

С.А.Гученко¹, Н.Х.Ибраев¹, Д.А.Афанасьев¹, Е.Хуанбай²

¹Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова;

²Карагандинский государственный технический университет

КОМПОЗИЦИОННЫЕ КАТОДЫ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Мақалада шахта жабдықтарының бөлшектеріне жемірілуге қарсы бұркеулерді жасаудың әдістері қарастырылған. Қазіргі уақытта Қарағанды көмір бассейнінің шахталарында қолданылып жүрген мырыш бұркемелермен салыстыру нәтижелері келтірілген. Салыстыру нәтижелері нитрид — титан негізіндегі бұркемелердің жемірілуге өте төзімді екендігін көрсетеді. Бірақ оларды металл бетіне қондыру алдын ала дайындықты қажет етеді, бұл өз кезегінде детальдың бағасын жоғарылатады. Қуыс катодты плазмогенератордың көмегімен азоттау металл бетінде мырыш бұркемелеріне қарағанда жемірілуге бірнеше есе төзімді бұркемелерді, металдың бетін тазаламай алуға мүмкіндік береді.

In work results of research of the composite cathodes used for ionic — plasma processing of materials are resulted. The quantitative analysis of element structure of composite cathodes was carried out on electronic microscope JEOL JSM-5910. By mathematical processing power spectra under special program PHI-RHO-Z concentration of elements researches of a microstructure of the composite cathodes received on an electronic microscope, working in a mode of secondary electronic issue have been determined are lead. It is shown, that the part of composite cathodes represents firm solutions.

Введение

Ионно-плазменные методы химико-термической обработки являются наиболее эффективными при нанесении защитных покрытий на изделия и получения диффузионных слоев [1–6]. Данные методы, по сравнению с традиционными, такими как газовая диффузионная обработка (цементация, силицирование и др.) или электродуговая металлизации и плазменная наплавка, имеют более высокие технологические и энергетические характеристики. Например, ионное азотирование по сравнению с газовым позволяет сократить время обработки в 10 раз, снизить расход технологического газа в 15–20 раз и увеличить глубину диффузионного слоя на 50 %. Ионно-плазменные методы нанесения покрытий позволяют получать высокую прочность сцепления покрытия с основой, повысить его плотность и равномерность, а также снизить пористость.

Здесь мы сошлемся на российскую программу «Создание авиационно-космических материалов и развитие специальной металлургии России с учетом восстановления производства стратегических материалов (СМ) и малотоннажной химии на 2005–2008 годы». Основными целями программы являлись повышение эффективности производства вооружения, военной и специальной техники за счет восстановления и организации малотоннажного производства стратегических, дефицитных и импортозамещающих материалов для изделий авиационной и ракетно-космической, морской и других видов техники.

В 2005 г. были начаты работы по реализации инвестиционного проекта «Техническое перевооружение участков по разработке технологии изготовления шликеров и катодов» (ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Москва). Участок предназначен для производства и разработки материалов для высокотемпературных покрытий (фритты, эмалевые шликера), стеклокерамических и углеродкерамических композиционных материалов «Стеклоларм» и «Геларм», компонентов покрытий (порошки оксидов, боридов, силицидов гафния и циркония), а также изделий из стеклокерамических и керамических композиционных материалов и катодов из никелевых, кобальтовых и алюминиевых сплавов для нанесения ионно-плазменных жаростойких и упрочняющих покрытий, повышающих ресурс лопаток турбины и компрессора ГТД в 2–2,5 раза. В связи с резким снижением объемов выпуска изделий производство катодов было снижено до 100 шт. в год, а после реорганизации ССЛЗ выпуск катодов был прекращен. Наносимые этим методом ионно-плазменные покрытия не имеют мировых аналогов и применяются на всех моторостроительных авиационных заводах и некоторых заводах «Газпрома», производящих и ремонтирующих газотурбинные газоперекачивающие установки.

В настоящей работе приведены результаты исследования композиционных катодов, полученных методом индукционного плавления на установке ИСЭ СО РАН (г.Томск).

РФЭС анализ композиционных катодов

Количественный анализ элементного состава композиционных катодов проводился на электронном микроскопе JEOL JSM-5910 (Карагандинский индустриальный университет). Основная работа была связана с электронно-микроскопическими исследованиями композиционных катодов и разработкой методики проведения количественного анализа элементного состава и определения стехиометрического состава полученных образцов материалов.

Исследуемый образец в форме диска диаметром 8 мм и высотой 3 мм вставляется в углубление держателя образца микроскопа. Образец должен иметь хороший электрический контакт с держателем образца. При необходимости применяется проводящий клей. После нанесения клея необходимо выдержать в течение 30 минут для просушивания. Держатель с образцом помещается в камеру микроскопа. Проводится откачка воздуха из камеры до достижения вакуума не менее чем 10^{-4} мм рт. ст. На экране компьютерного монитора видно место положения объекта с указанием координат по осям X и Y . Также должен быть виден острый ствол электронной пушки. Затем электронные лучи направляются к объекту. Устанавливается энергия электронов зонда 20 кэВ, ток зонда 1 нА, продолжительность измерения нужно выбрать равной 30 с. Рабочее расстояние от электронной пушки до поверхности образца устанавливается равным 10 мм, диаметр зонда 3 нм. Значение энергии электронов зонда выбирается из соображений достаточного эффективного возбуждения K и L линии всех химических элементов, содержащихся в сложном катоде. Характеристические рентгеновские излучения, возбужденные электронным лучом, имеют энергию, строго определенную для каждого элемента. Излучение регистрируется с помощью рентгеновского спектрометра с энергетической дисперсией JXA-8200, встроенного в микроскоп с детектором частиц EX54133MUK. На экране компьютерного монитора получают характеристические рентгеновские энергодисперсионные спектры.

На рисунках 1–9 приведены характеристические рентгеновские энергодисперсионные спектры элементных составляющих композиционных катодов на основе сплавов цветных металлов.

Анализ энергодисперсионных спектров

В спектрах (рис. 1–9) легко различимы пики, соответствующие всем химическим элементам исследуемых образцов. Не обнаружены пики углерода, что свидетельствует о химической чистоте образцов.

Из энергодисперсионных спектров найдены энергии квантов контрольных линий, полностью совпадающие с табличными и вычисленными по закону Мозли [7].

Известно, что закон Мозли устанавливает связь между атомным номером элемента и энергией характеристического рентгеновского излучения. Для вычисления энергии квантов контрольных линий наблюдаемые из полученных рентгеновских энергодисперсионных спектров использовали закон Мозли с учетом энергии спин-орбитальной связи, релятивистской поправки и Лэмбовского сдвига. Появление характеристического рентгеновского энергодисперсионного спектра исследуемых образцов можно объяснить на основании квантово-механических представлений о строении атома следующим образом.

Энергия связи внутренних электронов в атоме настолько велика, что если такой электрон переходит во внешнюю незаполненную оболочку или вообще удаляется из атома, то возбужденный атом или ион оказывается неустойчивым по отношению к ионизации, сопровождающейся перестройкой электронной оболочки и образованием устойчивого иона. Атом вернется в невозбужденное состояние путем самопроизвольного заполнения вакансии электроном с внешнего уровня. Избыток энергии выделяется в виде кванта рентгеновского излучения с энергией, равной разности энергии электрона на внешнем и вакантном уровнях и определяется по формуле:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon(n_1, l_1, j_1) - \varepsilon(n_0, l_0, j_0), \quad (1)$$

где индекс 1 относится к конечному, а 0 — к исходному состоянию электрона; n — главное квантовое число; l — орбитальное квантовое число; j — квантовое число полного углового момента, зависящее от спина $s = \pm 1/2$ и орбитального углового момента $j = l + s$. В соответствии с правилами отбора возможны только такие переходы, при которых квантовые числа изменяются определенным образом, например, для наиболее интенсивных линий спектра (дипольные переходы) $|\Delta l| = 1$; $|\Delta j| = 0$ или 1; $\Delta n \neq 0$.

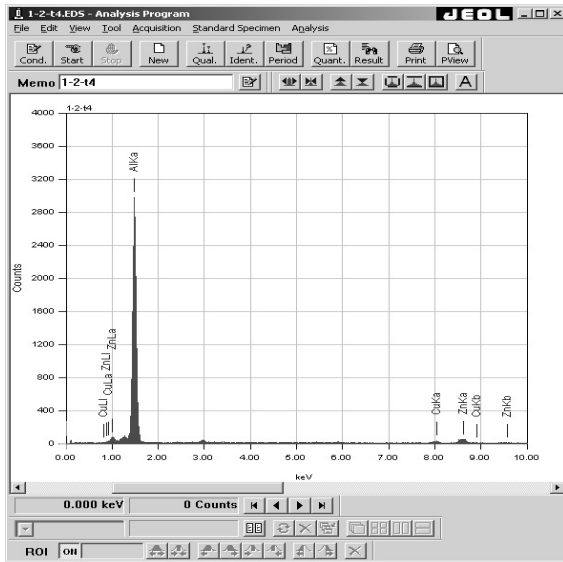


Рис. 1. РФЭС композиционных катодов состава Zn–Cu–Al

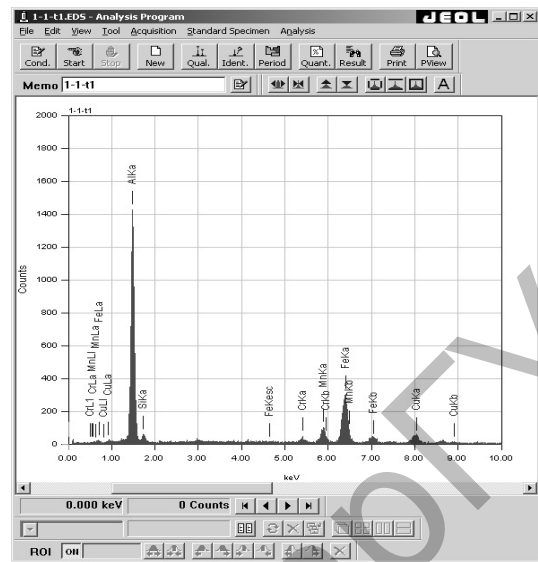


Рис. 2. РФЭС композиционных катодов состава Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al

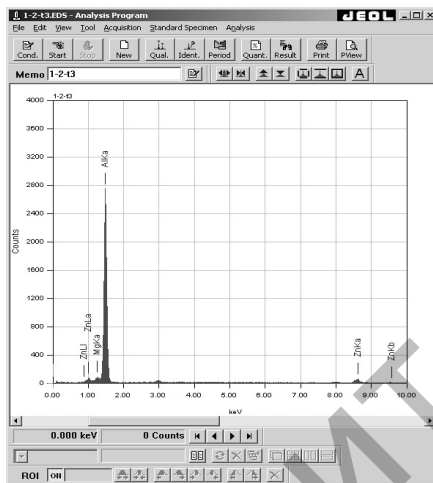


Рис. 3. РФЭС композиционных катодов состава Zn–Al

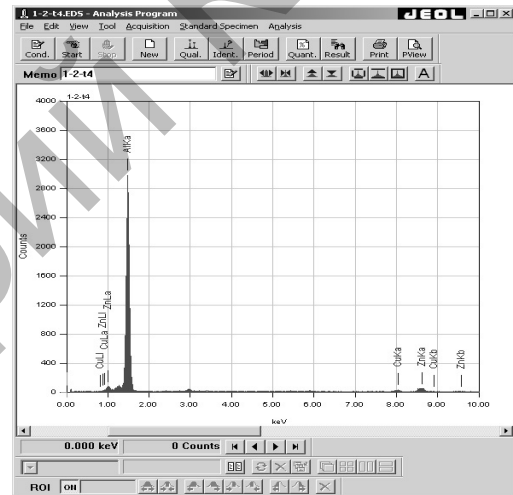


Рис. 4. РФЭС композиционных катодов состава Zn–Cu–Al (2)

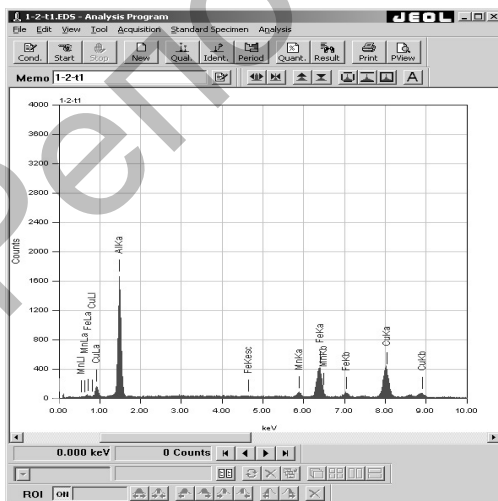


Рис. 5. РФЭС композиционных катодов состава Mn–Fe–Cu–Al

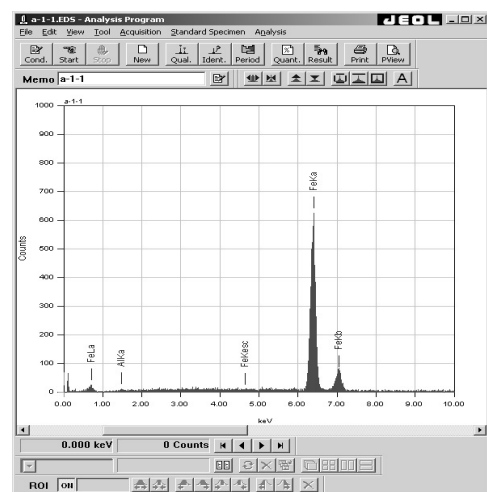


Рис. 6. РФЭС композиционных катодов состава Al–Fe (1)

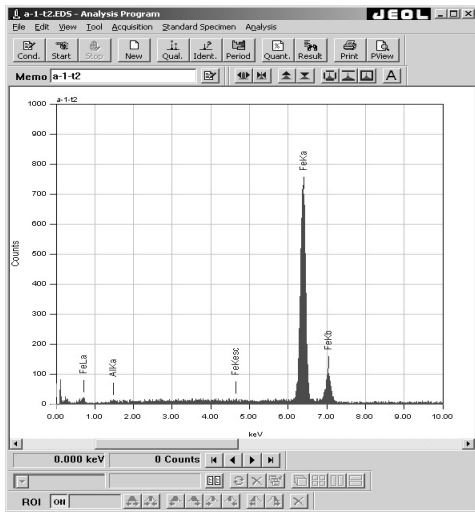


Рис. 7. РФЭС композиционных катодов состава Fe (1)

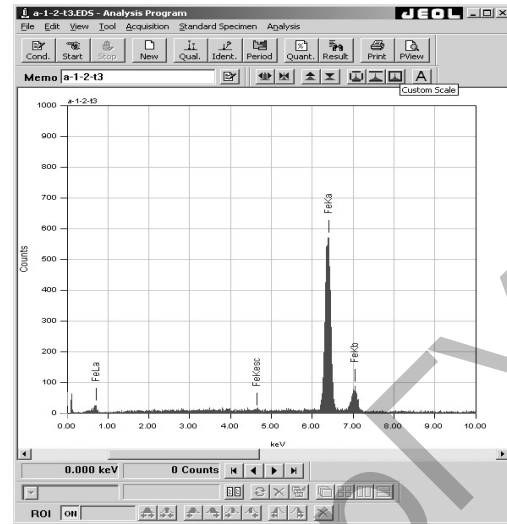


Рис. 8. РФЭС композиционных катодов состава Fe (2)

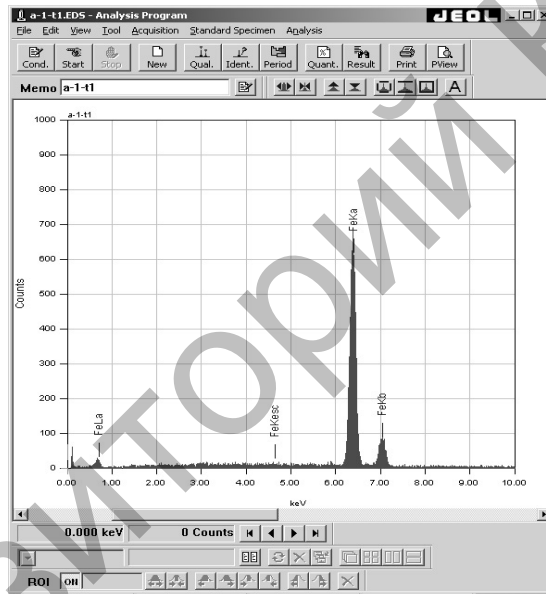


Рис. 9. РФЭС композиционных катодов состава Al-Fe (2)

Избыток энергии $\Delta\varepsilon$ определяет частоту испущенного атомом фотона, соответствующую одной из линий характеристического излучения. Заряженная частица, например, первичный электрон, падающий на образец, должна обладать достаточной энергией для того, чтобы выбить электроны, находящиеся в состоянии с квантовыми числами n, l, j , удовлетворяющей условию:

$$eV \geq \varepsilon(n, l, j), \quad (2)$$

где V — ускоряющий потенциал электрона; $\varepsilon(n, l, j)$ — энергия связи электрона уровня с ядром [7]:

$$\varepsilon(n, l, j) = Rhc \frac{M_z}{M_z + m_0} \left[\frac{(z - \sigma_1)^2}{n^2} - \frac{\alpha^2 (z - \sigma_2)^4}{n^4} \times \left(\frac{n}{j + 1/2} - \frac{3}{4} \right) \right], \quad (3)$$

где R — постоянная Ридберга; h — постоянная Планка; M_z, m_0 — массы ядра и электрона; σ_1, σ_2 — постоянные полного и внутреннего экранирования электронов соответственно; $\alpha^2 = -5,33 \cdot 10^{-5}$ — безразмерная постоянная; z — атомный номер элемента; c — скорость света. Таким образом, на основе формулы (3), с учетом указанных выше поправок, можно получить выражение закона Мозли, которое использовалось для вычисления энергии квантов характеристического спектра [7]:

$$\Delta\varepsilon = Rhc \left[\frac{(z - \sigma_1)^2}{n_0^2} - \frac{(z - \sigma_2)^2}{n_1^2} \right]. \quad (4)$$

Применяемые данные для вычисления известны из теории атомных спектров. Вычисленные значения $\Delta\varepsilon$ каждого элемента соответствуют пикам энергодисперсионных спектров, показанных на рисунках 1–9. Для линий M_α начальное атомное состояние определяется квантовыми числами $n_0 = 3$, $l = 2$, $j = 5/2$; конечное состояние $n_1 = 4$, $l = 3$, $j = 7/2$. Для линий K_α $n_0 = 1$, $l = 0$, $j = 1/2$; $n_1 = 2$, $l = 1$, $j = 3/2$. Для линий L_α $n_0 = 2$, $l = 1$, $j = 3/2$; $n_1 = 3$, $l = 1$, $j = 5/2$. Атомное состояние с орбитальным квантовым числом $l = 0$ является s -состоянием; $l = 1$, p -состоянием; $l = 2$, d -состоянием; $l = 3$, f -состоянием.

Путем математической обработки энергодисперсионных спектров по специальной программе PHI-RHO-Z были определены концентрации элементов. Концентрации элементов определены с использованием аналитических сигналов Al K_α , Si K_α , Cr K_α , Mn K_α , Fe K_α , Cu K_α , имеющих максимальные интенсивности. Результаты количественного анализа приведены в таблице 1

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета стехиометрии компонентов

| Соединения | k_1 | k_2 | k_3 | k_4 | k_5 | k_6 | Химическая формула по данным анализа |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| Zn–Cu–Al | 1 | 1,34 | 39,6 | | | | ZnCu _{1,34} Al _{39,6} |
| Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al | 1 | 4,32 | 4,64 | 5,26 | 18,39 | 67,85 | CrMn _{4,32} Si _{4,64} Cu _{5,26} Fe _{18,39} Al _{67,85} |
| Zn–Al | 1 | 65,45 | | | | | ZnAl _{65,45} |
| Zn–Cu–Al | 1 | 1,10 | 38,49 | | | | ZnCu _{1,10} Al _{38,69} |
| Mn–Fe–Cu–Al | 1 | 10,07 | 17,37 | 47,19 | | | MnFe _{10,07} Cu _{17,37} Al _{47,19} |
| Al–Fe | 1 | 43,04 | | | | | AlFe _{43,04} |
| Al–Fe | 1 | 90,56 | | | | | AlFe _{90,56} |

Микроструктура композиционных катодов на основе сплавов цветных металлов

Многокомпонентные системы при кристаллизации образуют обычно мелкие кристаллики, связанные между собой аморфными прослойками. Кристаллики могут состоять из одной или нескольких компонент. В других случаях кристаллики могут иметь одинаковый состав и строение. В частности, двухкомпонентный расплав из А и В при кристаллизации может выделять или кристаллики одной компоненты А или В, или же кристаллики, содержащие обе компоненты А и В.

Микроструктурные свойства композиционных катодов на основе сплавов цветных металлов имеют сложный характер, поскольку они обусловлены различными самостоятельными, но взаимосвязанными физическими процессами.

Нами были проведены исследования микроструктуры композиционных катодов состава Zn–Cu–Al, Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al, Zn–Al, Zn–Cu–Al, Mn–Fe–Cu–Al, полученных на электронном микроскопе JEOL JSM-5910, работающем в режиме вторичной электронной эмиссии (рис. 10–17).

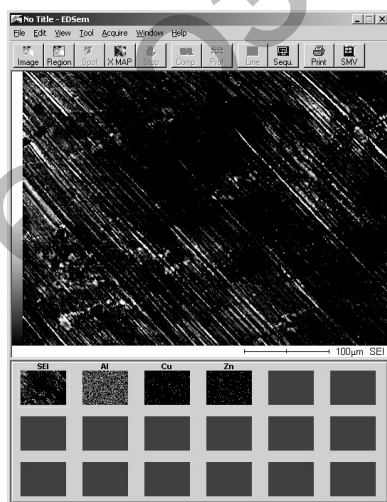


Рис. 10. Микроструктура сложного катода состава Zn–Cu–Al (1)

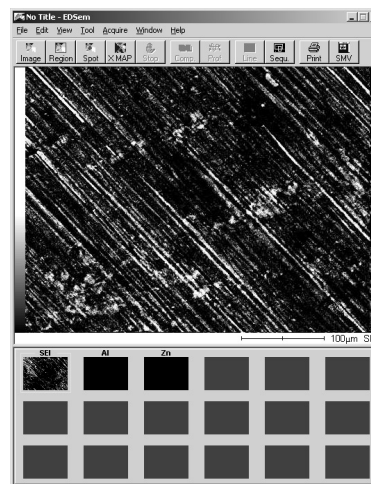


Рис. 11. Микроструктура сложного катода состава Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al

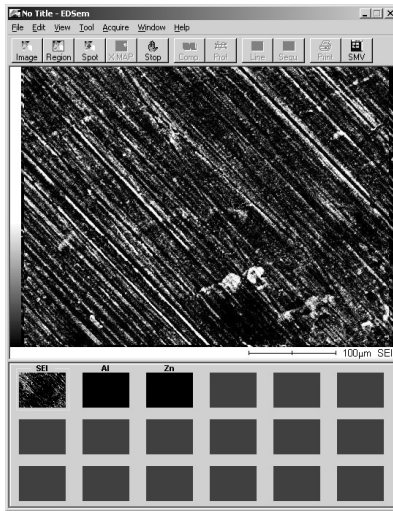


Рис. 12. Микроструктура сложного катода состава Zn-Cu-Al (2)

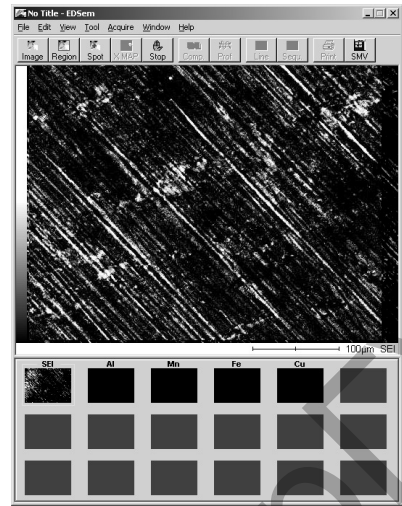


Рис. 13. Микроструктура сложного катода состава Mn-Fe-Cu-Al

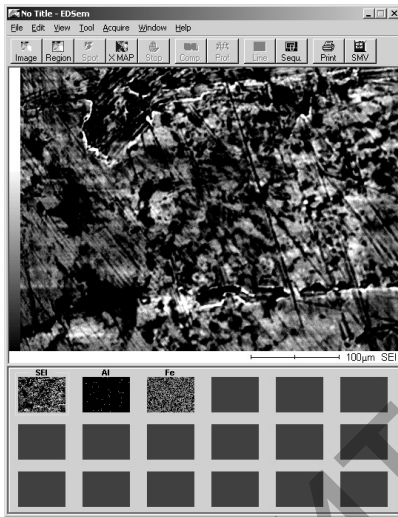


Рис. 14. Микроструктура сложного катода состава Al-Fe (1)

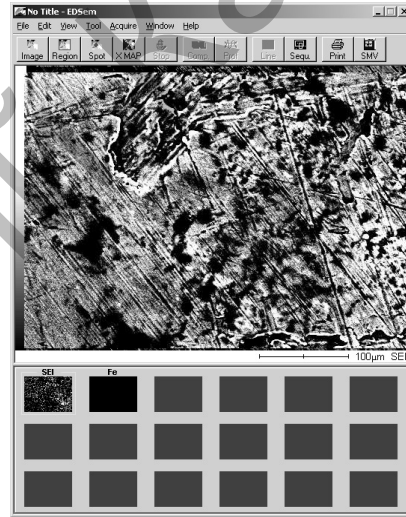


Рис. 15. Микроструктура сложного катода состава Fe (1)

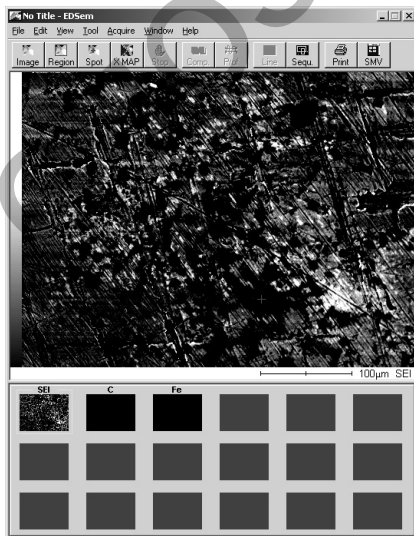


Рис. 16. Микроструктура сложного катода состава Fe (2)

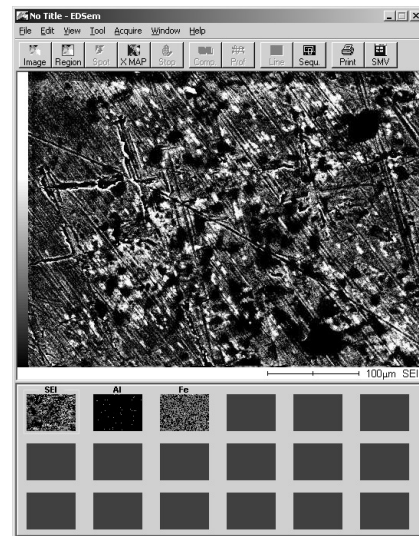


Рис. 17. Микроструктура сложного катода состава Al-Fe (2)

В изотропной сплошной среде дислокация полностью описывается ее вектором Бюргерса. Все дислокации, вектор Бюргерса которых параллелен их оси, являются винтовыми. Другой тип дислокаций, называемых краевыми дислокациями, возникает, когда направление относительного смещения двух частей кристалла (вектор Бюргерса) выбрано перпендикулярно краю разреза. Помимо этих предельных случаев, возможна любая промежуточная ориентация. Дислокации, полностью лежащие в одной плоскости со своим вектором Бюргерса, часто называют скользящими дислокациями, в то время как дислокационные петли, которые не лежат в плоскости с их векторами Бюргерса, называют призматическими, потому что их поверхность скольжения имеет форму призмы. При чистом скольжении скользящая дислокация не может покинуть свою плоскость скольжения, а призматическая — свою поверхность, за исключением случая чисто винтовой дислокации. В этом случае ось дислокации и вектор Бюргерса параллельны, и нельзя определить плоскость скольжения. Поэтому винтовая дислокация в принципе может перемещаться параллельно самой себе в любом направлении.

Движение дислокаций скольжением называют «консервативным» в противоположность «неконсервативному» перемещению, которое происходит перпендикулярно плоскости скольжения дислокации и требует диффузионного переноса материала, т.е. образования или поглощения дефектов. Такое перемещение дислокаций называют переползанием.

На рисунках 10–13 отчетливо видны линии скольжения. Механизм их возникновения состоит в следующем: в местах выхода движущихся дислокаций на свободной поверхности кристалла остается поверхностная ступенька, по которой происходит перемещение дислокаций шириной в один вектор Бюргерса. Поверхностная ступенька, образованная единичной дислокацией, неразличима, однако путь целой группы дислокаций может быть виден с помощью оптического или электронного микроскопа.

Изучение линий скольжения позволяет ответить на такие важные вопросы: сколько дислокаций движется вместе с группой; являются ли источники дислокаций плоскими или пространственными; какая плоскость скольжения является предпочтительной и т.д.

Из рисунков 10–13 видно, что в композиционных катодах возникают более широкие и более ярко выраженные линии скольжения, чем в чистой меди. Ярко выраженная линия скольжения соответствует, очевидно, не полосе скольжения, а скорее, одной большой ступеньке, возникающей при скольжении по одной атомной плоскости. Плотность дислокаций в отожженных образцах составляет $\sim 10^6 \text{ см}^{-2}$ и соответствует плотности дислокаций в достаточно совершенных монокристаллах чистой меди. В процессе легкого скольжения плотность дислокаций возрастает до $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$. В первичных плоскостях скольжения дислокации располагаются отдельными группами, состоящими примерно из 20 дислокаций одного знака.

Дислокации, наблюдаемые в композиционных катодах, несколько отличаются по виду от дислокаций в чистых металлах. Вместо объемных трехмерных сплетений дислокаций преобладает плоскостное их распределение. Одной из причин такого изменения дислокационной структуры в результате легирования является, по-видимому, повышенное сопротивление поперечному скольжению. Кроме того, в неоднородных твердых растворах прохождение первых дислокаций ослабляет межатомные связи и облегчает последующее прохождение дислокаций по тому же пути.

Дислокации в композиционных катодах (рис. 10–13) расщеплены на частичные. Частичные дислокации ограничивают дефект упаковки, ширина которого пропорциональна поверхностной энергии дефекта упаковки. Как правило, легирование металла ведет к уменьшению поверхностной энергии и способности дислокаций к поперечному скольжению, и тем значительнее, чем большую валентность имеет легирующий элемент.

На рисунках 14–17 отчетливо видна субзеренная структура, включающая в себя дисперсные частицы как средних размеров (0,1–1 мкм), так и крупные включения (5–50 мкм). Первые существенно замедляют рекристаллизацию и рост зерен. Вторые из-за своих больших размеров порождают проблемы совместимости их свойств со свойствами матрицы, вследствие чего в окрестности включения возникают сильные градиенты напряжений.

Наличие крупных включений приводит к неравномерному испарению композиционного катода, снижающего качество покрытий.

Из приведенных выше экспериментальных данных следует, что прежде чем использовать катод для ионно-плазменной обработки материала, необходимо исследовать его микроструктуру и убедиться, что данный катод представляет собой твердый раствор.

Композиционные катоды и твердые растворы

В соответствии с представлениями школы академика Н.С.Курнакова, твердыми растворами, или смешанными кристаллами (сплавами), называют все твердые фазы переменного состава компонент, образованные без нарушения однородности в малых объемах. Различают три типа твердых растворов [8]: 1) замещения, 2) внедрения и 3) вычитания.

Если компоненты обладают одинаковыми кристаллическими решетками (изоморфны), то их сплавы называют твердыми растворами.

Если энергия решетки, а следовательно, и постоянные решетки, молекулярные объемы и температура плавления взаимодействующих компонент различаются значительно, то образуются эвтектики. Твердые растворы образуются из веществ с мало различающимися температурами плавления, энергиями решеток и постоянными решетками.

Если вещества имеют близкие по величине молекулярные объемы, то они образуют твердые растворы. Щелочно-галогенидные соединения при комнатной температуре полностью взаимно растворяются, если их постоянные решетки различаются в пределах 5–6 % [9]. Когда постоянные решетки различаются больше, чем на 13 %, то даже при высокой температуре не наблюдается полной взаимной растворимости таких солей.

Замещение ионов растворителя меньшими ионами растворяемого вещества приводит к уменьшению размеров элементарной ячейки кристаллической решетки. При замещении ионов растворителя ионами растворенного вещества большего радиуса размеры элементарной ячейки кристаллической решетки возрастают. При небольших рациональных отношениях между числом частиц обеих компонент иногда происходит упорядоченное расположение частиц обеих компонент. В решетках с упорядоченным расположением атомов элементарная ячейка кристаллической решетки часто значительно превышает по величине элементарную ячейку неупорядоченного твердого раствора. В пределах, значительно превышающих объем элементарной кристаллической решетки, образуется новое химическое соединение. Такие упорядоченные твердые растворы получили название сверхструктуры.

В кристаллах твердых растворов внедрения частицы растворенного вещества располагаются между узлами кристаллической решетки растворителя. Структуры внедрения образуются при растворении неметаллов с малыми атомными радиусами, относящимися к началу таблицы Д.И.Менделеева, например, водорода, бора, углерода, азота. Внедрение чужеродных атомов легче происходит в кристаллические решетки с большими промежутками между частицами. Лучше всего растворы внедрения образуются в кубической гранецентрированной и гексагональной решетках.

Сильная связь между внедренными атомами и атомами растворителя сопровождается образованием тугоплавких структур большой твердости, например, карбидов вольфрама, титана и др. Образование твердого раствора внедрения сопровождается небольшим увеличением постоянной решетки растворителя.

Твердые растворы вычитания или растворы с дефектной решеткой получаются при образовании химических соединений. В этом случае атомы растворенного вещества замещают в узлах не все атомы растворителя. Некоторые узлы остаются пустыми. Решетка в целом получается дефектной.

Дефектность увеличивается с возрастанием количества растворяемого вещества в растворителе и с уменьшением химической устойчивости соединения.

Искажение кристаллической решетки при образовании твердого раствора сопровождается изменением свойств материалов. Твердые растворы металлов менее пластичны, чем исходные материалы. Электрическое сопротивление твердых растворов металлов больше сопротивления компонент. В твердых растворах имеется местное искажение кристаллической решетки при замещении иона большего радиуса ионом меньшего радиуса и наоборот. Вследствие этого период кристаллической решетки в разных участках решетки будет различным. Рентгенографически измеряется некоторая средняя величина параметра решетки, которую и принимают за параметр решетки твердого раствора.

Потенциальная энергия частиц кристаллической решетки, содержащей посторонние частицы, изменена по сравнению с энергией частиц ненарушенной решетки на величину энергии растворения одной компоненты в другой. Поэтому образование твердого раствора сопровождается выделением или поглощением небольшого (порядка сотен калорий на моль) количества тепла $\Delta U_{т.р.}$, называемого или теплотой смешения, или теплотой растворения, или теплотой при образовании твердого раствора, а иногда теплотой образования твердого раствора.

При замещении ионов, принадлежащих к одной и той же группе периодической системы, энергия взаимодействия частиц изменяется мало, поэтому и энергия при образовании твердого раствора

будет также небольшой и определится упругой энергией искаженной решетки. Запас упругой энергии за счет искажений решетки определяется отношением ионных радиусов при замещении, коэффициентом сжатия и модулем сдвига. Чем больше запас упругой энергии в твердом растворе, тем больше энергия растворения, тем сильнее изменяются свойства тел.

Некоторые свойства твердых растворов изменяются аддитивно: например, коэффициент преломления, частота остаточных лучей, плотность и пр.; другие свойства (температура плавления, механические, электрические) изменяются в зависимости от концентрации компонент по кривой с максимумом или минимумом.

Современный физико-химический анализ твердых растворов основывается на принципе непрерывности и принципе соответствия, которые В.Я.Аносов и С.А.Погодин сформулировали следующим образом [10]. При непрерывном изменении параметров, определяющих состояние системы, свойства отдельных фаз ее изменяются непрерывно. Свойства системы, взятой в целом, изменяются тоже непрерывно, но при условии, что не возникают новые фазы и не исчезают старые. При изменении числа фаз и степеней свободы свойства системы изменяются, как правило, скачком.

Изменение физических свойств для непрерывного ряда твердых растворов происходит непрерывно и выражается на диаграммах состав — свойство непрерывными кривыми с минимумом или максимумом. В отдельных случаях диаграммы могут быть прямыми, соединяющими ординаты свойств чистых компонент.

В общей форме принцип соответствия формулируется следующим образом: каждому комплексу фаз, находящихся в равновесии в данной системе, соответствует на диаграмме определенный геометрический образ.

Из рисунков 10–13 видно, что композиционные катоды представляют собой твердые растворы, а катоды рисунков 14–17 — эвтектики.

Заключение

В настоящее время получение композиционных катодов проводится методом порошковой металлургии. Однако этот метод имеет недостатки, связанные с большой анизотропией свойств катодов из-за использования высоких давлений при спекании порошков. Предложенные в настоящей работе композиционные катоды, представляющие собой твердые растворы, свободны от указанных недостатков. Детальное исследование покрытий, полученных с использованием таких катодов, будет рассмотрено в следующей работе.

Список литературы

1. Юрьев О.Б. Ионно-плазменное напыление: опыт западноевропейских фирм // *Машиностроитель*. — 1987. — № 1. С. 37–40.
2. Внуков Ю.Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент. — Киев: Техника, 1992. — 143 с.
3. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. — М.: Машиностроение, 1993. — 336 с.
4. Бендукевич В.В., Гордон М.В., Миркин Л.И. Структура и толщина ионно-плазменных покрытий нитрида титана на быстрорежущей стали // *Физика и химия обработки материалов*. — 1986. — № 3. — С. 57–61.
5. Канунников М.Ф., Баянкин И.А., Пителько А.А. и др. Защитно-декоративные свойства электродуговых вакуумных Ti и TiN-покрытий, осажденных в потоках плазмы // *Физика и химия обработки материалов*. — 1990. — № 5. — С. 93–96.
6. Михайлов А.Н., Михайлов В.А., Михайлова Е.А. Ионно-плазменные вакуумные покрытия — основа широкого повышения качества изделий машиностроения // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр.* — Донецк: ДонНТУ, 2004. — Вып. 28. — С. 108–115.
7. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. — М.: Наука, 1977. — 320 с.
8. Курнаков Н.С. Растворы и сплавы. Избр. труды. — Т. 1. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — С. 76–128.
9. Воробьев А.А. Физические свойства ионных кристаллических диэлектриков. — Кн. 2. — Томск: ТГУ, 1961. — 255 с.
10. Ковтуненко П.В. Физическая химия твердого тела. — М.: Высш. шк., 1993. — 352 с.