

УДК 538.915:539.25:539.26

МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ АТОМОВ СТАЛИ X17AG18 И МЕТАЛЛОКЕРАМИКИ ZrC

© 2024 г. И. А. Шулепов^а, Е. С. Мироя^а, А. А. Нейман^а, С. П. Буякова^а, Л. Б. Ботаева^{б, *}

^аИнститут физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634055 Россия

^бТомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050 Россия

*e-mail: larisa.b.botaeva@tusur.ru

Поступила в редакцию 06.04.2024 г.

После доработки 27.06.2024 г.

Принята к публикации 27.06.2024 г.

Проведен обзор использования электронной спектроскопии для исследования физико-химических свойств твердых тел. Отмечено, что основным источником информации об электронных состояниях атомов являются энергетическое распределение электронов, возбужденных ионами, рентгеновскими квантами, лазерными пучками. В работе кратко рассмотрены проблемы, существующие при регистрации спектров вторичных электронов, полученных при возбуждении поверхности образцов электронами средних (1–20 кэВ) энергий, и способы решения этих проблем с целью повышения информативности и точности результатов исследований. Предложен метод регистрации спектров вторичных электронов, в интегральном виде, при использовании оже-спектрометра, который позволяет повысить энергетическое разрешение метода. Возможности метода продемонстрированы на примере экспериментальных исследований карбида циркония и стали X17AG18.

Ключевые слова: вторично-электронная спектроскопия, оже-электронная спектроскопия, вторично-электронные спектры, энергетическое разрешение, карбид циркония, сталь X17AG18.

DOI: 10.31857/S1028096024100076, EDN: SHIDDB

ВВЕДЕНИЕ

Определяющим в формировании и стабилизации кристаллических структур является система электронов [1, 2], а от электронного энергетического состояния атомов зависят физико-химические свойства материалов. Исследованиями электронной структуры металлов и сплавов экспериментально и теоретически занимаются длительное время, и им посвящено много работ [3–12]. При теоретических исследованиях в основном рассчитывают зонную структуру, выявляют особенности изменения плотности электронных состояний и химические сдвиги энергетических уровней электронов в атомах в результате фазовых превращений, деформаций, давления, химических реакций и т. д. [3–5].

При любых модификациях твердого тела, таких как имплантация ионов, термическая обработка, деформация, легирование и т.д., изменяются структура и, соответственно, энергетические состояния электронов атомов. Известны работы [13–19], посвященные выявлению влияния модификации твердого тела на изменение формы спектров вторичных электронов, включая упруго отраженные электроны. Анализ изменения формы спектров потерь энергии электронами, упруго отраженными от поверхности твердого тела, позволяет получать информацию об изменении структуры электронных состояний атомов, а это, в свою очередь, дает возможность выявления изменений кристаллической структуры, в частности, при деформации металлов и сплавов.

В энергетических спектрах вторичных электронов проявляются линии оже-электронов. Оже-пики, в свою очередь, имеют тонкую структуру, обусловленную химическим состоянием атомов образца. Для анализа деталей оже-спектров и для их учета при количественных исследованиях необходимо учесть фон, искажения линий спектра, вызванные взаимодействиями оже-электронов в приповерхностном слое материала на пути от выхода из атома и до регистрации спектра.

В настоящее время для выделения вклада оже-электронов в спектре вторичных электронов используют электронное дифференцирование, регистрируя оже-линии в форме дифференцированных спектров $dN(E)/dE$ (где N — количество электронов, E — энергия). Величину амплитуды линии спектра — от максимума до минимума — связывают с концентрацией элементов в исследуемой матрице посредством коэффициентов элементной чувствительности. Однако при использовании оже-линий в дифференциальной форме при количественном анализе не учитывают изменения формы, в том числе, ширины оже-спектров (при изменении формы и ширины оже-пигов не всегда изменяется амплитуда $dN(E)/dE$) [13–15]. Игнорирование этого может привести к существенным ошибкам. Факторами, определяющими ширину и форму истинного энергетического спектра оже-электронов, являются величины энергетических уровней, матричные эффекты, времена жизни состояний, участвующих в оже-процессе. Таким образом, исследование изменения формы спектров оже-электронов элементов, составляющих матрицу, дает информацию о химических связях в ней. В частности, на основании проведенного сравнения энергетических сдвигов и изменения ширины оже-линии одного и того же элемента в газообразном и твердом состояниях [16] было показано, что изменение ширины энергетических спектров оже-электронов происходит вследствие: увеличения времени жизни начального состояния, то есть дырки на внутреннем уровне; сокращения времени жизни конечного состояния, из которого эмитируется электрон.

В твердом теле, в том числе, состоящем из двух и более элементов, конечное состояние является, как правило, короткоживущим ввиду того, что много электронов из валентной зоны способно участвовать в дальнейшей перестройке внутренних электронных оболочек, поэтому можно наблюдать уширение энергетических уровней, а это влияет на ширину и форму оже-линий [5]. При наличии на поверхности образца адсорбированных атомов ширина и форма оже-линии

адсорбата и подложки в значительной степени определяются изменением уровней энергии их атомов в процессе адсорбции.

Кроме этого, следует учитывать, что в процессе регистрации оже-спектров с использованием электронного дифференцирования происходит расширение формы оже-линии [13].

Для количественных измерений и исследований изменений электронной структуры атомов использование оже-спектров в дифференциальной форме имеет ряд недостатков, в том числе высокую погрешность вычисления концентрации элементов и затруднительную интерпретацию дифференциальных оже-спектров при химическом анализе и исследовании электронной структуры.

В работах [14, 15, 17, 18] предложены способы применения в количественной оже-спектроскопии оже-линий в форме $N(E)$, которые можно реализовать несколькими приемами. Во-первых, можно получать сразу оже-спектры в форме $N(E)$, но в этом случае сохраняется проблема выделения спектра оже-электронов из фона и много времени уходит на набор энергетического спектра. Во-вторых, можно использовать численное интегрирование дифференциальных спектров $dN(E)/dE$, что так же связано с затратами времени и необходимостью дальнейшей обработки. При любом подходе необходимо использовать приемы моделирования и вычитания фона.

Таким образом, целью настоящей работы являлось исследование электронной структуры спеченной металлокерамики ZrC и стали X17AG18, обработанной ультразвуковой ковкой, с использованием нового метода регистрации спектров вторичных электронов в интегральной форме, с использованием промышленного российского оже-спектрометра. А также сравнение результатов исследований стали X17AG18 на оже-спектрометре фирмы JEOL.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННО-ЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОВ

Исследования химического состава приповерхностных слоев стали X17AG18 и керамики ZrC проводили на модернизированном оже-спектрометре “09-ИОС-10”.

Функциональная схема спектрометра приведена на рис. 16. Высоковольтный, модулированный сигнал с выхода вторично-электронного

умножителя 8 поступает на разделительный трансформатор 10, переменная составляющая сигнала частотой f с вторичной обмотки поступает на предварительный усилитель 11, а затем на системы выделения сигнала, где синхронно регистрируется в форме $N(E)$ (изготовленная авторами система 12) и $dN(E)/dE$ (штатная система 14).

В оже-спектроскопии для определения элементного состава образцов используют ионизацию электронных оболочек атомов первичными электронами, с последующей регистрацией спектров вторичных электронов в форме $N(E)$ и $dN(E)/dE$, из которых выделяют энергетические линии, характерные атомам элементов, составляющих исследуемый образец. В данном случае, энергию первичных электронов устанавливали равной 3 кэВ, а электронный пучок, диаметром 20 мкм, разворачивали в растр 200×200 мкм, что соответствовало площади анализируемой поверхности.

Перед регистрацией спектров слой толщиной ~ 100 нм с поверхности образцов распыляли для создания атомарно чистой поверхности с помощью пучка ионов Ag^+ энергией 3 кэВ, падающего под углом 70° относительно нормали к поверхности. В процессе регистрации спектров распыление ионами продолжали, но плотность тока снижали до величины, исключающей адсорбцию атомов из остаточной атмосферы. Оже-спектрометр "09-ИОС-10" оснащен энергоанализатором типа цилиндрическое зеркало (АЦЗ) с разрешающей способностью 0.2–0.5%, который помещен в вакуумную камеру, откачиваемую до давления 10^{-6} Па. Анализатор этого типа состоит из двух коаксиальных полых металлических цилиндров (рис. 1а). Во внутреннем цилиндре 2 имеются окна 5 и 6 для прохождения входящих и выходящих вторичных электронов соответственно. К внешнему цилиндру 1 прикладывают отрицательное по отношению к внутреннему цилиндру изменяющееся напряжение 13 (рис. 1б), которое модулируют синусоидальным сигналом частотой f .

Электронный пучок 4 с энергией E_0 , формируемый источником электронов 3 инициирует электронную эмиссию 7 из приповерхностной области образца 9. Электроны, влетевшие в энергоанализатор с некоторой скоростью под углом влета θ относительно оси анализатора в результате отклонения от первоначальной траектории под действием электрического поля, будут двигаться по криволинейной траектории и сфокусируются на выходе в точке, в которой располагается выходная диафрагма анализатора, а за ней установлен электронный умножитель 8. Образец 9 должен находиться в фокусе анализатора (в данном слу-

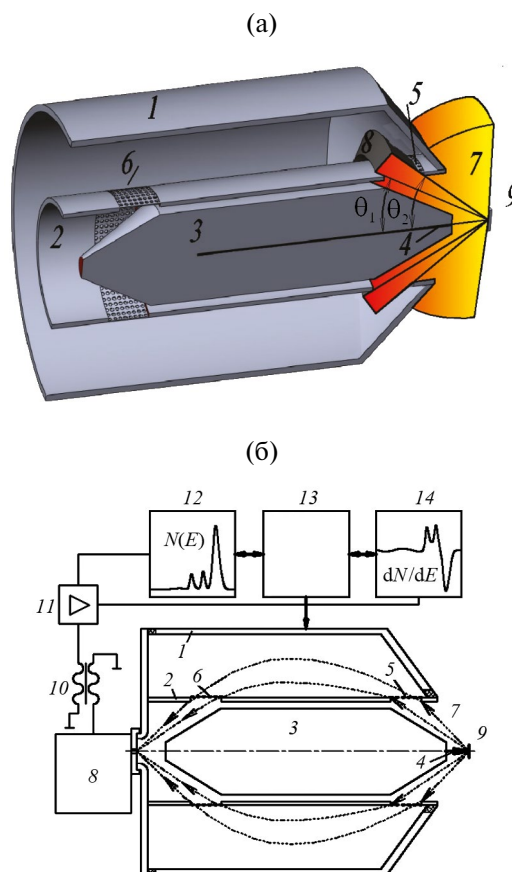


Рис. 1. Трехмерное схематическое изображение анализатора (а) и функциональная схема спектрометра и процесса регистрации вторичных электронов (б): 1 — внешний цилиндр; 2 — внутренний цилиндр; 3 — источник электронов; 4 — электронный пучок; 5, 6 — входящее и выходящее окна; 7 — облако вторичных электронов; 8 — вторично-электронный умножитель; 9 — исследуемый образец; 10 — разделительный трансформатор; 11 — предварительный усилитель; 12 — система регистрации электронного спектра в интегральном виде $N(E)$; 13 — блок формирования модулированного потенциала развертки; 14 — система регистрации электронного спектра в дифференциальном виде $dN(E)/dE$.

чае — на расстоянии 12 мм от торца внешнего цилиндра). При облучении поверхности образца ускоренными электронами в приповерхностной области глубиной Δx происходит ионизация атомов, часть электронов 7 выходит в вакуум.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оже-спектры от стали X17AG18 (химический состав приведен в табл. 1), полученные с помощью оже-микронзонда с полевой эмиссией JAMP-9510F в виде $dN(E)/dE$ (рис. 2а) и $N(E)$ (рис. 2б). Для сравнения на рис. 3 представлены дифференцированные оже-спектры ($dN(E)/dE$),

Таблица 1. Химический состав исследованной стали X17ФГ18 [8]

Элементы	Cr	Mn	Si	C	N	P	S	Fe
Концентрация, вес. %	16.5	18.8	0.52	0.07	0.53	0.02	0.013	Остальное

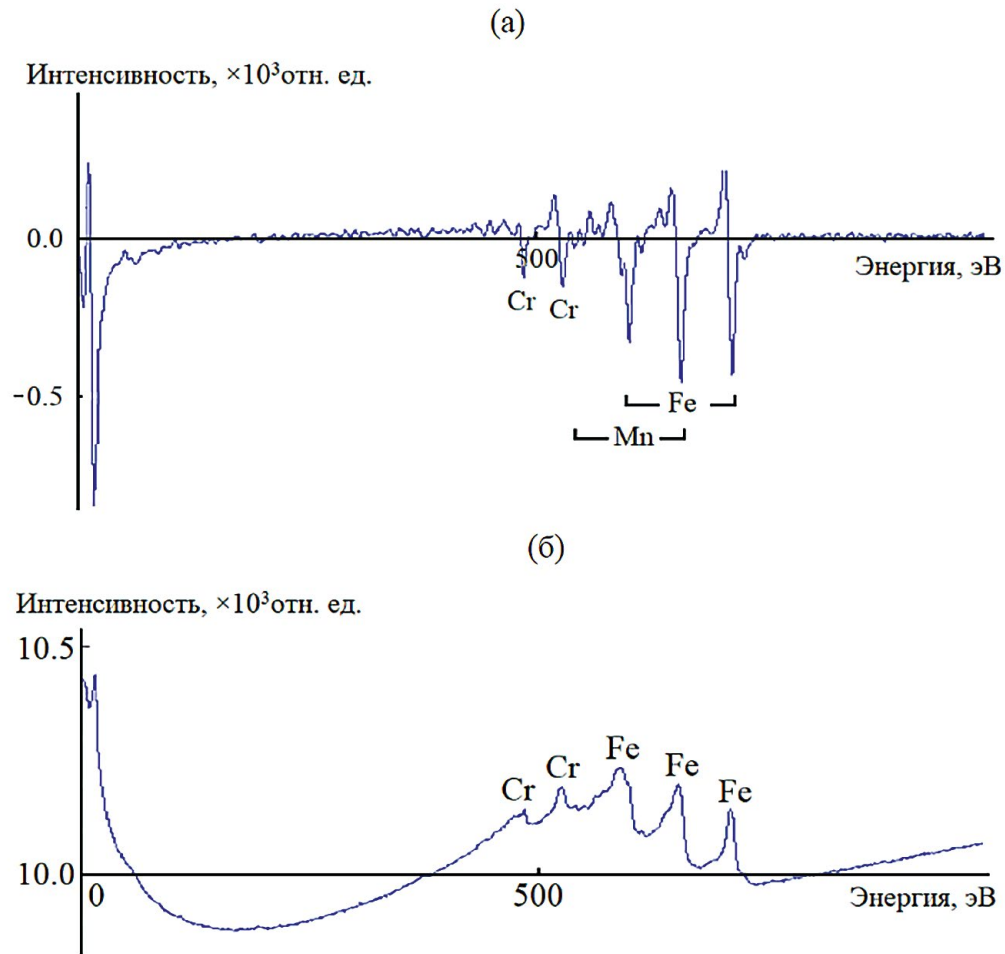


Рис. 2. Оже-спектры стали X17ФГ18, полученные с помощью оже-микроскопа JAMP-9510F после травления ионами Ar^+ с энергией 3 кэВ в течение 270 с, в виде $dN(E)/dE$ (а) и $N(E)$ (б), с указанием элементов, которым соответствуют пики.

зарегистрированные с помощью оже-спектрометра “09-ИОС-10” (линия 1) и оже-микроскопа JAMP-9510F (линия 2). Видно, что формы графиков оже-спектров идентичны.

Для сравнения не дифференцированных оже-спектров $N(E)$ спектр, приведенный на рис. 2б был восстановлен с использованием программы AAnalyzer [21], был смоделирован и вычтен фон. Для моделирования глобального фона использовали полином второго порядка, а для локального фона — метод Ширли. Результаты приведены на рис. 4, линия 2. На этом же рисунке (линия 1) изображен график спектра,

зафиксированного с помощью модернизированного оже-спектрометра “09-ИОС-10”. Видно, что на оже-спектре линии 1 разрешаются пики, а на оже-спектре линии 2 пики не разрешаются, но выступы совпадают с пиками на линии 1. Высокое разрешение оже-спектра, зарегистрированного с помощью оже-спектрометра “09-ИОС-10” (линия 1), позволяет выявить линии, в частности, Mn, которые не разрешаются на дифференцированном оже-спектре (линия 2), а разделение пиков в области энергий от 0 до 50 эВ позволяет исследовать изменение электронной структуры валентных электронов.

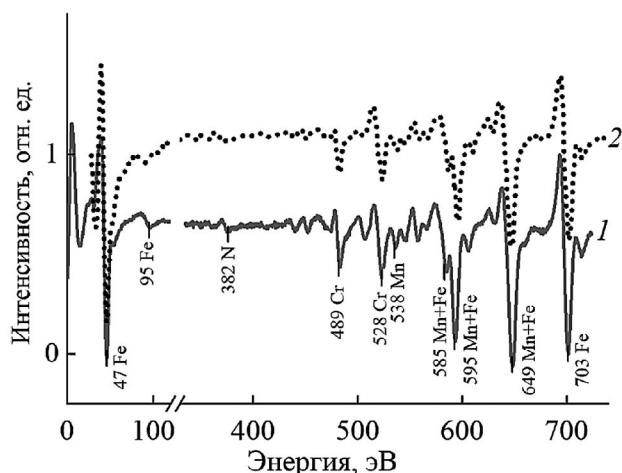


Рис. 3. Оже-спектры стали X17ФГ18 в виде $dN(E)/dE$, полученные с помощью оже-спектрометра “09-ИОС-10” (1) и оже-микрозонда JAMP-9510F (2), с указанием элементов и энергии, которым соответствуют пики.

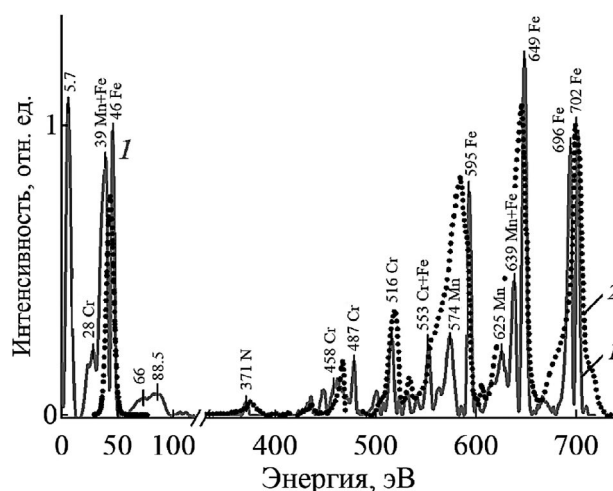


Рис. 4. Оже-спектры стали X17ФГ18 в виде $N(E)$, полученные с помощью оже-спектрометра “09-ИОС-10” (1) и оже-микрозонда JAMP-9510F (2), с указанием элементов и энергии, которым соответствуют пики.

В продолжение, с использованием предложенного метода регистрации электронных спектров в виде $N(E)$ сравнили электронные спектры от стали X17AG18 с электронными спектрами от элементов, составляющих эту сталь (Cr, Mn, Fe). Графики спектров представлены на рис. 5, где на электронный спектр от стали (линия 1) наложен электронный спектр от железа (линия 2), а электронные спектры от хрома (линия 3) и от марганца (линия 4) отображены на вставках на рис. 5б. На спектре от стали можно выделить пики от хрома и марганца (рис. 5б), а на рис. 5а — пики, сформированные вторичными электронами из валентной зоны атомов, составляющих сталь. Анализ энергетических положений пиков показал, что оже-линии Cr и Mn встали сдвинуты в область низких энергий на 5–14 эВ (рис. 5б) по сравнению с чистыми элементами. Такие значительные сдвиги энергии не могут быть связаны с формированием твердого раствора, поскольку атомы хрома и марганца имеют схожие параметры с атомами железа и замещают последние в кристаллической решетке, однако можно предположить, что такие сдвиги по энергии происходят вследствие межатомных оже-переходов. Возможность межатомных оже-переходов показана в [22–24]. В таких процессах принимают участие электроны, локализованные на двух атомах типов А и В, например, в результате кулоновского взаимодействия дырка на уровне L_3 атома А заполняется электроном из лежащей выше оболочки $M_{2,3}$ атома В с выбросом $M_{2,3}$ -электрона атома В в свободное состояние. Возможность межатомного перехода можно подтвердить, используя формулу (1) [25]:

$$E_{\alpha\beta\gamma}^Z = E_{\alpha}^Z - E_{\beta}^Z - E_{\gamma}^Z - \frac{1}{2}(E_{\gamma}^{Z+1} - E_{\gamma}^Z + E_{\beta}^{Z+1} - E_{\beta}^Z), \quad (1)$$

где $E_{\alpha\beta\gamma}^Z$ — энергия оже-перехода $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ в элементе Z. Первые три члена соответствуют энергии связи оболочек, член:

$$\frac{1}{2}(E_{\gamma}^{Z+1} - E_{\gamma}^Z + E_{\beta}^{Z+1} - E_{\beta}^Z) — \text{мал относительно}$$

остальных, поэтому в данном случае его не учитываем. Величины энергии связи электронов приведены в [25]. Используя величины энергий пиков из спектра стали, можно определить значения энергии E_{β}^Z и E_{γ}^Z .

Для подтверждения корректности расчетов в табл. 2 приведены энергии оже-переходов для чистых элементов, взятые из работы [26] и определенные по формуле (1). В табл. 3 представлены измеренные энергии оже-переходов элементов в стали X17ФГ18 и вычисленные по формуле (1). Из табл. 3 следует, что в стали X17ФГ18 в оже-переходах хрома участвуют электроны с оболочек $M_{2,3}$ марганца и железа, а в оже-переходах марганца участвуют электроны с оболочек $M_{2,3}$ и $M_{4,5}$ железа, поскольку они находятся на более энергетически выгодных для оже-перехода оболочках.

Дополнительно возможности нового способа регистрации электронных спектров были продемонстрированы при исследовании карбида циркония, спрессованного из порошка при тем-

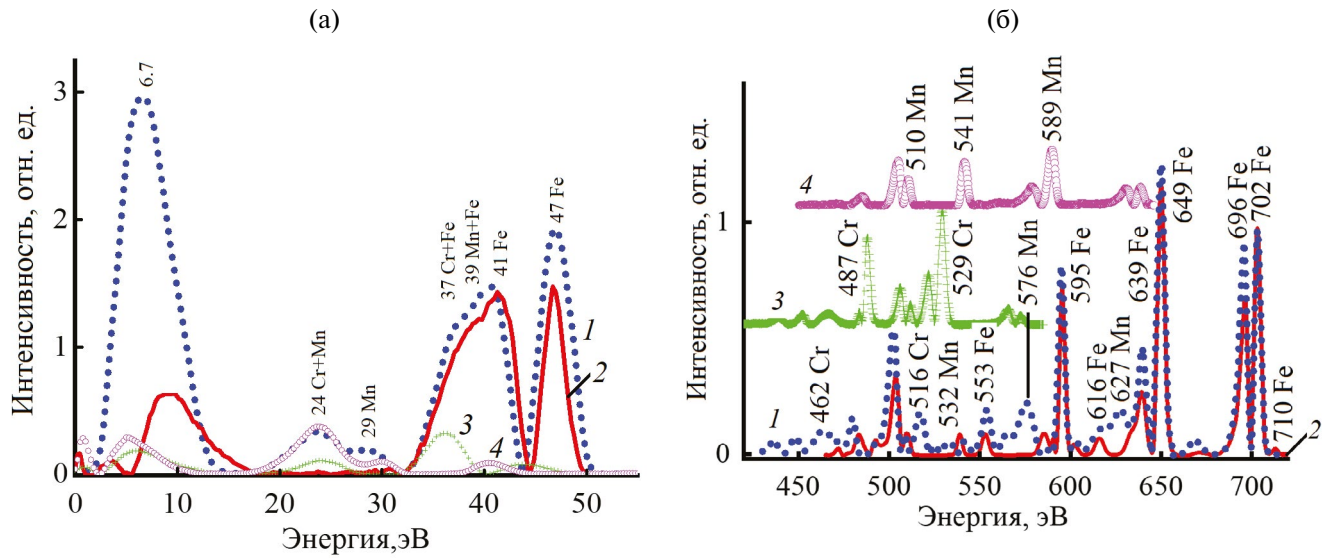


Рис. 5. Спектры $N(E)$ вторичных и оже-электронов стали X17ФГ18 (1); а-фазы Fe (2); Cr (3); Mn (4) с указанием элементов и энергии, которым соответствуют пики.

Таблица 2. Энергии оже-переходов для чистых элементов, рассчитанные с использованием формулы (1)

Элемент	Оже переход	Энергия $E_{\alpha\beta\gamma}^Z$, эВ [12]	Расчет $E_{\alpha\beta\gamma}^Z$, эВ
Cr	$L_3-M_{2,3}-M_{2,3}$	489	$575(L_3) - 43(M_{2,3}) - 43(M_{2,3}) = 489$
	$L_3-M_{2,3}-M_{4,5}$	529	$575(L_3) - 43(M_{2,3}) - 2(M_{4,5}) = 530$
	$L_{2,3}-M_{4,5}-M_{4,5}$	571	$579.5(L_{2,3}) - 2(M_{4,5}) - 2(M_{4,5}) = 575.5$
Mn	$L_2-M_{2,3}-M_{2,3}$	542	$641(L_3) - 49(M_{2,3}) - 49(M_{2,3}) = 543$
	$L_3-M_{2,3}-M_{4,5}$	589	$641(L_3) - 49(M_{2,3}) - 4(M_{4,5}) = 588$
	$L_{2,3}-M_{4,5}-M_{4,5}$	636	$641(L_3) - 6(M_{4,5}) - 6(M_{4,5}) = 638.5$
Fe	$L_2-M_{2,3}-M_{2,3}$	598	$710(L_3) - 56(M_{2,3}) - 56(M_{2,3}) = 598$
	$L_3-M_{2,3}-M_{4,5}$	651	$710(L_3) - 56(M_{2,3}) - 6(M_{4,5}) = 648$
	$L_3-M_{4,5}-M_{4,5}$	703	$716.5(L_{2,3}) - 6(M_{4,5}) - 6(M_{4,5}) = 704.5$

Таблица 3. Энергии оже-переходов для элементов в стали X17ФГ18, рассчитанные с использованием формулы (1)

Элемент	Оже переход	Энергия $E_{\alpha\beta\gamma}^Z$, эВ (стали X17ФГ18)	Расчет $E_{\alpha\beta\gamma}^Z$, эВ
Cr	$L_3-M_{2,3}-M_{2,3}$	480	$575(L_3) - 49(^{Mn}M_{2,3}) - 49(^{Mn}M_{2,3}) = 477$
	$L_3-M_{2,3}-M_{4,5}$	516	$575(L_3) - 56(^{Fe}M_{2,3}) - 2(M_{4,5}) = 517$
	$L_{2,3}-M_{4,5}-M_{4,5}$	542	$584(L_2) - 43(M_{2,3}) - 2(M_{4,5}) = 539$
Mn	$L_2-M_{2,3}-M_{2,3}$	532	$641(L_3) - 56(^{Fe}M_{2,3}) - 56(^{Fe}M_{2,3}) = 529$
	$L_3-M_{2,3}-M_{4,5}$	576	$641(L_3) - 56(^{Fe}M_{2,3}) - 6(^{Fe}M_{4,5}) = 579$
	$L_{2,3}-M_{4,5}-M_{4,5}$	627	$646.5(L_{2,3}) - 4(^{Fe}M_{4,5}) - 4(^{Fe}M_{4,5}) = 629$
Fe	$L_2-M_{2,3}-M_{2,3}$	598	$710(L_3) - 56(M_{2,3}) - 56(M_{2,3}) = 598$
	$L_3-M_{2,3}-M_{4,5}$	651	$710(L_3) - 56(M_{2,3}) - 6(M_{4,5}) = 648$
	$L_3-M_{4,5}-M_{4,5}$	703	$716.5(L_{2,3}) - 6(M_{4,5}) - 6(M_{4,5}) = 704.5$

пературе 1000°C. На рис. 6а приведен оже-спектр Zr в виде $N(E)$ (линия 1) и ZrC (линия 2). Спектры были нормированы относительно максимума интенсивности пика циркония 147 эВ. Моделирование и вычитание фона электронов выполнили методом Ширли с использованием программы AAnalyzer [9]. На рис. 6б приведены участки оже-спектров углерода в составе образца ZrC (линия 1) и чистого графита (линия 2). На вставке отображены оже-спектры порошка ZrC, полученные в работе [27]. Видно, что по форме экспериментальный спектр углерода в ZrC (линия 1 на вставке) близок, а расчетный спектр (линия 3 на вставке) полностью совпадает с экспериментальным спектром (линия 1), полу-

ченным в настоящей работе. Из рис. 6б следует, что в оже-спектре от графита пики при 255, 265 и 270 эВ сливаются, формируя широкий спектр, однако карбид циркония формирует кубическую решетку, где атомы углерода находятся в междоузлиях и электроны углерода взаимодействуют с электронами циркония вследствие чего формируются энергетические барьеры, локализуя электроны уровней 2s и 2p, происходит перераспределение электронов и формирование отдельных пиков при 255, 265 и 270 эВ, что отображается на спектре. Пик при 275 эВ в карбиде циркония отсутствует, так как d -подзона не заполнена [27].

Анализ электронных спектров (рис. 6а) показывает, что атомы углерода в карбиде циркония значительно изменяют форму электронных спектров циркония, что выражается в росте интенсивности линий и в изменении соотношения интенсивности основного оже-пика при 147 эВ к другим пикам оже-переходов. Вероятно, это связано с переходом электронов углерода в карбиде циркония на уровни 3s и 3p (с меньшей энергией связи) и возможной реализацией межатомных оже-переходов. Для подтверждения этого была оценена разница между площадями под оже-линиями циркония и карбида циркония, а также углерода и карбида циркония, она составила 6.93 и 6.9 соответственно. Интенсивность линий карбида циркония была выше на 62 эВ по сравнению с цирконием и 70 эВ — с углеродом. Это подтверждает высказанное выше предположение.

ВЫВОДЫ

Сравнение результатов регистрации спектров вторичных электронов в виде $N(E)$, полученных с помощью оже-микрозонда с полевой эмиссией JAMP-9510F (производство Японии) и на модернизированном оже-спектрометре "09-ИОС-10" (производство Россия) показало, что использование нового метода, позволяет регистрировать спектры вторичных электронов в виде $N(E)$ (от 0 эВ) и значительно повышает разрешение пиков спектра. Этот метод расширяет возможности оже-спектроскопии, упрощая получение информации об изменении электронной структуры твердого тела, повышая информативность и точность анализа.

Было обнаружено, что при формировании сплава стали X17ФГ18 и ZrC энергия связи электронов отличается от энергии связи в чистых элементах, а форма оже-спектров изменяется вследствие межатомных оже-переходов.

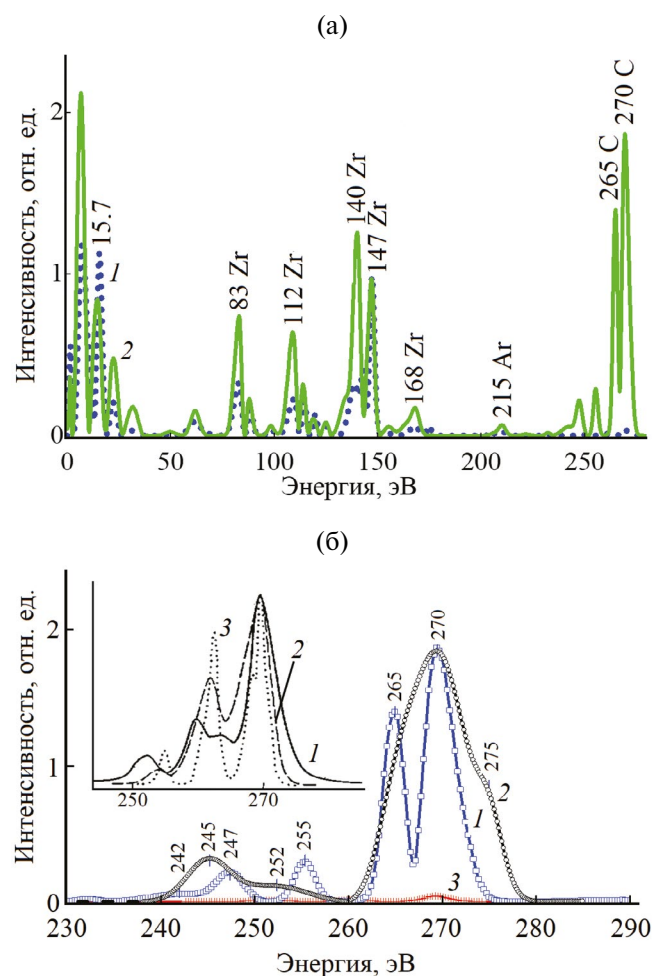


Рис. 6. Оже-спектры: а) — в форме $N(E)$ от Zr (1) и ZrC (2); б), оже-спектры KVV -перехода углерода в ZrC (1), графите (2), Zr (3). На вставке представленные данные из [27]: экспериментальный оже-спектр ZrC (1), самосвертка фотоэлектронного спектра валентной полосы и экспериментального оже-спектра (2), самосвертка экспериментального оже-спектра с совмещенной по пику полной плотности занятых состояний (3).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, номер проекта FWRW-2021-0009.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Василевский А.С.* Физика твердого тела. М.: Дрофа, 2010. 206 с.
2. *Панин В.Е., Сурикова Н.С., Смирнова А.С., Почивалов Ю.И.* // Физическая мезомеханика. 2018. Т. 21. № 3. С. 12.
<https://www.doi.org/10.24411/1683-805X-2018-13002>
3. *Кулькова С.Е., Валуцкий Д.В., Смолин И.Ю.* // Физика твердого тела. 2001. Т. 43. Вып. 4. С. 706.
4. *Mikhaylushkin A.S., Isaev E.I., Vekilov Yu.Kh., Simak S.I.* // Physics of the solid state. 2003. V. 45 (12). P. 2213.
<https://www.doi.org/10.1134/1.1635487>
5. *Лопатина О.В.* Атомная и электронная структура систем Zr–He и Zr–He–H: первопринципные исследования: Дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Томск: ТПУ, 2013. 115 с.
6. *Сеньковский Б.В., Усачев Д.Ю., Федоров А.В., Шеляков А.В., Адамчук В.К.* // Физика твердого тела. 2012. Т. 54. Вып. 8. С. 1441.
7. *Сеньковский Б. В.* Электронная энергетическая структура сплавов Ti–Ni и TiNi–Cu: Дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2013. 125 с.
8. *Soldatov A.V., Kravtsova A.N., Fleet M.E., Harmer S.L.* // J. Phys.: Condensed Matter. 2004. V. 16. № 41. P. 7545.
<https://www.doi.org/10.1088/0953-8984/16/41/031>
9. *Шабанова И.Н., Теребова Н.С., Кормилец В.И.* // Физика твердого тела. 2000. Т. 42. Вып. 7. С. 1161.
10. *Гаврилюк В.Г.* // Известия РАН. Серия физическая. 2005. Т. 69. № 10. С. 1470.
11. *Simka W., Krzakala A., Kuna K., Korotin D.M., Kurmaev E.Z., Zhidkov I.S., Cholakh S.O., Dercz G., Michalska J., Suchanek K., Gorewoda T.* // Electrochimica Acta. 2013. V. 96. P. 180.
<https://www.doi.org/10.1016/j.electacta.2013.02.102>
12. *Ткаченко В.Г., Зауличный Я.В., Кондрашев А.И., Малка А.Н., Абрамов А.А.* // Вісник Українського матеріалознавчого товариства. 2012. № 1(5). С. 72.
13. *Seah M.P.* // J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 1999. V. 100. Iss. 1–3. P. 55.
14. *Загоренко А.И., Запорожченко В.И.* Изучение точности измерения интенсивности в электронной оже-спектроскопии. // Тезисы докладов VII Всесоюзного симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел, Звенигород. 1991. С. 107.
15. *Загоренко А.И., Запорожченко В.И., Бородинский С.Э., Абашкин Ю.Г.* // Поверхность. 1991. № 3. С. 93.
16. Применение электронной спектроскопии для анализа поверхности. Пер. с англ. / Ред. Шварц К.К. Рига: Знание, 1980. 315 с.
17. *Михайлов Г.М., Бородинский Ю.Г.* // Поверхность. 1982. № 2. С. 85.
18. *Бриггс Д., Сих Н.П.* Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. М.: Мир, 1987. 598 с.
19. *Захватова М.В., Гильмутдинов Ф.З., Сурнин Д.В.* // Физика металлов и металловедение. 2007. Т. 104, № 2. С. 166.
20. *Наркевич Н.А., Гальченко Н.К., Миронов Ю.П.* // Физическая мезомеханика. 2004. № 6. С. 79.
21. Программа моделирования и вычитания фона AAnalyzer. Электронный ресурс <http://rdataa.com/aanalyzer/aanaManual-BO.htm>.
22. *Citrin P.H.* // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 31. № 19. P. 1164.
23. *Yin L.I., Tsang T., Coyle G.J., Yin W., Adler I.* // J. Vacuum Sci. Technol. 1983. V. 1. Iss. 2. P. 1000.
<https://www.doi.org/10.1116/1.572323>
24. *Гребенников В.И., Кузнецова Т.В.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 5. С. 68.
25. *Фелдман Л., Майер Д.* Основы анализа поверхности и тонких пленок. Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
26. *Laurence E. Davis, Noel C. MacDonald, Paul W. Palmberg, Gerald E. Riach, Roland E. Weber.* Handbook of Auger Electron Spectroscopy. Physical Electronics. 1976. P. 253.
27. *Шульга Ю.М., Рубцов В.И., Бородинский Ю.Г.* // Поверхность. 1987. № 8. С. 43–50.

Registration Method of Secondary Electron Spectra and Experimental Studies of the Electronic Structure of Toms of Steel X17AG18 and ZrC Cermets

I. A. Shulepov¹, E. S. Mirovaya¹, A. A. Neiman¹, S. P. Buyakova¹, L. B. Botaeva^{2, *}

¹*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634055 Russia*

²*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia*

**e-mail larisa.b.botaeva@tusur.ru*

An overview of the use of electron spectroscopy for the study of the physico-chemical properties of solids is carried out. It is noted that the main source of information about the electronic states of atoms is the energy distribution of electrons excited by ions, X-ray quanta, and laser beams. The paper briefly discusses the problems that exist in registering the spectra of secondary electrons obtained by exciting the surface of samples with electrons of medium (1–20 keV) energies, and ways to solve these problems in order to increase the information content and accuracy of research results. A method for recording secondary electron spectra in an integral form using an Auger spectrometer is proposed, which allows to increase the energy resolution of the method. The possibilities of the method are demonstrated by the example of experimental studies of zirconium carbide and steel X17AG18.

Keywords: secondary electron spectroscopy, auger electron spectroscopy, energy resolution, zirconium carbide, steel X17AG18.