

УДК 667.64:678.026

А. В. Шарко, В. Д. Нигалатий, С. А. Рожков, А. В. Букетов

*Херсонская государственная морская академия***ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ**

В настоящее время не существует общей теории взаимосвязи прочностных и акустических свойств материалов. Однако некоторые феноменологические предпосылки и анализ существующих экспериментальных данных могут служить базой для разработки некоторых положений такой теории на основе волновых процессов, учитывающих сложный характер взаимодействия геометрических и акустических параметров контролируемого объекта и характера возмущения.

Характер смещения дислокаций под действием переменного напряжения, создаваемого ультразвуковой волной, определяется выбором дислокационной модели. Путем решения уравнения колеблющейся струны совместно с уравнением движения упругой волны получены выражения для скорости распространения и затухания ультразвуковой волны, в зависимости от ориентации, частоты прозвучивания, плотности дислокации, средней длины дислокационной петли, вектора Бюргерса, модуля сдвига, коэффициента Пуассона, плотности среды.

Ключевые слова: прочность, волновые процессы, дислокации

Рис. 1. Форм. 4. Лит. 6.

О. В. Шарко, В. Д. Нігалатій, С. О. Рожков, А. В. Букетов

ВПЛИВ ЗМІНИ ДИСЛОКАЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ НА АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ

На сьогодні не існує загальної теорії взаємозв'язку міцнісних і акустичних властивостей матеріалів. Однак, деякі феноменологічні передумови та аналіз існуючих експериментальних даних можуть служити базою для розробки деяких положень такої теорії на основі хвильових процесів, що враховують складний характер взаємодії геометричних і акустичних параметрів контрольованого об'єкта і характеру збурення.

Характер зміщення дислокацій під дією змінної напруги, створюваного ультразвуковою хвилею, визначається вибором дислокаційної моделі. Шляхом рішення рівняння коливання струни спільно з рівнянням руху пружної хвилі отримано вирази для швидкості поширення й загасання ультразвукової хвилі залежно від орієнтації, частоти озвучування, щільності дислокації, середньої довжини дислокаційної петлі, вектора Бюргерса, модуля зсуву, коефіцієнта Пуассона, щільності середовища.

Ключові слова: міцність, хвильові процеси, дислокації

A. V. Scharco, V. D. Nihalatiy, S. A. Rozhkov, A. V. Buketov

THE IMPACT OF CHANGES IN DISLOCATION STRUCTURE ON THE ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF MATERIALS

At present there is no general theory of the relationship of strength and acoustic properties of materials. However, some phenomenological background and analysis of existing experimental data can serve as the basis for the development of certain provisions of such a theory on the basis of wave processes, taking into account the complex interactions of geometric and acoustic parameters of the controlled object and the nature of the disturbance.

The elastic moduli to characterize the strength of interaction between neighbouring atoms in the crystal lattice and therefore electronic configurations that affect these forces. The elastic properties of metals and alloys is largely determined by the strength of interatomic bonds, which specifies the physical and technological characteristics of the alloys.

The nature of displacement of dislocations under the action of an alternating voltage generated ultrasonic wave is determined by the choice of a dislocation model. By solving the equation of a vibrating string, together with the equation of motion of the elastic wave expressions for the velocity and attenuation of ultrasonic waves, depending on the orientation, frequency of testing, dislocation density, the average length of dislocation loops, the burgers vector, the shear modulus, Poisson's ratio, density of the medium.

Key words: strength, wave processes, dislocation

Актуальность темы. Современное материаловедение – отрасль науки и техники, изучающая состав, строение, физические, химические, потребительские и технологические свойства материалов, методы их оценивания, разработку новых и усовершенствование имеющихся материалов высокого качества, технологичности, долговечности, безопасности и надежности в процессе эксплуатации. В этом разрезе актуальными направлениями исследования являются разработка методов исследования и оценивания физических, химических, технологических свойств материалов, показателей качества и потребительских свойств материалов в зависимости от назначения.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме показывает, что существует ряд методов неразрушающих испытаний, позволяющих решать различные технологические задачи

производства, связанные с определением прочностных свойств выпускаемых изделий, в основе которых лежат процессы взаимодействия электромагнитных и акустических возбуждений со структурой вещества и способы определения механических свойств по характеристикам твердости [1-5]. Эти методы способны образовать при их рациональном сочетании систему определения механических свойств материалов, обладающую повышенной надежностью и экспрессивностью. Однако, если для безобразцовых и электромагнитных методов существует глубокая проработка их физических основ, то акустические методы неразрушающих испытаний прочностных свойств материалов и конструкций еще только начинают развиваться и необходимы серьезные теоретические и экспериментальные исследования по установлению взаимосвязи измеряемых рабочих характеристик со структурными параметрами вещества, влияющими на прочностные свойства материалов.

Сведения об использовании акустических методов для контроля прочностных свойств малочисленны и разрознены [1-6]. Это объясняется малым эффектом изменения скорости ультразвука при изменении механических свойств и отсутствием серийно выпускаемой аппаратуры, обеспечивающей измерения с требуемой точностью.

Целью работы является исследование взаимосвязи прочностных и акустических свойств материалов в спектре изменения их дислокационной структуры как основы создания системы оценки структуры и механических свойств изделий.

Изложение основного материала. Для обоснования методов акустического контроля прочностных свойств материалов необходимо прежде всего выяснить механизм процессов, лежащих в основе взаимосвязи акустических и структурных параметров вещества. В основе такого рассмотрения может быть положена эволюция дислокационной структуры и связь параметров этой структуры с механическими свойствами материалов.

Обязательным условием при установлении прочностных и акустических свойств материалов является необходимость выполнения акустических измерений и механических испытаний на одних образцах, например, на образцах, предназначенных для испытаний на разрыв. Изделием такой формы и является цилиндрический резонатор.

Известно, что при падении плоской акустической волны из среды с волновым сопротивлением $\rho_1 c_1$ на бесконечно протяженную пластину толщиной l с волновым сопротивлением $\rho_2 c_2$ амплитуда проходящей волны зависит от частоты. Значение коэффициента прохождения равно:

$$W = \frac{2}{2 - \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l}{\lambda_2}\right) \left[\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \right]} \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda_2}\right)$$

При $\frac{2\pi l}{\lambda_2} = n\pi$ $W = 1$ амплитуда прошедшей волны максимальна. Значения частот,

удовлетворяющие этому условию $f = \frac{nc}{2l}$. При постоянных l и n , f зависит только от c_2 .

В общем случае акустические волны вследствие того, что они создаются пьезоэлементами конечных размеров, могут иметь не плоский фронт. В целом волновое поле в изделии конечных размеров произвольной формы вследствие трансформации различных типов волн при отражении носит весьма сложный характер. Сложным и является спектр собственных частот изделий.

Как известно скорость распространения ультразвука в твердых телах определяется упругими модулями и плотностью, которые в свою очередь изменяются от структуры и состояния металла, регулируемых механико-термической обработкой. Эти изменения невелики, например закалка углеродистой стали уменьшает ее модули Юнга и сдвига относительно отожженного состояния на 3...4%, плотность при термообработке изменяется на порядок меньше.

К структурным факторам, влияющим на модули упругости материала и его плотность, относятся точечные дефекты и дислокации, а также соотношения фаз в сплаве.

Колебания дислокаций приводят к изменению затухания и скорости распространения ультразвуковых колебаний.

В процессе деформации при механической или термомеханической обработке, наклепе и т.д. изменяется длина дислокационной петли L . Эффект дислокационного закрепления (уменьшение длины дислокационных петель) обычно сказывается в уменьшении дислокационного затухания и увеличении скорости распространения ультразвуковых волн. Однако, при определенных условиях скорость ультразвука может возрастать при раскреплении дислокаций или увеличении длины петель. Это так называемый аномальный эффект.

Форма дислокации при малом и большом затухании среды представлена на рис. 1.

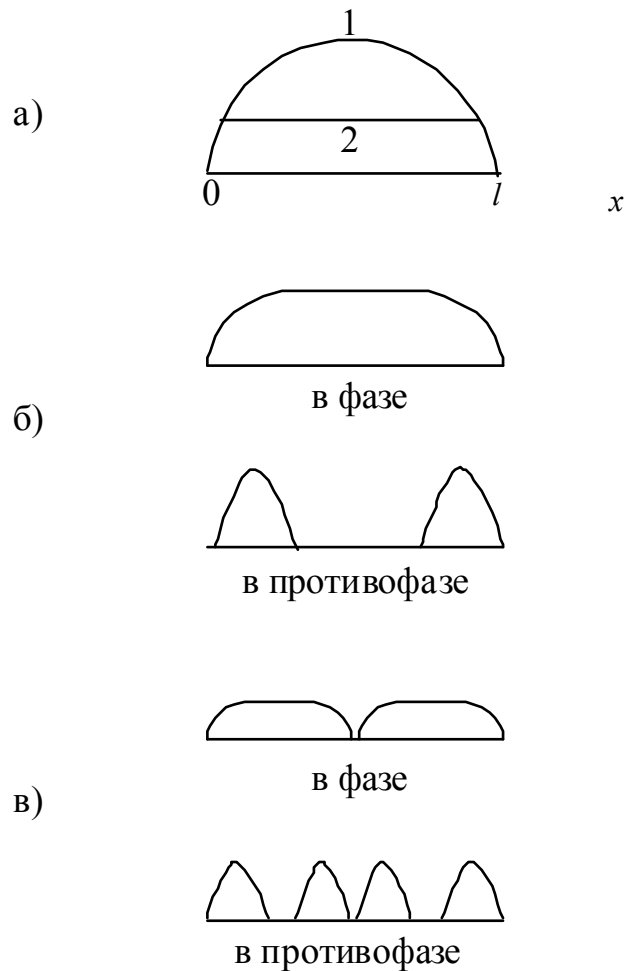


Рисунок 1 – Форма дислокации (а) при малом (1) и большом (2) затухании среды. Схема смещения дислокации под действием приложенного напряжения с двумя (б) и с тремя (в) центрами закрепления

Влияние дислокаций на модули упругости или на скорость распространения ультразвуковых колебаний качественно можно объяснить следующим образом. Дислокационная петля длиной l в момент, когда приложенное напряжение равно нулю может быть представлена прямой линией (рис. 1), лежащей вдоль оси x от $x = 0$ до $x = l$. Под действием напряжения дислокационная петля изгибается между точками закрепления на концах (кривая 1 на рис. 1а). Если среда, в которой колеблется дислокационная петля, вязкая, то при движении возникает сила, стремящаяся затормозить ее. При низких частотах возбуждения ультразвуковых колебаний скорость движения дислокаций мала и поэтому торможением, вызванным вязкостью среды, можно пренебречь. Движение дислокаций в этом случае ограничивается только натяжением дислокационной линии. Форма дислокации соответствует кривой 1 на рис. 1а. При высоких частотах воздействия ультразвуковых колебаний, скорость участков дислокационной линии, удаленных от точек закрепления, велика, поэтому сила торможения, вызванного вязкостью среды играет более важную роль, чем сила натяжения. Таким образом, вязкость среды ограничивает амплитуду движения, и она получается меньшей, чем для низких частот (кривая 2 на рис. 1а). При этом дислокационная петля на большей части своей длины колеблется как жесткий стержень, за

исключением концевых точек, где смещение равно нулю. Такой же переход от кривой 1 к кривой 2 можно получить, если при фиксированной частоте ультразвуковых колебаний увеличивать длину дислокационной петли или при фиксированной частоте и постоянной длине петли увеличивать вязкость среды, например, повышая температуру.

Кривая 2 представляет собой лишь огибающую амплитуду движения во времени. Следовательно, в каждый данный момент времени форма дислокационного смещения может не совпадать с кривой 2. Это связано с тем, что фазы колебаний всех точек линии дислокации неодинаковы. Точки дислокации, находящиеся вблизи центров закрепления, имеют небольшое смещение, т.е. малую скорость, вследствие чего тормозящая сила мала. Поэтому эти точки находятся всегда в фазе с приложенным напряжением. Точки вблизи середины сегмента из-за большой вязкости тормозящей силы отстают по фазе от приложенного напряжения до $\frac{\pi}{2}$. Это

видно из рис. 1б, где представлена кривая 2, часть которой находится в фазе, а часть – в противофазе с приложенным напряжением. Если длина петли l велика, то смещение вдоль большей части будет в противофазе. Кривые, показанные на рис. 1б, схематически изображают форму дислокационного сегмента в два момента времени, отличающиеся друг от друга на четверть периода движения.

При ультразвуковых измерениях, находящаяся в противофазе и находящаяся в фазе движения, определяются отдельно. Движение, находящееся в противофазе приводит к затуханию, а находящееся в фазе – к изменению скорости распространения ультразвуковых волн. Площадь под кривой, соответствующей движению в фазе, пропорциональна неупругой деформации, обусловленной движением дислокаций. Этот вклад дислокаций в деформацию определяется выражением

$$\varepsilon_g = \frac{1}{l} \int_0^l b y'(x) dx,$$

где $y'(x)$ – действительная часть $y(x)$; b – величина вектора Бюргерса. Таким образом ε_g можно рассматривать просто как площадь под кривой действительной части дислокационного смещения. Изменение модуля упругости определяется выражением

$$\frac{M_o - M(\omega)}{M_o} = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_y},$$

где $M(\omega)$ – модуль упругости, измеренный на частоте ω ;

M_o – модуль упругости, измеренный при бесконечной частоте, т.е. чисто упругий модуль;

ε_g – дислокационный вклад в общую деформацию;

ε_y – упругая деформация.

Относительное изменение скорости ультразвуковой волны определяется выражением

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{v - v(\omega)}{v_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta M}{M_o}.$$

Величина $\frac{\Delta v}{v_0}$ представляет собой уменьшение скорости ультразвуковой волны или модуля упругости.

С увеличением скорости колебаний площадь ε_g уменьшается и, следовательно, скорость ультразвука повышается, т.к. дислокация не способна больше следовать за быстрым изменением внешнего напряжения.

На рис. 1 показано, как изменяется смещение, показанное на рис. 1б при добавлении одной точки закрепления. На низких частотах при добавлении точки закрепления площадь под кривой действительной части смещения уменьшается, поэтому скорость ультразвука увеличивается, т.е.

$\frac{\Delta v}{v_0}$ уменьшается, а $v(\omega)$ увеличивается. Однако на высоких частотах добавление точки

закрепления вынуждает часть дислокации возле нового закрепления находиться в фазе с приложенным напряжением, при этом появляется находящаяся в фазе составляющая смещения,

что увеличивает площадь под кривой смещения, увеличивает $\frac{\Delta v}{v_0}$ и уменьшает скорость. В этом случае эффект невелик, так как на высоких частотах только малая часть смещения находится в фазе с внешним напряжением.

Если продолжать добавлять точки закрепления, то дислокационное смещение будет постоянно уменьшаться и в конце концов составляющие смещения становятся полностью закрепленными. Уменьшение расстояния между точками закрепления приводит к взаимодействию между ними, что и определяет обычно наблюдаемое в эксперименте изменение скорости, так как чем больше точек закрепления, тем больше сегментов, движение которых ограничено линейным натяжением.

Рассмотренные положения влияния эволюции дислокационной структуры на изменение акустических характеристик материалов могут быть положены в основу феноменологической теории взаимосвязи прочностных и акустических свойств материалов.

Выводы. Таким образом качественно может быть описан механизм изменения затухания и скорости распространения ультразвуковых колебаний в зависимости от частоты прозвучивания и таких факторов как плотность дислокаций, упругие модули, плотность среды, на которые влияют, например, механическая, термическая обработка и наклеп.

1. Grossman G. Quality Ladders in the Theory of Growth / G. Grossman, E. Helpman // Review of Economic Studies. – 1991. – P. 43–61.
2. Aghion P. A model of Growth Creative Destruction / P. Aghion, P. Howitt // Econometrica. – 1992. – V. 60. – P. 323–351.
3. Нонака И. Компания – создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах / И. Нонака, Х. Такеучи [пер. с англ.] – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес». – 2011. – 384 с.
4. Dixon S., Edwards C., Palmer S. B. Recent developments in the characterisation of aluminium sheets using electromagnetic acoustic transducers (EMATs) // Insight. – 2002. – V. 44, № 5. – P. 274–278.
5. Мишакин В. В., Кажаяев В. В., Наумов М. Ю. Совместное использование метода ударного внедрения индентора и метода акустической анизотропии для оценки усталостной поврежденности металла // Дефектоскопия. – 2002. – № 9. – С. 39–45.
6. Mishakin V. V., Serebryany V. N. Application of the acoustoelastic effect in the precise evaluation of the plastic strain value // Acoustics Letters. – 1994. – V. 17, № 7. – P. 123–128.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2015.