

А. В. ГУРБАНОВИЧ

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ

Выполнен литературный обзор статей о возможностях применения метода сканирующей фотоэлектронной спектроскопии (СФЭС). Рассмотрены преимущества СФЭС в сравнении со сканирующей туннельной микроскопией и методом дифракции медленных электронов. Выявлены дальнейшие перспективы применимости СФЭС-метода для исследования фольг на основе сплавов алюминия.

Атомная структура поверхности и трансформация ее в ходе процессов, протекающих на поверхности, занимают важное место в современной физике конденсированного состояния вещества. Эти сведения важны для понимания фундаментальных свойств поверхности твердых тел, создания тонких пленок и гетероструктур, исследования свойств наноматериалов. Очевидные успехи в области физики конденсированного состояния связаны с развитием экспериментальных методов изучения поверхности и теоретических подходов ее моделирования [1; 2].

Улучшение свойств алюминиевых сплавов наблюдается за счет легирования переходными металлами (хромом, железом, цирконием, титаном и другими) и редкоземельными элементами (скандием, иттрием, лантаном и прочими). Сверхбыстрая закалка сплавов алюминия увеличивает в несколько раз предел растворимости легирующих элементов. Это расширяет возможности проведения дальнейшей термической обработки пересыщенных твердых растворов. Другая особенность быстро затвердевших материалов заключается в диспергировании структурных составляющих сплавов при затвердевании, в том числе в выделении дисперсных включений неравновесных интерметаллидных фаз, состав и структура которых отличаются от равновесных фаз, что вызывает упрочнение образцов [2]. В настоящее время сплавы алюминия средней прочности успешно используются в системах хранения и транспортировки сжатого водородного топлива как альтернативной замены бензина и дизельного топлива. Одним из ключевых аспектов обеспечения безопасности при использовании сплавов является предотвращение в них водородного охрупчивания [2].

Цель данного обзора – дать оценку возможностям применения метода сканирующей фотоэлектронной спектроскопии с использованием синхротронного излучения (СИ) для исследования поверхности в алюминиевых сплавах, полученных в условиях сверхбыстрой закалки из расплава. При выборе метода характеристики поверхностных слоёв быстро затвердевших алюминиевых сплавов необходимо учитывать характеристики метода (глубину анализа, чувствительность к химическому состоянию элементов и возможность количественной оценки элементного состава). Рассмотрим преимущества сканирующей фотоэлектронной спектроскопии в сравнении со сканирующей туннельной микроскопией и методом дифракции медленных электронов, см. таблицу 1.

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ, STM) обеспечивает атомное разрешение топографии поверхности, однако предоставляет информацию исключительно о верхнем атомном слое (глубина анализа  $\leq 0,3$  нм). Метод не позволяет исследовать подповерхностные области (второй, третий и последующие слои), где локализуются ключевые структурные изменения, обусловленные неравновесной кристаллизацией. Кроме того, СТМ не чувствителен к химическому состоянию элементов [1, 3]: измеряется туннельный ток, который зависит от локальной плотности электронных состояний и топографии поверхности, но химические элементы напрямую не идентифицируются.

Дифракция медленных электронов (ДМЭ, LEED) применима для анализа кристаллической структуры поверхности алюминиевых сплавов и исследования процессов адсорбции и окисления. Метод обеспечивает высокую чувствительность к упорядоченности поверхностного слоя (глубина анализа 0,5–2 нм). Регистрирует дифракционную картину от периодической структуры поверхности, давая информацию о кристаллической структуре и симметрии, но не о химическом составе [3]. Поскольку ДМЭ не предоставляет информации о химической природе элементов и их степенях окисления, это критически ограничивает применение метода для изучения многокомпонентных сплавов системы Al–Me.

Электронная спектроскопия для химического анализа – сканирующая фотоэлектронная спектроскопия (СФЭС, ESCA/XPS) – обладает рядом преимуществ для решения задач данного исследования, представленных в табл. 1. Рассматривая глубину анализа СФЭС, необходимо учитывать, что получаемая информация формируется электронами, выходящими с глубины 5–10 нм (3–5 длин свободного пробега), что соответствует глубине модифицированного поверхностного слоя сплавов, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава. Это позволяет исследовать не только верхний монослой, но и подповерхностную область, где формируются градиенты состава и оксидные плёнки. Применение СФЭС также позволяет изучать особенности химического состава поверхности материалов. Уникальные значения энергий связи электронов внутренних оболочек для каждого элемента (за исключением водорода) позволяют однозначно идентифицировать элементный состав. В случае алю-

миниевых сплавов это критически важно для разделения сигналов от металлического алюминия ( $Al^0$ ,  $E_{св} \approx 72,3$  эВ) и его оксидов ( $Al^{3+}$ ,  $E_{св} \approx 75,5$  эВ) Выполнение количественного анализа химического состояния возможно, поскольку точное измерение энергии связи и моделирование формы пиков позволяет определять степени окисления элементов и их химическое окружение. Для бинарных сплавов алюминия это даёт возможность оценить распределение легирующих элементов между матрицей и оксидным слоем [2].

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов поверхностного анализа: СФЭС, СТМ и ДМЭ для характеристики поверхности алюминиевых сплавов

Параметр	СФЭС	СТМ	ДМЭ	Комментарий для СФЭС
Глубина анализа, нм	5–10	$\leq 0,3$	0,5–2,0	Определяется длиной свободного пробега электрона
Элементарная чувствительность	Все, кроме H и He	Нет	Нет	$Z \geq 3$ (Li–U)
Определение химического состояния	Да (степень окисления)	Нет	Нет	Химический сдвиг линий
Количественный анализ	Да (относительная погрешность $\sim 10\%$ )	Нет	Нет	Без эталонов, с учётом сечений фотоионизации
Чувствительность к оксидным фазам	Высокая	Низкая	Средняя	Разделение сигналов $Al^0/Al^{3+}$ по энергии связи
Рекомендуемая область применения	Химический анализ, оксидные плёнки, многокомпонентные системы	Атомная топография, проводящие поверхности	Кристаллическая структура, упорядоченные поверхности	–

Важно отметить преимущества использования синхротронного излучения в СФЭС-экспериментах, которое обеспечивает высокую яркость и монохроматичность излучения; возможность настройки энергии фотонов для оптимизации глубины анализа; повышенное энергетическое разрешение ( $\Delta E \approx 0,1$  эВ) для детального анализа химического сдвига.

Таким образом, для комплексной характеристики поверхностных слоёв быстро затвердевших алюминиевых сплавов метод СФЭС на синхротронном источнике является оптимальным выбором, поскольку обеспечивает одновременное получение информации об элементном составе, химическом состоянии и глубинном распределении компонентов в области, определяющей функциональные свойства материала (смачиваемость, адгезия, коррозионная стойкость).

#### Список литературы

1. Яминский, И. В. Сканирующая зондовая бионаноскопия: методы и аппаратура, результаты и достижения / И. В. Яминский // Вестн. Моск. ун-та. Физика. Астрономия. – 2024. – № 1. – С. 1–16.
2. Ташлыкова-Бушкевич, И. И. Влияние хрома на химический состав и свойства поверхности быстро затвердевших сплавов Al-Cr / И. И. Ташлыкова-Бушкевич, В. Г. Шепелевич, М. Амагги, М. Кискинова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 1. – С. 81–88.
3. Цуканов, Д. А. Исследование электрического сопротивления плёнок галлия на реконструированной поверхности Si(111) / Д. А. Цуканов, М. В. Рыжкова // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94, вып. 8. – С. 1240–1249.

A literature review on the possibilities of using synchrotron-based photoelectron microscopy (SPEM) has been performed. The advantages of SPEM in comparison with scanning tunneling microscopy and the method of slow electron diffraction were considered. Additionally, further prospects for the application of SPEM in the study of aluminum alloy foils have been identified.

*Гурбанович Антон Викторович*, аспирант факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиотехники, Минск, Республика Беларусь, a.gurbanovich@bsuir.by.

Научный руководитель – *Ташлыкова-Бушкевич Ия Игоревна*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики факультета компьютерных систем и сетей Белорусского государственного университета информатики и радиотехники, Минск, Республика Беларусь, iya.itb@bsuir.by.