

УДК: 667.64:678.02

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРЕДВЕСТНИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЯХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Марасанов В. В., *д.т.н., профессор кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета, e-mail: volodymyr.marasanov@mail.ru;*

Шарко А. А., *магистр Херсонского национального технического университета, e-mail: sharko_artem@ukr.net*

На основе рассмотрения математических моделей кинематических переменных двухатомной ячейки структуры сплошной среды и условий инициирования акустических волн получена система уравнений, позволяющих в акустическом сигнале от развивающегося дефекта выделить отдельно высокочастотную и низкочастотную составляющие. На примере однородной среды, состоящей из атомов Fe и экспериментальных данных рентгеноструктурного анализа доказана правомочность применений уравнений механики сплошной среды к описанию распространения сигналов от развивающихся дефектов. С энергетических представлений выделения энергии при образовании дефектной структуры в материалах под воздействием внешних напряжений предложен механизм генерации сигналов акустической эмиссии. Квантование энергии излучения акустических колебаний доказано на основе рассмотрения спектра характеристического рентгеновского излучения атомов Fe. Высказана и обоснована гипотеза об усилении акустических сигналов в результате взаимодействия упругих волн с электронами и квантовании допустимых колебаний. Сформулировано условие отборов типов колебаний при образовании волн де Бройля. Выполнены расчеты групповой скорости предвестников акустических сигналов при возникновении дефектов в структуре материалов под воздействием внешних нагрузок и возмущений. На основании вычислений удельной энергии связи атомных ядер Fe, дефектов масс и импульса доказан дискретный характер структурных составляющих материала. Расчет частоты и длины волны подтверждает волновой характер предвестников акустических сигналов. Это является основанием существования корпускулярно-волнового дуализма в структуре спектра сигналов акустической эмиссии.

Ключевые слова: акустика, структурные модели, развивающиеся дефекты, континуум, дискретизация, предвестники сигналов.

Постановка проблемы. Актуальность изучения акустических сигналов от развивающихся дефектов объясняется важностью решения вопросов о характеристиках материалов конструкции. Растущий дефект излучает акустический сигнал, по которому он может быть обнаружен дистанционно [1, 2]. По интенсивности актов эмиссии принимается заключение об опасности дефектов. Метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации волн напряжений, является в настоящее время наиболее перспективным средством мониторинга ответственных объектов, позволяющим получать информацию о динамике происходящих процессов в реальном масштабе времени. Однако внедрение метода АЭ в практику диагностирования металлических конструкций в процессе их эксплуатации сопряжено с низкой воспроизводимостью результатов измерений. Изучение механизмов возникновения сигналов АЭ и характеристик спектров предвестников развивающихся дефектов является необходимым этапом решения этой проблемы.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме показывает, что в основу метода АЭ положено теоретическое обоснование возникновения акустических сигналов при изменениях структуры материалов. Обнаруживается двойственный механизм образования сигналов АЭ: дискретная модель структуры развивающихся дефектов [3–5] и непрерывное распространение акустических волн в среде [6–8]. Дискретная модель структуры возникновения предвестников АЭ характеризуется близкодействием составляющих элементов, в то время как среда распространения акустических колебаний характеризует дальноедействие [9,10]. Связь этих представлений составляет одну из основных задач современного материаловедения.

Целью работы является изучение характерных особенностей предвестников возникновения сигналов АЭ.

Изложение основного материала. Упругие волны связаны с материальной средой, т.к. они обусловлены смещениями частиц в веществе под воздействием приложенных нагрузок. При разрыве атомных связей в твердом теле, вызванных перестройкой кристаллической структуры, образованием, перемещением и аннигиляцией единичных дефектов кристаллической решетки, возникают сигналы АЭ. Простейшей моделью динамической среды, инициирующей распространение АЭ сигнала, может служить одномерная цепочка точечных масс, соединенных упругими связями, для которой функция Лагранжа имеет вид [3]:

$$L = \frac{m}{2} \sum_n \dot{u}^2(n, t) - \frac{1}{2} \sum_{nn'} \Phi(n, n') u(n, t) u(n', t) + \sum_n q(n, t) u(n, t), \quad (1)$$

где n, n' – номера взаимодействующих частиц; m – масса частиц в цепочке; $u(n, t)$ – смещение частиц; $q(n, t)$ – внешние силы; $\Phi(n, n')$ – силовые константы, определяющие упругие связи структурных элементов материалов.

Уравнение движения, полученное из (1), в пространственно-временных представлениях, имеет вид:

$$m\ddot{u}(n, t) + \sum_n \Phi(n, n') u(n', t) = q(n, t). \quad (2)$$

Однако, применение уравнений (1) и (2) к описанию среды, инициирующей при изменениях структуры возникновение сигналов АЭ, не позволяет выделять отдельно низкочастотную и высокочастотную части спектра АЭ сигнала. Для этого необходимо рассмотрение на этой основе более сложных моделей структур.

В механике сплошной среды одной из таких моделей является модель Коссера [3], схематически показанная на рис. 1.

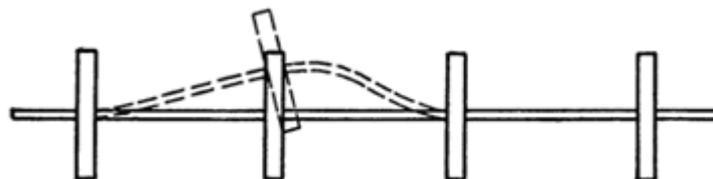


Рисунок 1 – Модель Коссера

Кинематическими переменными в модели Коссера являются не только продольные и поперечные смещения масс в одной плоскости, но и угол поворота масс в той же плоскости.

В настоящей работе сделана попытка перенести эти представления на распространение сигналов АЭ от развивающихся дефектов в средах сложной структуры.

Приближением модели такой дефектной структуры, инициирующей упругие волны, может служить двухатомная ячейка, состоящая из двух частиц разной массы, соединенных упругими связями (рис. 2).

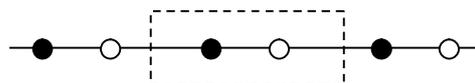


Рисунок 2 – Модель среды сложной структуры

Функция Лагранжа в двухатомной ячейке имеет вид [3]:

$$L = \frac{1}{2} \sum_{nj} m_j \dot{w}^2(n, j) - \frac{1}{2} \sum_{nn'jj'} \Phi(n - n', j, j') w(n, j) w(n', j') + \sum_{nj} f(n, j) w(n, j). \quad (3)$$

где $w(n, j)$ – смещение j -й частицы в n -й ячейке; $f(n, j)$ – внешняя сила, действующая на частицу; $\Phi(n - n', j, j')$ – силовые константы.

Инвариантность энергии относительно трансляции распространения АЭ сигнала позволяет заменить движение атомов в двухатомной ячейке движением центра масс ячейки.

Введем обозначения:

– $q(n)$ и $\mu(n)$ – обобщенные силы, соответствующие смещению самой ячейки и смещению частиц внутри ячейки;

– $u(n)$ – смещение частиц внутри ячейки;

– $\eta(n)$ – смещение центра масс;

– m_1 и m_2 – массы атомов в ячейке;

– $I = m_1 \xi_1^2 + m_2 \xi_2^2$ – момент инерции ячейки;

– ξ_1 и ξ_2 – координаты частиц в ячейке относительно центра масс.

С учетом этого:

$$u(n) = \frac{1}{m} [m_1 w(n, 1) + m_2 w(n, 2)],$$

$$\eta(n) = \frac{m_1 \xi_1 w(n, 1) + m_2 \xi_2 w(n, 2)}{I}.$$

Тогда уравнения движений ячейки, инициирующей распространение АЭ сигнала, принимают вид:

$$m \ddot{u}(n) + \sum_{n'} \Phi^{00}(n - n') u(n') + \sum_{n'} \Phi^{01}(n - n') \eta(n') = q(n), \quad (4)$$

$$I \ddot{\eta}(n) + \sum_{n'} \Phi^{10}(n - n') u(n') + \sum_{n'} \Phi^{11}(n - n') \eta(n') = \mu(n). \quad (5)$$

Матрица $\Phi^{ss'}(n)(s, s' = 0, 1)$ покоординатно выражается через силовые константы $\Phi(n, j, j')$ предвестников АЭ сигнала:

$$\Phi_{(n)}^{ss'} = \begin{pmatrix} \Phi^{00} & \Phi^{01} \\ \Phi^{10} & \Phi^{11} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $\Phi^{SS'}(n) = \Phi^{S'S}(-n)$; $\sum \Phi^{00}(n) = 0$; $\sum \Phi^{10}(n) = \sum \Phi^{01}(n) = 0$.

В модели (4), (5) величина $u(n)$, характеризующая смещение частиц внутри ячейки, определяет высокочастотную часть спектра акустического сигнала; в то время как смещение центра масс $\eta(n)$ – его низкочастотную составляющую.

При возникновении АЭ сигналов, вызванных образованием структурных дефектов, это проявляется существованием продольных, сдвиговых и спиновых колебаний, а также в количественном перераспределении энергии от предвестников сигналов акустической эмиссии [12, 13].

Главные источники АЭ – это процессы пластической деформации, связанные с появлением, движением и развитием дефектов кристаллической решетки, возникновением и развитием микро- и макротрещин, трением, фазовыми превращениями. Эмиссия проявляется в виде отдельных акустических импульсов. При механических разрушениях, процесс нагружения конструкции происходит значительно медленнее, чем распространение упругого импульса. При этом внутренние напряжения в изделии распределяются неравномерно. В некоторых отдельных областях структуры локальные

напряжения достигают предельного значения. Накопленная энергия выделяется, и определенная ее часть излучается в виде импульса АЭ.

В идеальной кристаллической решетке при малых возмущающих воздействиях $q(n)$ и $\mu(n)$ атомы совершают тепловые колебания в виде белого шума, не зависящего от частоты, энергия которого имеет порядок $4 \cdot 10^{-21}$ Дж [9, 10]. Возмущения в структуре материала проявляются в виде перемещающихся точечных дефектов кристаллической решетки: атомов внедрения или вакансий. Если атом внедрения встречается с вакансией дефекта решетки происходит аннигиляция с выделением энергии порядка 10^{-19} Дж в виде упругого импульса [9, 10].

Более крупные линейные дефекты кристаллической решетки-дислокации развиваются как размещения дополнительной неполной плоскости-краевой дислокации между атомными плоскостями. Она ослабляет прочность кристалла на 2–3 порядка, так как участки с разным количеством плоскостей сдвигаются друг относительно друга при значительно меньших напряжениях, чем на участках, где атомы расположены в узлах решетки. Это смещение представляется как движение дислокации по кристаллу, причем при смещении атомные силы преодолеваются неодновременно.

Энергия, требуемая для образования дислокаций, длиной в одно межатомное расстояние на поверхности равна энергии, необходимой для образования в решетки одного вакантного места. Эта энергия имеет порядок 1эВ [9, 10]. Каждая дислокация окружена полем напряжения. Возникновение упругих колебаний вследствие локального освобождения упругой энергии в процессе пластической деформации и разрушения составляют основу акустической эмиссии.

Выделим в сплошной среде некоторый объем V , ограничивающий участок зарождения акустических сигналов при нарушениях структуры материала. Будем считать разорванными все упругие связи атомов, проходящие через граничные точки этого объема. Тогда уравнение баланса энергии для ячейки материала имеет вид:

$$\dot{T} + \dot{\Phi} + S_+ + S_- = N,$$

где \dot{T} и $\dot{\Phi}$ – скорости изменения кинетической T и потенциальной Φ энергии; N – мощность внешних сил; S_+ и S_- потоки излучаемой энергии, проходящей через границы V в положительном и отрицательном направлениях оси x .

Величины \dot{T} и N являются однозначно определенными во времени в области V т.е.:

$$\dot{T} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho(x) \dot{u}^2(x) dx, \quad N = \int_V q(x) \dot{u}(x) dx.$$

Стягивая область V к точке x , переходим к уравнению баланса энергии в частных производных:

$$\dot{\tau}(x, t) + \dot{\varphi}(x, t) + \frac{\partial S(x, t)}{\partial x} = v(x, t),$$

где τ , φ , v – плотности энергии и мощности; $S(x, t)$ – поток энергии излучения сигнала АЭ.

Поскольку экспериментальное подтверждение модели характеристик предвестников возникновения сигналов АЭ на атомном уровне выполнить невозможно, оценка их свойств может быть произведена посредством обработки данных рентгеноструктурного анализа для атомов железа [14] с учетом современных представлений о строении атомов.

Различие эмиссионных процессов характеристического рентгеновского излучения и акустической эмиссии заключается в том, что эмиссия рентгеновского излучения обуславливается возбуждением внутренних оболочек атома внешними электронами, в то время как АЭ обуславливается структурными изменениями в пространственной решетке.

Механизм возникновения линейчатого спектра характеристического рентгеновского излучения может быть описан на основе электронных конфигураций атомов. Число линий в спектре характеристического рентгеновского излучения определяется количеством электронных слоев атома, содержащих электроны. Кванты, порожденные различными электронами, имеют разные частоты и длины волн. Каждому химическому элементу соответствуют определенный индивидуальный набор длин волн линейчатого рентгеновского спектра.

Спектр характеристического рентгеновского излучения состоит из отдельных спектральных линий. Они состоят из нескольких серий, обозначаемых буквами *K*, *L*, *M*, *N* и *O*. Каждая серия насчитывает небольшое число линий, обозначаемых в порядке убывания длины волны индексами: $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ ($K_{\alpha}, K_{\beta}, K_{\gamma}, \dots, L_{\alpha}, L_{\beta}, L_{\gamma}, \dots$, и т.д.). Спектры разных элементов имеют сходный характер. При увеличении атомного номера элемента *Z* весь рентгеновский спектр смещается в коротковолновую часть не меняя своей структуры.

Спектральные линии, обусловленные переходами электронов в *K*-, *L*-, *M*- оболочки атома, образуют *K*-, *L*-, *M*- серии характеристического спектра. Линии каждой серии обозначаются греческими буквами, с подстрочными индексами, расположенными в порядке убывания интенсивности спектральных линий. Буква *K* обозначает самую коротковолновую линию в спектре. Линии в *K*- серии являются дублетами.

При достаточно большом ускоряющем напряжении между электродами рентгеновской трубки в спектре рентгеновских лучей на фоне непрерывной составляющей появляются спектральные линии в виде узких пиков высокой интенсивности. Расположение спектральных линий на оси длин волн определяется элементарным составом материала анода.

Для атомов железа при напряжении $U = 7,1$ кВ значения длины волны в *K*-серии равны [12] (табл. 1).

Таблица 1 – значения длины волны в *K*-серии

| $\lambda, \text{нм}$ | | | |
|----------------------|----------------|---------------|---------------|
| $K_{\alpha 1}$ | $K_{\alpha 2}$ | $K_{\beta 1}$ | $K_{\beta 2}$ |
| 0,1932 | 0,1936 | 0,1753 | 0,1740 |

Для образования *K*-серии необходимо создание вакансии в электронном *K*-слое. Пороговое напряжение возбуждения *K*-серии определяется энергией связи электронов этого слоя.

$$eU = E_k.$$

Если $eU > E_k$ возникает вакансия в оболочках второго электронного слоя. Заполнение этих вакансий переходами с более высокоэнергетических слоев с главным квантовым числом $n > 2$ приводит к генерированию *L*-серии (рис. 3).

Символ *K* обозначает рентгеновский фотон, излучаемый при переходе электрона с внешней оболочки на *K* оболочку.

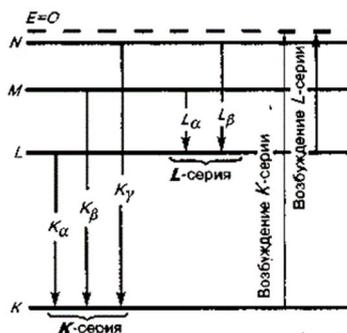


Рисунок 3 – Механизм возникновения рентгеновских серий

Когда электрон переходит с одной оболочки n_1 на другую n_2 , атом излучает рентгеновский фотон с частотой:

$$\nu = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

где $R=3.289 \cdot 10^{15}$ 1/с – постоянная Ридберга; Z – порядковый номер элемента; σ – константа, для K -серии $\sigma = 1$, для L -серии $\sigma = 0.75$.

Соответствующая порция энергии может быть сообщена атому за счет удара достаточно быстрым электроном или поглощения рентгеновского фотона.

В основном состоянии атом обладает минимальной энергией. Чтобы перевести атом из основного состояния в возбужденное, необходимо сообщить энергию, например, за счет поглощения атомом фотона. Фотон при поглощении его атомом передает ему всю энергию. Атом не может поглощать только часть фотона, ибо фотон является неделимым. Поэтому атом может поглощать только те фотоны, энергия которых соответствует разности энергии двух его уровней:

$$\nu = \frac{E_{n_2} - E_{n_1}}{h}.$$

В [8] была высказана гипотеза об эффекте усиления акустических сигналов в результате взаимодействия упругих волн с электронами. Механизм такого взаимодействия может быть рассмотрен на основе волн де Бройля.

Проявление квантования энергии материальных объектов имеет место в таком процессе как колебания струны, закрепленной на обоих концах. Наличие граничных условий, требующих неподвижности крайних точек струны, приводит к отбору допустимых колебаний, т.е. к их квантованию.

Стоячие волны на круговой орбите могут существовать только при условии, что длина орбиты равна целому числу длин волн. Если это условие не выполняется, то волны, приходящиеся в любую произвольную фиксированную точку пространства после круговых проходов орбиты, не будут совпадать по фазе, т.е. не будут установившимися (рис. 4).

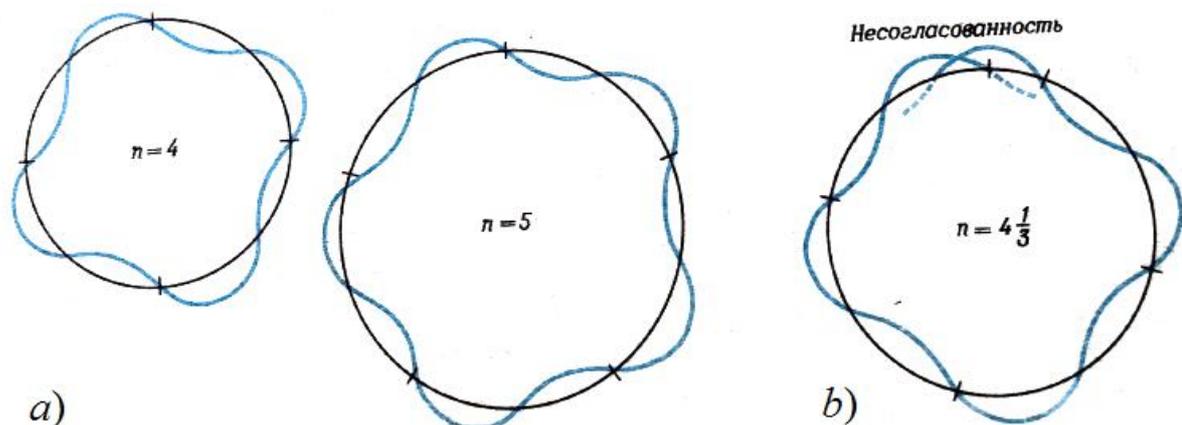


Рисунок 4 – Типы колебаний, определяемые граничными условиями образования волны де Бройля: а) согласованные, б) не согласованные [15]

Для установившихся стоячих волн на круговой орбите ее длина должна быть равна целочисленному значению, кратному от длины волны:

$$2\pi r = n\lambda \Rightarrow n = \frac{2\pi r}{\lambda}.$$

Электроны обладают волновыми свойствами, проявляющимися в существовании волн де Бройля.

Количественные соотношения, связывающие корпускулярные и волновые свойства микрочастиц, имеют вид:

$$E = h\nu, P = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{mv},$$

где h – постоянная Планка; P – импульс частицы; ν – частота; m – масса микрочастицы; λ – длина волны; v – ее скорость.

Для электрона, ускоренного разностью потенциалов 7.1 кВ, величина λ равна:

$$\frac{mv^2}{2} = eU \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 7100}{9.1 \cdot 10^{-31}}} = 49.9 \cdot 10^6 \text{ м/с},$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \cdot 10^{-34}}{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot 49.9 \cdot 10^6} = 0.14 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

В волнах де Бройля существует дисперсия. Фазовая скорость волн де Бройля больше скорости света в вакууме. Это не противоречит теории относительности, т.к. ограничения, накладываемые на движение со скоростью большей скорости света, касаются переноса массы или энергии. Фазовая скорость волны не характеризует ни один из этих процессов, поэтому на ее величину не накладывается никаких ограничений. Она устанавливает только связь между фазами колебаний различных точек пространства. Групповая скорость волн де Бройля равна скорости движения частиц и для атомов железа равна:

$$v_{\text{фаз}} = \frac{c^2}{v} = \frac{(3 \cdot 10^8)^2}{49.9 \cdot 10^6} = 18.03 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Групповая скорость волн де Бройля для атомов Fe равна $49.9 \cdot 10^6$ м/с.

Количественные соотношения, связывающие корпускулярные и волновые свойства, распространяются на частицы, которые имеют массу покоя, в том числе и на частицы структуры материалов в развивающихся дефектах.

Энергия и тип связи между атомами в решетке определяются строением валентных оболочек. В двухатомной цепочке железа существует ковалентная связь, образуемая путем объединения валентных электронов соседних атомов при перекрытии электронных оболочек. Обобществленные электроны заполняют внешнюю электронную оболочку каждого из взаимодействующих атомов с образованием устойчивой электронной конфигурации. Специфика ковалентной связи в двухатомной цепочке железа состоит в том, что в обобществлении электронов участвуют все атомы кристалла и обобществленные электроны не локализуются, а свободно перемещаются внутри решетки, образуя электронное облако. Распределение электронов в атоме в соответствии со свойствами их волновых функций представляются в виде заряженных облаков, плотность которых максимальна на расстояниях r от ядра. Среднее расстояние электронов от ядра называется радиусом орбитали. Для железа $r = 0.15$ нм.

Формула де Бройля позволяет перенести представления о корпускулярно-волновой природе излучения на частицы вещества. Такой корпускулярно-волновой дуализм должен быть присущ и предвестникам возникновения сигналов АЭ, поскольку существуют корпускулярные характеристики структуры материала, такие как энергия и импульс развивающихся дефектов и волновые характеристики предвестников, такие как частота и длина волны АЭ сигналов. Согласно гипотезе де Бройля с движением любой микрочастицы связано распространение волны, что в применении к возникновению АЭ сигнала связано с высокочастотной составляющей акустического спектра, в то время как низкочастотный спектр АЭ сигнала обусловлен перераспределением колебательной энергии первичного АЭ сигнала.

Для определения прочности межатомных связей в структурных составляющих материала, предшествующих возникновению сигналов АЭ, следует рассмотреть энергию связи атомных ядер, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные частицы (нуклоны). Энергия связи атомных ядер определяется через дефект масс Δm :

$$\Delta E_{св} = \Delta m c^2.$$

Дефект масс – это разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{я},$$

где Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева; A – массовое число; $m_p = 1.00786$ а.е.м. – масса протона; $m_n = 1.00867$ а.е.м. – масса нейтрона; $m_{я}$ – масса ядра.

Удельная энергия связи выражает собой энергию связи, приходящуюся на один нуклон. Для разных химических элементов эта величина представлена на рис. 5.

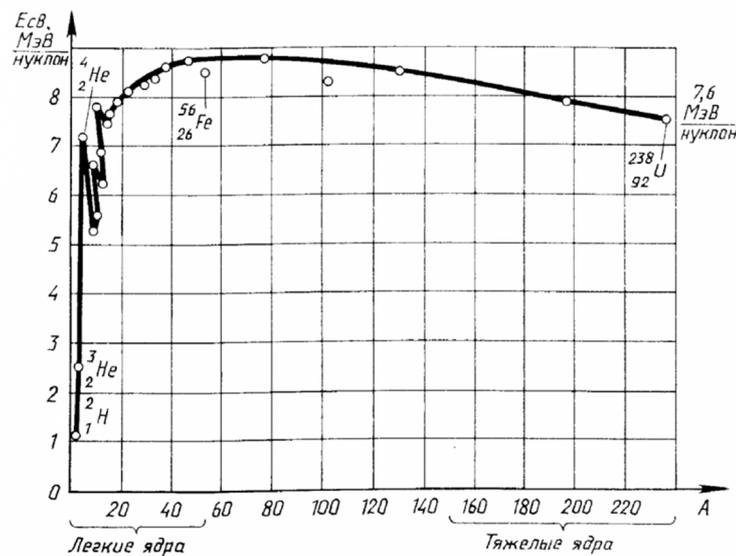


Рисунок 5 – Энергия связи атомных ядер

Вычисления, выполненные в атомных единицах массы для атомов Fe , дали значения $\Delta m = 56 \cdot 1.00786 + (56 - 26) \cdot 1.00867 - 55.9355 = 0.52896$ а.е.м.

С учетом этого энергия связи $E = 931 \text{ МэВ} \cdot 0.52896 \text{ а.е.м.} = 492.461 \text{ МэВ}$.

В свою очередь, удельная энергия связи $E/n = 492.461 / 56 = 8.79396 \text{ МэВ}$ на нуклон.

Перенос расчетных значений удельной энергии связи нуклонов для атомов железа на рис. 5, обнаруживает сходимость расчетов с экспериментальными данными. Это является подтверждением реальной прочности железа.

Выводы. На основе рассмотрения двухатомной ячейки построена модель акустического спектра сигналов развивающихся дефектов, в которой выделены низкочастотная и высокочастотная составляющая АЭ сигнала. Предложен механизм возникновения сигналов АЭ в развивающихся дефектах структуры материала.

На примере однородной среды, состоящей из атомов Fe и экспериментальных данных рентгеноструктурного анализа, доказана правомочность используемых корпускулярных и волновых подходов к описанию среды, инициирующей возникновение сигналов АЭ.

На основе современных представлений о строении атомного ядра атомов Fe выполнены расчеты характеристик среды предвестников АЭ сигнала: дефекта масс, энергии связи, удельной энергии связи, а также акустических параметров моделей АЭ сигналов: длин волн и скоростей волн де Бройля. Выполненные расчеты являются

количественным обоснованием гипотезы о существовании корпускулярно-волнового дуализма сигналов АЭ от развивающихся дефектов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марасанов В. В. Математическое обеспечение построения моделей определения координат источников акустической эмиссии / В. В. Марасанов, А. А. Шарко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2016. – № 1 (14). – С. 310–319.
2. Marasanov V. V. Triangulation methods of position defects in acoustic-emission control / V. V. Marasanov, A. A. Sharko // Системні технології. – 2015. – Вип. 6 (101). – С. 85–91.
3. Кунин И. А. Теория упругих сред с микроструктурой. Нелокальная теория упругости / И. А. Кунин. – М. : Наука, 1975. – 410 с.
4. Lymarenko Y. A. Mathematical modeling of acoustic emission process / Y. A. Lymarenko, A. D. Shamprovskij // Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. – 2003. – No. 1. – P. 30–33.
5. Vinikov V. A. Theoretical models of acoustic emission in rock / V. A. Vinikov, A. S. Voznisenskij, K. B. Ustinov, V. L. Shkuratin // Journal of Applied Mechanics and Theoretical Physics. – 2010. – No. 1. – P. 100–105.
6. Марасанов В. В. Энергетический спектр сигналов акустической эмиссии наноразмерных объектов / В. В. Марасанов, А. А. Шарко // Журнал нано и электронной физики. – 2017. – Т. 9, № 2. – DOI: 10.21272/jnep.9(2).02012. – Режим доступа : https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/65731/1/jnep_V9_02012_4.pdf
7. Лисина С. А. Континуальные и структурно-феноменологические модели в механике сред с микроструктурой : автореф. дис. канд. физ-мат. наук / С. А. Лисина. – Нижний Новгород, 2009. – 56 с.
8. Дельесан Э. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов / Э. Дельесан, Д. Руайе. – М. : Наука, 1982. – 424 с.
9. Сухорукова В. В. Неразрушающий контроль в 5 кн. : кн. 2. Акустические методы контроля / В. В. Сухорукова. – М. : Высш. школа, 1991. – 283 с.
10. Рудакова А. В. Идентификация опасных состояний механических конструкций методом акустической эмиссии : дисс. канд. техн. наук / А. В. Рудакова. – Херсон, 1997. – 157 с.
11. Марасанов В. В. Наноструктурные модели инициирования сигналов акустической эмиссии / В. В. Марасанов, А. А. Шарко. // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Луцьк, 2017. – Вип. 57. – С. 115–122.
12. Marasanov V. Mathematical Models for Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signal / V. Marasanov, A. Sharko // International Frontier Science Letters Switzerland. – 2016 – No. 10. – P. 37–44.
13. Емельянов А. Н. Эффективные характеристики в молекулярной теории упругости : дис. канд. физ-мат. наук. / А. Н. Емельянов – Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2016 – 156 с.
14. Чубаров В. М. Определение соотношения двух- и трехвалентного железа в карбонатных горных породах по эмиссионным линиям К-серии рентгеновского флуоресцентного спектра / В. М. Чубаров // Аналитика и контроль. – 2011. – Том 15, № 3. – С. 339–343.
15. Дикерсен Р. Основные законы химии / Р. Дикерсен, Г. Грей, Дж. Хейт. – М. : Мир, 1982. – 652 с.

REFERENCES

1. Marasanov V. V. Matematicheskoe obespechenie postroeniya modeley opredeleniya koordinat istochnikov akusticheskoy ehmissii / V. V. Marasanov, A. A. Sharko // Naukoviy visnik Khersons'koi derzhavnoi morskoi akademii. – 2016. – № 1 (14). – S. 310–319.
2. Marasanov V. V. Triangulation methods of position defects in acoustic-emission control / V. V. Marasanov, A. A. Sharko // Sistemni tekhnologi. – 2015. – Vip. 6 (101). – S. 85–91.
3. Kunin I. A. Teoriya uprugikh sred s mikrostrukturoy. Nelokal'naya teoriya uprugosti / I. A. Kunin. – M. : Nauka, 1975. – 410 s.
4. Lymarenko Y. A. Mathematical modeling of acoustic emission process / Y. A. Lymarenko, A. D. Shamprovskiy // Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. – 2003. – No. 1. – P. 30–33.
5. Vinikov V. A. Theoretical models of acoustic emission in rock / V. A. Vinikov, A. S. Voznisenskij, K. B. Ustinov, V. L. Shkuratin // Journal of Applied Mechanics and Theoretical Physics. – 2010. – No. 1. – P. 100–105.
6. Marasanov V. V. Ehnergeticheskij spektr signalov akusticheskoy ehmissii nanorazmernikh objektov / V. V. Marasanov, A. A. Sharko // Zhurnal nano i ehlektronnoy fiziki. – 2017. – T. 9, № 2. – DOI: 10.21272/jnep.9(2).02012. – Rezhim dostupu : https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/65731/1/jnep_V9_02012_4.pdf
7. Lisina S. A. Kontinualjnihe i strukturno-fenomenologicheskie modeli v mekhanike sred s mikrostrukturoy : avtoref. dis. kand. fiz-mat. nauk / S. A. Lisina. – Nizhniy Novgorod, 2009. – 56 s.
8. Deljesan Eh. Uprugie volnih v tverdikh telakh. Primenenie dlya obrabotki signalov / Eh. Deljesan, D. Ruayje. – M. : Nauka, 1982. – 424 s.
9. Sukhorukova V. V. Nerazrushayuthiy kontrolj v 5 kn. : kn. 2. Akusticheskie metodih kontrolya / V. V. Sukhorukova. – M. : Vihssh. shkola, 1991. – 283 s.
10. Rudakova A. V. Identifikaciya opasnikh sostoyaniy mekhanicheskikh konstrukciy metodom akusticheskoy ehmissii : diss. kand. tekhn. nauk / A. V. Rudakova. – Kherson, 1997. – 157 s.
11. Marasanov V. V. Nanostrukturnihe modeli iniciirovaniya signalov akusticheskoy ehmissii / V. V. Marasanov, A. A. Sharko. // Naukovi notatki. Mizhvuzivskiy zbirnik. – Lucjk, 2017. – Vip. 57. – S. 115–122.
12. Marasanov V. Mathematical Models for Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signal / V. Marasanov, A. Sharko // International Frontier Science Letters Switzerland. – 2016 – No. 10. – P. 37–44.
13. Emel'yanov A. N. Ehffektivnihe kharakteristiki v molekulyarnoy teorii uprugosti : dis. kand. fiz-mat. nauk. / A. N. Emel'yanov – Moskva : MGU im. M. V. Lomonosova, 2016 – 156 s.
14. Chubarov V. M. Opredelenie sootnosheniya dvukh- i trekhvalentnogo zheleza v karbonatnikh gornikh porodakh po ehmissionnim liniyam K-serii rentgenovskogo fluorescentnogo spektra / V. M. Chubarov // Analitika i kontrolj. – 2011. – Tom 15, № 3. – S. 339–343.
15. Dikersen R. Osnovnihe zakonih khimii / R. Dikersen, G. Greyj, Dzh. Kheyjt. – M. : Mir, 1982. – 652 s.

Марасанов В. В., Шарко А. О. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЕРЕДВІСНИКІВ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ В СТРУКТУРНИХ МОДЕЛЯХ ТА РОЗВИТКОК ДЕФЕКТІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

На основі розгляду математичних моделей кінематичних змінних двухатомних осередків структури суцільного середовища і умов ініціювання акустичних хвиль отримана система рівнянь, що дозволяє в акустичному сигналі від розвитку дефекту виділити окремо високочастотну і низькочастотну складові. На прикладі однорідного середовища, що складається з атомів Fe, і експериментальних даних рентгеноструктурного аналізу, доведена правомірність застосувань рівнянь механіки суцільного середовища до опису поширення сигналів від розвитку дефектів. З енергетичних уявлень виділення енергії при утворенні дефектної структури в матеріалах під впливом зовнішніх напружень запропоновано механізм генерації сигналів акустичної емісії. Квантування енергії випромінювання акустичних коливань доведено на основі розгляду спектру характеристичного рентгенівського випромінювання атомів Fe. Висловлена і обґрунтована гіпотеза про посилення акустичних сигналів в результаті взаємодії пружних хвиль з електронами і квантуванні допустимих коливань. Сформульовано умову відборів типів коливань при утворенні хвиль де Бройля. Виконано розрахунки групової швидкості провісників акустичних сигналів при виникненні дефектів в структурі матеріалів під впливом зовнішніх навантажень і збурень. На підставі обчислень питомої енергії зв'язку атомних ядер Fe, дефектів мас і імпульсу доведений дискретний характер структурних складових матеріалу. Розрахунок частоти і довжини хвилі підтверджує хвильовий характер провісників акустичних сигналів. Це є підставою існування корпускулярно-хвильового дуалізму в структурі спектра сигналів акустичної емісії.

Ключові слова: акустика, структурні моделі, дефекти, що розвиваються, континуум, дискретизація, провісники сигналів.

Marasanov V. V., Sharko A. A. PHYSICAL PROPERTIES OF SIGNAL PRECURSORS IN STRUCTURAL MODELS OF DEVELOPING DEFECTS OF METAL CONSTRUCTIONS

Based on the consideration of mathematical models of kinematic variables of a diatomic cell of the continuous medium structure and the conditions for initiating acoustic waves, a system of equations is obtained that allows the acoustic signal from the developing defect to separate the high-frequency and low-frequency components. Using the example of a homogeneous medium consisting of Fe atoms and experimental X-ray diffraction data, the validity of the applications of the continuous medium equations to the description of signal propagation from developing defects is proved. From energy representations of energy release in the formation of a defective structure in materials under the influence of external stresses, a mechanism for generating acoustic emission signals is proposed. The quantization of the radiation energy of acoustic vibrations is proved on the basis of a study of the spectrum of the characteristic X-ray radiation of Fe atoms. The hypothesis about amplification of acoustic signals as a result of interaction of elastic waves with electrons and quantization of admissible oscillations is stated and justified. A condition is formulated for selecting the types of oscillations in the formation of de Broglie waves. The group velocities of precursors of acoustic signals are calculated in the event of defects in the structure of materials under the influence of external loads and perturbations. Based on calculations of the specific binding energy of Fe atomic nuclei, mass and momentum defects, the discrete nature of the structural constituents of the material has been proved. Calculation of the frequency and wavelength confirms the wave character of the precursors of acoustic signals. This is the basis for the existence of a particle-wave dualism in the structure of the spectrum of acoustic emission signals.

Key words: acoustics, structural models, developing defects, continuum, discretization, signals precursors.

© Марасанов В. В., Шарко А. О.

Статтю прийнято
до редакції 10.05.17