

НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ В ТРУБКАХ НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС

В.Н. Колокольников¹⁾, И.В. Боровицкая¹⁾, В.В. Парамонова¹⁾, М.М. Ляховицкий¹⁾, А.И. Гайдар²⁾,
А.А. Ерискин^{3,4)}, Г.Г. Бондаренко^{2,3)}, П.В. Силин⁴⁾, В.Я. Никулин⁴⁾

¹⁾ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт металлургии и
материаловедения им. А.А. Байкова Российской Академии наук»,
Ленинский проспект, 49, Москва, 119991, ГСП-1, Россия, symp@imet.ac.ru

²⁾ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский
институт перспективных материалов и технологий»,
ул. Малая Пионерская, 12, Москва, Россия, bondarenko_gg@rambler.ru

³⁾ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
ул. Мясницкая, д. 20, Москва, 101000, Россия, gbondarenko@hse.ru

⁴⁾ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук»
Ленинский проспект, 53, Москва, 119991, ГСП-1, Россия, subzerno@gmail.com

В работе изучена возможность нанесения защитных покрытий во внутренней полости тонких трубок (Cu) на установках типа Плазменный фокус. Покрытия получены за счет эрозии материала анода (Cu, W) при плазменном импульсе. Обнаружено, что покрытия являются сложным композиционным материалом, содержащим Cu, O, C, W, Fe, Ni. Наиболее прочные покрытия получали при обработке внутренней поверхности трубок Ag плазмой в магнитном поле ≤ 0.1 Т.

Введение

В современной технике часто используются изделия, на внутренних поверхностях которых наносятся различные жаростойкие и коррозионностойкие покрытия. Для этих целей применяют методы плазменного порошкового напыления, газоциркуляционные методы и др. [1-3]. Однако при использовании этих методов покрытия в длинных и узких щелях, трубках получаются неоднородными по толщине и длине [4]. Поэтому поиск новых методов нанесения защитных покрытий в узких и длинных полостях является актуальной задачей.

Целью данной работы являлось исследование возможности использования установок Плазменный фокус (ПФ) для нанесения защитных покрытий в длинных трубках. Особенностью установок ПФ является генерация тонких струй плазмы высокой мощности при высокой скорости плазмы [5].

Методика эксперимента

Для исследований использовалась установка ПФ-4 (ФИАН) с энергией, вкладываемой в электрический разряд, ~ 4 кДж при длительности импульса $< 0,1$ мкс. Скорость плазменной струи составляла $> 4 \cdot 10^7$ см/с. Плазмообразующими газами были Ar и D при давлении 1-2 Торр.

Образцы для нанесения покрытий представляли собой трубки из неотожженной меди с внутренним диаметром 12 мм и длиной 70 мм. Покрытия внутренних полостей трубок получали за счет эрозии в плазменном пинче материала анода установки – Cu и W. Эксперименты проводились как без магнитного поля, так и в магнитном поле, создаваемом кольцевыми магнитами с индукцией $\sim 0,08-0,09$ Т, которые устанавливались на концах трубки.

Анализ структуры внутренней поверхности выполняли на плоских образцах $1,4 \times 1,4$ см², вырезанных из Cu трубок после воздействия Ar и D плазмы. Элементный анализ покрытий проводили

на растровом микроскопе EVO-40 с микрорентгеновской приставкой X-Flash. Микротвердость покрытий и P(H) диаграмму определяли на установке Nanotest (ИМЕТ РАН). Напыление покрытий в Cu трубках выполняли по схеме, предложенной в [7].

Результаты эксперимента

На рис. 1 а, б показан элементный анализ покрытия, полученного при воздействии D и Ar плазмы. Видно, что в покрытии помимо Cu и W содержатся O и C. При небольшом увеличении энергии плазмы (рис. 1б) в спектре появляются Fe и Ni.

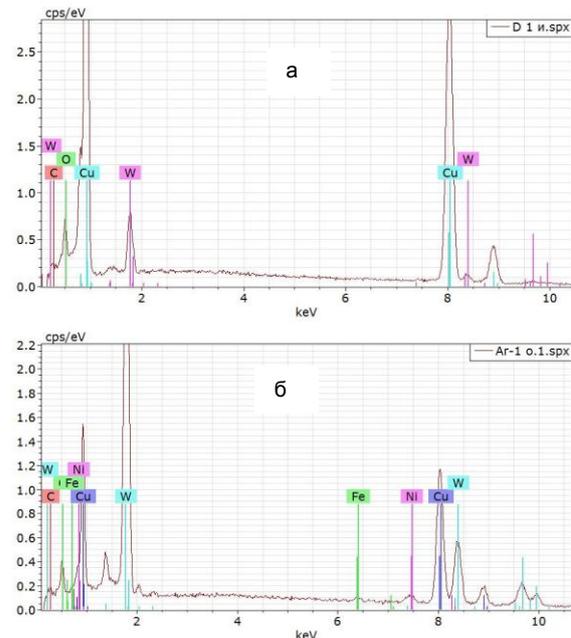
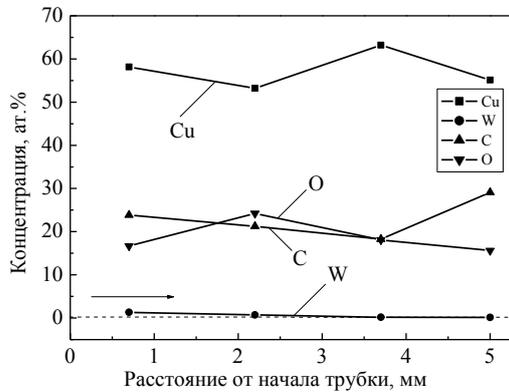
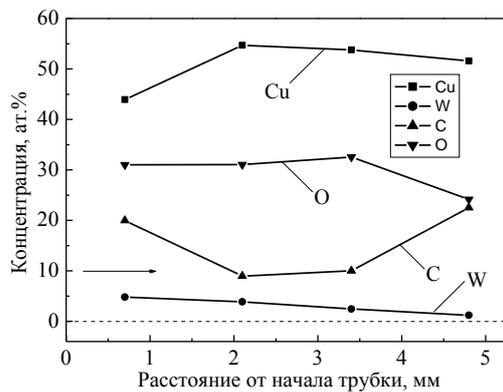


Рис. 1. Элементный состав покрытия на медной трубке: а – дейтериевая плазма, $E_{cp} > 60$ отн. ед; б – аргоновая плазма в магнитном поле, $E_{cp} > 80$ отн. ед.

Распределение элементов: Cu, W, O и C вдоль медной трубки показано на рис. 2. Наибольшая относительная доля от общего содержания элементов принадлежит Cu, O и C. Доля W увеличивается с ростом энергии плазмы (рис. 2б), при этом растет градиент концентрации вдоль трубки.



а

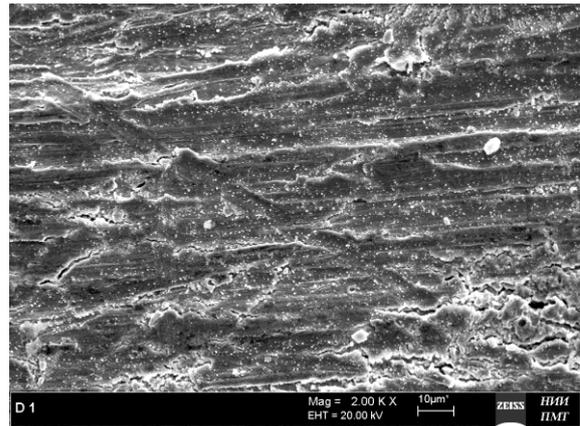


б

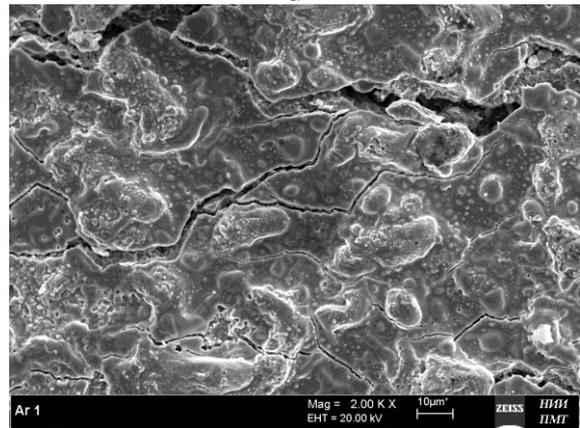
Рис. 2. Распределение элементов: Cu, O, C и W в покрытии вдоль трубки: а – дейтериевая плазма, $E_{cp} > 60$ отн. ед; б – аргоновая плазма в магнитном поле, $E_{cp} > 80$ отн. ед. Стрелкой показано направление движения плазмы.

Структура покрытия во внутренней полости Cu трубки показана на рис. 3. Трещины на поверхности вызваны механической деформацией при рихтовке образцов. Видно, что при воздействии D плазмы покрытие имеет полосчатую структуру с небольшими скоплениями капель металла. В случае Ar плазмы наблюдаются многоуровневые скопления капель металла в оплавленной матрице, покрытой беспорядочными трещинами.

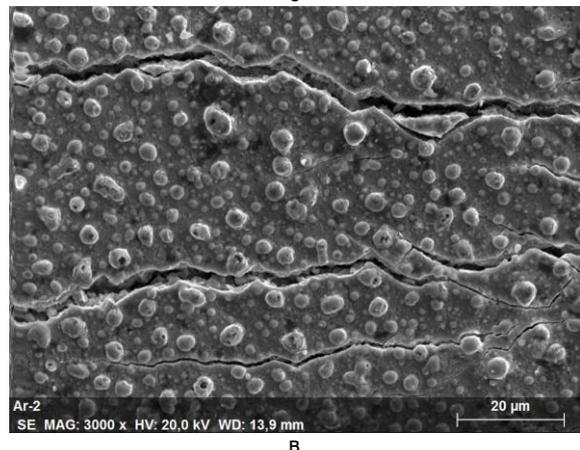
На рис. 4 представлены типичные зависимости микротвердости (HV) покрытия внутренней полости медной трубки в сравнении с нелегированной медью. Видно, что вблизи поверхности покрытия имеется «рыхлый» слой толщиной ~20 - 30 нм. Для нелегированной меди на этой глубине наблюдаются наибольшие значения HV (27 ГПа). После обработки поверхности Ar плазмой значение HV несколько меньше (25 ГПа). Значительное



а



б



в

Рис. 3. Структура покрытия внутренней полости медной трубки: а – дейтериевая плазма, $E_{cp} > 60$ отн. ед; б, в – аргоновая плазма в магнитном поле, $E_{cp} > 80$ отн. ед.

уменьшение HV имеет место после обработки поверхности D плазмой (13 ГПа). Как следует из кривых микротвердости (рис. 4), толщина слоя покрытия составляет ~650 – 700 нм; это глубина, на которой HV ~1,2 – 1,3 ГПа, что соответствует микротвердости меди после механической прокатки.

Обсуждение результатов

Как следует из результатов, представленных на рис. 1, 2, покрытия на внутренней полости Cu трубок содержат, в основном, Cu, O и C. Значительно меньше концентрация W и других элемен-

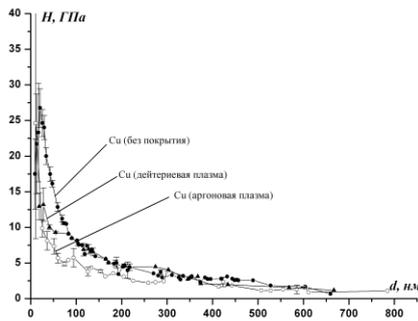


Рис. 4. Микротвердость покрытия во внутренней полости Cu трубки.

тов (Fe, Ni). Высокое содержание Cu и O связано с присутствием оксида меди (I) Cu_2O , который всегда покрывает поверхность Cu пластины. Перенос Cu с анода дает меньший вклад, на что указывает низкая концентрация W в покрытии.

Высокое содержание C может иметь 3 причины: первая – это повышенное содержание паров углеводов в вакуумной камере; вторая – эрозия корпуса анода, изготовленного из стали типа 12X18H10T (Fe~66%; Cr~17-19%; Ni~9-11%; Ti~0.6%; C<0.12%; Si<0.8%; Mn<2.0% и др), что отчасти подтверждается присутствием Fe и Ni в спектрах; третья – применение в качестве вакуумного уплотнителя капролона, рабочая температура которого <110°C [6]. При импульсных токах в сотни килоампер поверхность металла разогревается до значительно больших температур, что приводит к деструкции материала с выделением C.

Полученные покрытия являются сложным по составу композиционным материалом, свойства которого зависят от содержания различных химических элементов (рис. 1, 2). Из данных рис. 3 можно сделать качественный вывод, что эффективность взаимодействия плазмы со стенками Cu трубки зависит от внешнего магнитного поля. Это хорошо видно из рис. 3 б, в: воздействие Ar плазмы в магнитном поле на стенки медной трубки приводит к образованию стеклообразной структуры, содержащей капли металла.

Механические свойства покрытий также сильно зависят от способа обработки поверхности плазмой. Высокие значения микротвердости нелегированной Cu в слоях <50 нм связаны с размерным эффектом [8]. Уменьшение HV покрытий после обработки поверхности D плазмой, скорее всего, вызваны отжигом Cu, микротвердость которой резко падает с ростом температуры. Этот же процесс отжига Cu наблюдается и в покрытиях при обработке Ar плазмой в магнитном поле, однако присутствие довольно высокой плотности шарообразных скоплений частиц металла (W, Ni,

Fe), распределенных по толщине покрытия, приводит к эффективному увеличению HV до 25 ГПа, что близко к значению микротвердости исходной Cu (27 ГПа). P(H) диаграммы подтверждают наличие тонкого слоя 20-30 нм, более прочного по сравнению с остальной частью покрытия.

Заключение

Проведенные исследования показали принципиальную возможность нанесения защитных покрытий на внутреннюю полость длинных трубок (Cu) на установке типа Плазменный фокус. Обнаружено, что покрытия являются сложным композиционным материалом, в котором содержатся различные химические элементы: Cu, O, C, W, Fe, Ni, поступающие с анодного узла установки.

Высокой прочностью обладают покрытия, полученные при обработке внутренней полости Cu трубок Ar плазмой в магнитном поле $\leq 0,1$ Т.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-02-05995 «Исследование физики аксиальных плазменных потоков и пучков быстрых частиц в плазме, создаваемой сильноточным разрядом типа плазменный фокус и изучение их взаимодействия с конденсированными средами»).

Список литературы

1. *Калита В.И., Комлев Д.И.* // Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой. М.: Изд-во «Лидер М», 2008. 386 с.
2. *Арзамасов Б.Н., Беляевский А.К., Логунов А.В. и др.* // Циркуляционный метод получения диффузионных покрытий на деталях газотурбинных двигателей и перспективы его развития. Вестник машиностроения, 1991. № 11. С. 43-48.
3. *Бондаренко Г.Г., Кабанова Т.А., Рыбалко В.В.* // Основы материаловедения: учебник для студентов вузов (под ред. Г.Г.Бондаренко). М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 760 с.
4. *Симонов В.Н., Унчигова М.В.* // Разработка режимов получения диффузионных покрытий на внутренних полостях деталей газоциркуляционным способом. Сб. Материалов V Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». (Москва, 26-29 ноября 2013). М.: Изд-во ИМЕТ РАН, 2013. С. 497-498.
5. *Baranova E.O., Vikhrev V.V., Krauz V.I. et al.* // Study of a cumulative jet in a plasma focus discharge by the method of shearing interferometry. Plasma Physics Reports, 2012. V. 38. No 9. P. 751-760.
6. Патент на полезную модель №146450. «Плазмохимический реактор». Зарегистрировано 10 сентября 2014 г. Авторы: Колокольцев В.Н., Никулин В.Я., Боровицкая И.В., Силин П.В., Полухин С.Н. Патентообладатели – ФИАН, ИМЕТ.
7. *Коршак В.В., Фрунзе Т.М.* Синтетические гетероцепные полиамиды. М., 1962.
8. *Головин Ю.И.* Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.

COATING DEPOSITION IN TUBE BY THE PLASMA FOCUS DEVICE

V.N. Kolokoltsev¹, I.V. Borovitskaya¹, V.V. Paramonova¹, M.M. Lyahovitskiy¹, A.I. Gaida²,
A.A. Eriskin^{3,4}, G.G. Bondarenko^{2,3}, P.V. Silin⁴, V.Ya. Nikulin⁴
¹A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS