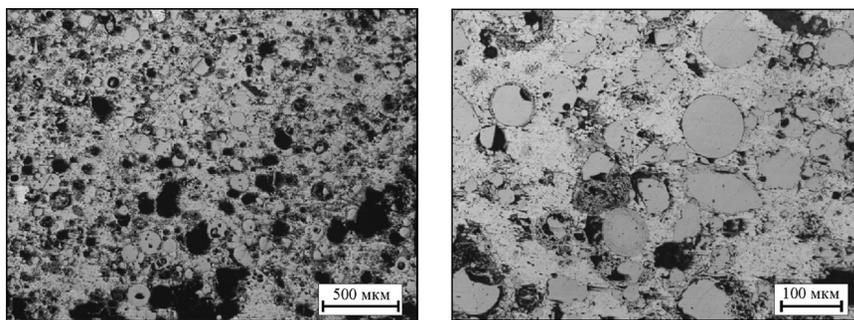


Рис. 5. Спек железомедной порошковой смеси

Эти сведения представляют большой интерес, поскольку свидетельствуют о том, что высокие скорости нагрева создают условия интенсификации диффузии, способствующие получению твердофазных композиционных сплавов при минимальной выдержке их при повышенных температурах, а глубина проникновения пластической деформации позволяет ограничивать толщину прослойки из твердофазного соединения контактирующих материалов.

При испытаниях работоспособности УМПП были выявлены некоторые недостатки в выборе материала корпуса порошкового контейнера-плакиратора. Поскольку стенки контейнера были выполнены из нержавеющей стали, а быстрый нагрев осуществлялся с помощью индукционного нагревателя, то, естественно, стенки нагревались в первую очередь и имели большую, чем у порошка, температуру (950—980 °С). Это привело к образованию спеченных порошковых конгломератов на стенках контейнера. Стало очевидно, что стенки плакиратора необходимо изготавливать из керамики. Тем не менее полученные спекы показали, что при таком способе плакирования помимо основной операции плакирования порошковая смесь прекрасно перемешивается, создавая однородную шихту для производства композитов. Микроструктура шлифа такого спека представлена на рис. 5.

## Заключение

Таким образом, разработан эффективный способ механического плакирования металлических порошков. Исследовано влияние технологических факторов процесса и механических характеристик плакируемых материалов на процесс плакирования. Установлено, что глубина проникновения деформации может быть исполь-

зована как регулятор толщины интерметаллического соединения. Определены рекомендации при выборе материала для изготовления корпуса плакиратора. Показано, что обработка в плакираторе также обеспечивает качественное перемешивание порошков, создавая однородную порошковую смесь.

*Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Урал-М» (г. Екатеринбург) при поддержке интеграционного проекта № 12-С-3-1005 ИМЕТ УрО РАН и ИХТТМ СО РАН «Изучение механизма формирования новых композиционных материалов методами радиационно-термического воздействия и экстремального механического нагружения».*

## Литература

1. Мейлах А.Г. // Сталь. 2014. № 2. С. 71.
2. Шаронов Э.А., Ванновский В.В., Алексеев С.В. // Тр. 6-й междунар. конф. «Пленки и покрытия — 2001» (Санкт-Петербург, 3—5 апр. 2001 г.). СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. С. 146.
3. Руденская Н.А. // Защита металлов. 2004. Т. 40, № 2. С. 173.
4. Селиверстов И.А. // Машиностроение: Вестн. нац. техн. ун-та «Киев. политехн. ин-т». 2009. № 57. С. 50.
5. Zhang Qiaoxin, Shi Xiaoliang, Yang Hua, Duan Xing-long // J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. 2008. Vol. 23, № 3. P. 399.
6. Григорьева Т.Ф., Барина А.П., Ляхов Н.З. Механохимический синтез в металлических системах. Новосибирск: Параллель, 2008.
7. Zuhailawati H., Yong T.L. // Mater. Sci. Eng. A. 2009. Vol. 505, № 1—2. P. 27.
8. Концевой Ю.В., Игнатъева Е.В. // Рациональное природопользование и передовые технологии материалов: Ежегод. произв.-практ. изд. ЦКП Урал-М. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2013. С. 75—78.
9. Ватолин Н.А., Концевой Ю.В., Цхай Е.В. // Сталь. 1996. № 12. С. 44.
10. Концевой Ю.В., Пастухов Э.А., Игнатъев И.Э. и др. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2009. № 2. С. 6.
11. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. М.: Стройиздат, 1965.
12. Ватолин Н.А., Концевой Ю.В., Цхай Е.В. // Металлы. 1997. № 1. С. 95.