

СМЕЩЕНИЕ КОМПТОНОВСКОГО ПИКА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В СТАЛИ

И.Ф. Михайлов, А.А. Батурин, Л.П. Фомина

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

Разработана светосильная рентгенооптическая схема измерений комптоновского рассеяния с применением флуоресцентного источника излучения и рентгеновской трубки с прострельным анодом. В стандартных образцах низколегированной стали выявлено монотонное смещение (в пределах 70 эВ) комптоновского пика в сторону рэлеевского по мере увеличения содержания углерода от 0,03 до 1,1 мас.%. Величина смещения может служить количественным критерием содержания легкой примеси в тяжелой матрице.

ВВЕДЕНИЕ

Основополагающая работа Комптона [1] была посвящена методу анализа легких элементов. Этот метод основан на измерении соотношения интенсивностей комптоновского и рэлеевского пиков, которое резко возрастает с уменьшением атомного номера вещества рассеивателя [1-3]. В работах [4,5] мы продемонстрировали возможность определения содержания примесей легких элементов в тяжелой матрице по соотношению комптоновского и рэлеевского пиков. Однако для случая кристаллических материалов эта методика требует введения некоторых поправок и обеспечения очень высокой точности измерений интенсивности.

В данной работе мы рассмотрим альтернативный подход к анализу легких примесей в рамках комптоновских измерений.

Основной вклад в эффект Комптона на связанных электронах дают электроны наружных оболочек с характерной энергией связи ≤ 100 эВ [3]. Именно эти оболочки претерпевают изменения при легировании, и следует ожидать увеличения энергии связи в случае образования термодинамически стабильных твердых растворов и соединений. Согласно теории Блоха [3] при описании рассеяния на связанных электронах к формуле Комптона для свободных электронов вводится поправка. Эта поправка пропорциональна квадрату длины волны λ . Следовательно, для обнаружения ее влияния целесообразно использовать излучение с наибольшей длиной волны λ , при которой еще возможна прецизионная регистрация комптоновского профиля, поскольку интенсивность комптоновского пика резко падает с увеличением длины волны.

Цели данной работы:

1) разработка светосильной рентгенооптической схемы для прецизионных измерений комптоновского пика в «мягком» излучении Nb- K_{α} (16,6 кэВ);

2) экспериментальное выявление смещения комптоновского пика при увеличении содержания углерода в стали.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Объектами исследования служили Государственные стандартные образцы (ГСО) низколегированной углеродистой стали 154 серии с содержанием углерода от 0,03 до 1,1 мас.% (таблица).

В стандартной схеме измерения комптоновского профиля применяется монохроматизация зондирующего излучения с помощью отражения от кристалла-монохроматора [6]. В этой схеме не удается получить высокую интенсивность монохроматического пучка [6] и в полной мере избавиться от фона под комптоновским пиком [4]. Альтернативный путь монохроматизации для комптоновских измерений состоит в использовании аналитической линии из флуоресцентного спектра однокомпонентного материала [7]. Однако примененная в [7] схема возбуждения флуоресценции не может обеспечить высокую интенсивность из-за больших расстояний между анодом трубки, флуоресцентным излучателем и образцом.

В данной работе для наблюдения комптоновского рассеяния от образца мы использовали в качестве зондирующего монохроматического излучения аналитическую линию Nb- K_{α} из спектра флуоресценции технически чистого ниобия. Флуоресценцию ниобия возбуждали путем облучения спектром рентгеновской трубки БС-11 с анодом прострельного типа из серебра (рис.1).

Использование этой трубки позволило приблизить массивную мишень из ниобия к аноду на расстояние $R \approx 2 \dots 3$ мм и на расстояние ≈ 7 мм к поверхности исследуемого образца, что резко повысило интенсивность за счет $I \sim 1/R^2$. Спектрометр, оснащенный двумя коллиматорами Соллера и кристаллом-анализатором LiF(200), обеспечивал угловую расходимость $0,18^\circ$ в брэгговской плоскости при площади поперечного сечения регистрируемого пучка 2×14 мм. При мощности рентгеновской трубки 21 Вт (49 кВ, 0,43 мА) на угле рассеяния $2\varphi = 129,2^\circ$ для стали скорость счета на комптоновском пике была не менее 13 имп/с при фоне не более 2 имп/с.

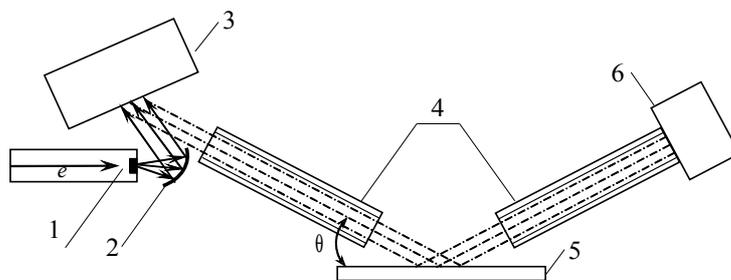


Рис.1. Схема измерений комптоновского рассеяния с применением флуоресцентного источника и рентгеновской трубки прострельного типа:

1 – анодный узел трубки с мишенью из серебра; 2 – массивный ниобий – источник флуоресцентного излучения; 3 – исследуемый образец; 4 – коллиматоры Соллера; 5 – кристалл-анализатор; 6 – детектор

Регистрацию рэлеевского и комптоновского пиков производили путем сканирования с шагом $\Delta\lambda = 0,001\text{Å}$ с набором импульсов в течение 20 с в каждой точке измерения. Положения пиков находили способом медиан [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для всех исследованных образцов положение и полуширина рэлеевского пика от Nb-K_α были практически одинаковы и составляли соответственно $\lambda = 0,748\text{Å}$ и $\Delta\lambda = 0,015\text{Å}$. Полуширина комптоновского пика оставалась в диапазоне $\Delta\lambda = 0,027 \dots 0,029\text{Å}$ (рис.2), и никакого закономерного ее изменения с увеличением содержания углерода обнаружить не удалось.

Тем не менее, выявлено смещение положения комптоновского пика в сторону меньших длин волн (см. рис.2), которое монотонно изменяется с увели-

чением содержания углерода в стали (см. таблицу). Приняв за начало отсчета положение комптоновского пика в образце с минимальным содержанием углерода, мы вычислили в энергетических единицах смещение этого пика для стали с разным содержанием углерода (см. таблицу). Оказалось, что максимальное смещение (около 70 эВ) близко к значениям энергии связи наружных подоболочек M_1 , M_2 и M_3 свободного атома железа, соответственно составляющих 98, 61 и 59 эВ [9]. Только электроны этих подоболочек дают основной вклад в комптоновское рассеяние, а вклад следующей оболочки L_3 с энергией связи 713 эВ не превышает одного процента по оценке в соответствии с [3]. Введение углерода в железо приводит к образованию целого комплекса термодинамически стабильных твердых растворов и фаз с соответствующим увеличением энергии связи электронов на наружных оболочках атомов железа. По-видимому, это увеличение и проявляется в наблюдаемом нами смещении комптоновского пика.

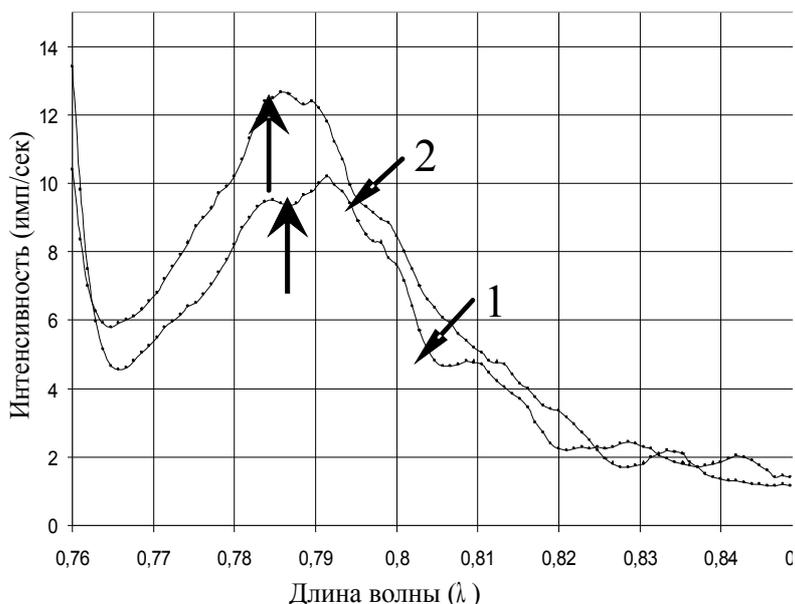


Рис. 2. Смещение комптоновского пика с увеличением содержания углерода в стали:
1 – ГСО 154-1, 0,42 мас.% С; 2 – ГСО 154 7, 1,10 мас.% С. Сглаживание проведено по пяти точкам.
Стрелками указано положение максимума, найденное способом медиан

Положение максимума комптоновского пика λ_{\max} и его энергетическое смещение ΔE , эВ для стандартных образцов низколегированных сталей серии 154 с различным содержанием углерода С, мас.%

Номер образца	С, мас.%	λ_{\max} , Å	ΔE , эВ
154-4	0,03	0,7900	0
154-1	0,42	0,7885	30
154-2	0,82	0,7882	36
154-7	1,1	0,7865	70

ВЫВОДЫ

Разработанная рентгенооптическая схема позволила практически полностью устранить фон рассеянного сплошного спектра под комптоновским пиком и провести прецизионные измерения его положения и формы.

Выявленное монотонное смещение комптоновского пика с увеличением концентрации углерода от 0,03 до 1,1 мас.% может служить количественным критерием при измерениях в системе железо-углерод.

Авторы благодарят АО Укррентген за поддержку работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.H. Compton // *Phys. Rev.* 1923, v.21, p. 483.
2. Y.H. Woo // *Phys. Rev.* 1926, v.27, p. 119.
3. М.А. Блохин. *Физика рентгеновских лучей*. М.: ГИТТЛ, 1953, с.456.
4. I.F. Mikhailov, O.V. Sobol, V.V. Varganov, L.P. Fomina. Determination of mass fraction of light elements in crystalline materials by Compton-to Rayleigh scattering intensity ratio// *Functional Materials*. 2002, v.9, N 4, p.651.
5. И.Ф. Михайлов, О.В. Соболев. Анализ легких элементов в кристаллических материалах по соотношению интенсивности комптоновского и релеевского рассеяния // *ОТТОМ 4* (Ч. 1). Харьков: ННЦ ХФТИ, 2003, с. 340.
6. В.А. Бушуев, Р.Н. Кузьмин // *УФН*. 1977, т.122, в.1(500), с.81.
7. J.M. Sharaf // *Applied Radiation and Isotopes*. 2001, v.54, p.801-809.
8. С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. *Рентгеновский и электронно-оптический анализ*. М.: МИСИС, 1994.
9. А.А. Радциг, Б.М. Смирнов. *Параметры атомов и атомных ионов*. М.: "Энергоатомиздат", 1986.

ЗМІЩЕННЯ КОМПТОНІВСЬКОГО ПІКУ ПРИ ЗБІЛЬШЕННІ ВМІСТУ ВУГЛЕЦЮ В СТАЛІ

І.Ф. Михайлов, А.А. Батурін, Л.П. Фоміна

Розроблена світосильна рентгенооптична схема вимірювань комптонівського розсіювання із застосуванням флуоресцентного джерела випромінювання та рентгенівської трубки з прострільним анодом. В стандартних зразках низколегованої сталі виявлено монотонне зміщення (у межах 70 еВ) комптонівського піку у бік релєївського з підвищенням вмісту вуглецю від 0,03 до 1,1 мас.%. Величина зміщення може служити кількісним критерієм вмісту легкої домішки у важкій матриці.

THE SHIFT OF COMPTON PEAK WITH INCREASE OF CARBON CONCENTRATION IN STEEL

I.F. Mihaylov, A.A. Baturin, L.P. Fomina

Luminous powerful X-ray optic scheme with fluorescent source and X-ray tube with transmitted target for Compton scattering have been worked out. In standard samples of low-alloy steel, monotonic shift (about 70 eV) of Compton peak to Reyleigh peak side with carbon concentration increase from 0.03 to 1.1 wt.% was revealed. The shift value may be considered a quantitative criterion of light impurity content in heavy matrix.