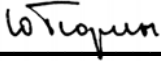


УТВЕРЖДАЮ

Декан ЕНМФ

 Ю.И. Тюрин
« 10 » декабря 2008 г.

Ю.П. Черданцев, Г.В. Гаранин

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Приборы и установки для анализа твердого тела»
для магистрантов, обучающихся по магистерской программе
«Физика конденсированного состояния вещества»
направления 010700 «Физика»

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 669:534(076.5)

ББК 34.2:22.32я73

Ч-45

Черданцев Ю.П.

Ч-45 Исследование физико-механических свойств металлов акустическими методами: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Приборы и установки для анализа твердого тела» для магистрантов, обучающихся по магистерской программе «Физика конденсированного состояния вещества» направления 010700 «Физика» / Ю.П. Черданцев, Г.В. Гаранин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 53 с.


ISBN 5-98298-343-8

УДК 669:534(076.5)


ББК 34.2:22.32я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
общей физики ЕНМФ
« 30 » октября 2008 г.

Заведующий кафедрой ОФ
доктор физико-математических наук,
профессор


И.П. Чернов

Председатель учебно-методической
комиссии


В.В. Ларионов

Рецензент

Доктор физико-математических наук, доцент ТПУ

Н.Н. Никитенков

ISBN 5-98298-343-8

© Черданцев Ю.П., Гаранин Г.В., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1	4
1. Теоретическая часть	4
2. Методика измерения затухания рэлеевской волны	17
3. Экспериментальная установка	19
4. Порядок выполнения работы	20
4.1. Подготовка образцов исследуемого материала	20
4.2. Порядок подготовки установки и измерение логарифмического декремента колебаний	21
4.3. Порядок подготовки установки к измерениям изменения коэффициента затухания при наводороживании	22
5. Контрольные вопросы	22
Список литературы	23
Лабораторная работа №2	24
1. Теоретическая часть. Акустическая эмиссия в твердых телах	24
1.1. Введение	24
1.2. Физическая природа и характеристики сигналов АЭ	25
1.3. Акустическая эмиссия при пластической деформации металлов	31
1.4. Природа возникновения сигналов акустической эмиссии (механических упругих волн) при наводороживании	31
2. Приборы и оборудование	33
3. Задания	37
4. Порядок выполнения работы	37
5. Контрольные вопросы	38
Список литературы	38
Лабораторная работа № 3	39
1. Теоретическая часть. Скорость звука в металлах	39
1.1. Введение	39
1.2. Физические основы и закономерности распространения ультразвуковых волн в металлах	40
1.3. Теоретические представления о влиянии дислокаций на скорость звука в металлах (струнная теория дислокаций)	40
1.4. Влияние дефектов кристаллической структуры на скорость звука в металлах	43
1.5. Скорость звука и дефекты	44
1.6. Влияние пластической деформации на скорость звука	45
1.7. Деформационное старение насыщенных водородом металлов	45
1.8. Техника эксперимента	47
2. Технические характеристики прибора	48
3. Задание	49
4. Порядок выполнения работы	50
5. Контрольные вопросы	52
Список литературы	52

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Исследование динамики образования индуцированных водородом дефектов методом измерения логарифмического декремента затухания рэлеевской волны

Цель работы

Исследование влияния дефектов водородного происхождения на распространение поверхностной рэлеевской волны.

1. Теоретическая часть

1.1. Общие вопросы взаимодействия водорода с металлами

Проникновение и состояние водорода в металле

Водород в металлах может находиться в различных состояниях: в форме гидридов, в растворенном состоянии, захватываться дефектами, входить в состав гидроокиси $Me(OH)_n$ или воды, адсорбированной поверхностью. В обычных условиях металлы покрыты полимолекулярным слоем воды, адсорбированной из воздуха. При подготовке проб к анализу путем вакуумной откачки при 20 °С полностью удалить эту воду не удается. Она остается в микротрещинах, где сила сцепления воды с металлом за счет ван-дер-ваальсовой силы особенно велика. В пробах с развитой поверхностью содержание водорода возрастает на 1–3 порядка по сравнению с компактным образцом, несмотря на то, что некоторые металлы практически не образуют гидроокиси.

Водород во всех металлах ионизируется и диффундирует в виде протонов. Под влиянием даже сравнительно слабого постоянного электрического поля атомы водорода перемещаются в расплавленном металле в сторону катода. Поскольку размеры протонов в сотни тысяч раз меньше размеров атомов, то неудивительно, что диффузия водорода в металлах протекает чрезвычайно быстро. Следует отметить, что в процессах диффузии водорода в металлах основную роль играет объемная диффузия. Коэффициент диффузии водорода в монокристалле практически такой же величины, как и при диффузии в мелкокристаллическом образце.

Как только водород попадает в металлическое тело, он ионизируется под влиянием потенциального поля металла. Ионизация водорода может иметь различный характер и в предельных случаях заканчивается образованием или отрицательно заряженного иона H^- , или положительно заряженного иона – протона. В первом случае образуется химическое соединение с ионным типом связи, обладающее специфической

решеткой и не обнаруживающее металлических свойств (LiH, KH и т. д.). Во втором предельном случае атом водорода ионизируется до протона, который входит в решетку металла, не нарушая ее. При этом тип решетки и металлические свойства конденсированного тела сохраняются. Твердые растворы водорода в этом случае имеют настолько своеобразное строение, что, по мнению ряда исследователей, термин «твердый раствор» в общепринятом смысле вообще неприменим к системам металл-водород.

Способы насыщения металлов водородом

Самым старым и изученным является метод Сиверста, при котором насыщение металла водородом идет из газовой фазы при нагреве. Другим хорошо известным способом является электролитическое насыщение металлов водородом (катодное насыщение). В последнее время все чаще используется метод ионной имплантации водорода, поскольку он позволяет производить внедрение водорода независимо от свойств поверхности металла и растворимости на необходимую глубину. Известен также способ внедрения водорода из высокотемпературной плазмы газового разряда.

Насыщение из газовой фазы при нагревании

Титан. При нагреве титана в атмосфере водорода он поглощает H до установления равновесной концентрации, которая зависит от давления. Показано, что равновесное распределение водорода между газовой фазой и металлом достигается при концентрации, которая определяется соотношением: $[Hx]_n = K \sqrt{P_{H_2}}$, где $[Hx]_n$ – концентрация водорода в твердом растворе; P_n – давление водорода в газовой фазе; K – коэффициент пропорциональности. Скорость поглощения водорода становится значительной при температуре выше 300 °С и быстро увеличивается при дальнейшем повышении температуры. При этих температурах на поверхности титана образуется гидрид титана, после образования которого, поглощение водорода происходит с постоянной скоростью [1]. Скорость поглощения титаном водорода резко уменьшается (но не устраняется совершенно), если на поверхности имеется окисная пленка.

Сталь. При комнатной температуре и атмосферном давлении наводороживание из газовой среды практически не происходит. Повышение температуры вплоть до точки плавления при атмосферном давлении сравнительно мало повышает растворимость водорода: при одновременном повышении обоих этих факторов концентрация водорода, внедренного в сталь из газовой фазы, может стать весьма высокой [2].

Насыщение металлов водородом при электролизе

Титан. Необходимым условием наводороживания титана в водных средах является наличие процесса разряда ионов водорода. Наличие внешних или внутренних напряжений ускоряет наводороживание и может привести к появлению трещин и хрупкому разрушению металла.

Поглощение водорода при коррозии или катодной поляризации титана складывается из процесса нейтрализации ионов водорода до атомов с последующей диффузией части атомов водорода внутрь металла. Благодаря малой растворимости водорода при комнатной температуре (0,002 вес. %) [3] и низкому коэффициенту его диффузии ($D_{\alpha\text{Ti}} \approx 2 \times 10^{-11} \text{ см}^2 / \text{с}$) на поверхности титана в процессе коррозии или катодной поляризации возникает чисто гидридный слой – γ -фаза. Наличие гидридных слоев толщиной до 5–7 мкм, возникающих при длительном пребывании титана в кислотах, наблюдалось на титановых шлифах непосредственно в микроскоп. На кинетику поглощения водорода титаном существенно влияют также величина и форма микрозерна [4]. Титан, имеющий структуру, состоящую из вытянутых зерен, в несколько раз быстрее поглощает водород, чем титан, имеющий равноосную структуру.

Сталь. Процесс наводороживания стали при ее катодной поляризации в электролите (электролитическое наводороживание) аналогичен высокотемпературному наводороживанию, т. к. на поляризуемом металле выделяются ионы водорода, действие которых аналогично действию водорода, диссоциированного при высокой температуре и ионизированного на поверхности металла. Путем подбора концентрации электролита и плотности тока можно добиться такой концентрации ионов водорода на катоде, которая в отношении эффекта наводороживания эквивалентна давлению в тысячи атмосфер при комнатной температуре или очень высокой температуре при нормальном давлении. Однако необходимо иметь в виду, что электрическое поле способствует более энергичному внедрению водорода в решетку металла.

Наличие молекулярного водорода в микропустотах не препятствует поступлению новых атомов водорода в коллектор, т. к. их концентрация в данном коллекторе продолжает оставаться весьма незначительной. Если диффузия не прекращается, указанный процесс приводит к созданию в коллекторах громадных давлений, т. к. молекулы водорода не могут диффундировать обратно в решетку (размеры молекул водорода больше размера протона на пять порядков). Описанное явление называют поэтому «эффектом ненасыщаемости ловушек». Естественно, общее содержание водорода в металле в этом случае во много раз превы-

шает количество водорода, растворенного в решетке металла; оно определяется объемом микропустот, структурой металла, наличием и характером напряжений и деформаций материала и других факторов, которые будут более детально рассмотрены далее.

В микроскопическом масштабе распределение водорода также неравномерно. Наблюдается неравномерное распределение водорода внутри зерна стали. Повышенная концентрация водорода на периферии зерна [4] и в «межзеренном веществе» вызвана условиями кристаллизации стали и особенностями распределения субмикроскопических дефектов металла. Неравномерность распределения растворенного водорода (в микромасштабе) определяется распределением напряжений в металле. Особо большое значение приобретает это явление при нагружении детали и в процессе ее деформирования – при перераспределении напряжений и при развитии трещины. В субмикроскопическом масштабе также наблюдается неравномерное распределение растворенного водорода, он концентрируется вокруг элементарных дефектов решетки – дислокаций в виде облаков Коттрелла. Последние отличаются от атомарных облаков тем, что они состоят из протонов, которые могут молизоваться внутри дислокации. Эта особенность водорода играет определяющую роль в снижении пластичности стали, появлении водородной хрупкости и в других изменениях свойств стали, вызванных водородоживанием.

Взаимодействие водорода с титаном. Гидриды

Конечными продуктами взаимодействия водорода с титаном являются продукты переменного химического состава, представляющие собой так называемые фазы бертоллидного типа. Полагают [5], что гидриды титана обусловлены взаимодействием частично ионизированных атомов водорода с атомами металла.

Ионизированные атомы водорода образуют протонный газ, который, по-видимому, находится в динамическом равновесии с неионизированными атомами водорода.

Влияние водорода на физические свойства титана. Переход титана в хрупкое состояние при увеличении содержания водорода наиболее четко выявляется по величине ударной вязкости. Было установлено, что при понижении температуры испытания ударная вязкость чистого от водорода титана практически не меняется, однако уже небольшие добавки водорода при определенной температуре резко снижают вязкость металла. С увеличением содержания водорода титан переходит в хрупкое состояние при более высокой температуре.

С точки зрения механики прочности материалов охрупчивающее действие гидридов может быть истолковано следующим образом. Гидриды титана обладают определенной пластичностью, но имеют относительно низкое сопротивление отрыву. Если нормальные растягивающие напряжения в титане ниже сопротивления отрыву гидридов, влияние водорода на предел прочности не сказывается, что и наблюдается при растяжении гладких образцов. Если эти напряжения превышают сопротивление отрыву гидридов (под влиянием внешних факторов), то на месте гидридов образуются трещины, снижающие пластичность. Сопротивление отрыву при этом зависит от количества и длины пластинок гидридов.

Взаимодействие водорода со сталью

Водород способен растворяться в твердой стали и диффундировать в ее решетке только в виде протонов. Гидриды железа до сих пор не обнаружены и, очевидно, можно считать, что они не возникают при наводороживании стали. Поглощенный сталью водород может находиться в двух состояниях: ионизированном (протоны растворены в решетке) и молекулярном (заключен в коллекторах).

В распределении водорода, поглощенного сталью, важную роль играют дефекты её структуры, к которым относятся дефекты поликристаллического тела: а) микроскопические пустоты, щели; б) трещины, неметаллические включения, межзеренное вещество, а также ультрамикроскопические дефекты кристаллической решетки стали – вакансии, их скопления (коагуляции) и дислокации. Все указанные дефекты, если они замкнутые, играют роль коллекторов, в которых может собираться поглощенный сталью водород. Проникнув в решетку металла, протоны распространяются в ней и достигают поверхности раздела между решеткой металла и коллектором, а затем проникают внутрь коллектора и молекулируются в нем. Считается, что водород диффундирует в сталь транскристаллически по всей решетке; избирательность диффузии по дефектам решетки, а также по границам зерен обычно не учитывается в отличие от их роли при насыщении стали водородом [6]. Противоположный наводороживанию процесс (дегазация) зависит от диффузии и поглощения водорода сталью. При этом легко дегазируется водород, находящийся в решетке металла в виде протонов; водород, сегрегированный в виде молекул в замкнутых дефектах внутри твердого металла, являющихся коллекторами для него, почти не дегазируется. Растворимость водорода в стали очень низкая и по разным данным колеблется от 300 до 400 ppm.

Влияние водорода на свойства стали. Влияние водорода как легирующего элемента в стали пока еще точно не установлено, что объясняется малой растворимостью водорода, его высокой диффузионной способностью и возникновением дополнительных внутренних напряжений в металле.

Остаточные внутренние напряжения в металле, возникающие, например, в процессе его охлаждения, облегчают зарождение трещины вследствие возрастания неоднородной пластической деформации в микрообъемах металла. Концентрация напряжений на границах зерен может быть причиной возникновения межкристаллитных трещин [7].

Поэтому в последнее время многие исследователи объясняют влияние водорода на предел текучести и охрупчивание стали возникновением локализованной пластической деформации металла, связанной с выделением водорода в его микропустотах.

Водород, присутствующий, в стали, понижает ее усталостные свойства, облегчая возникновение трещин, ведущих к разрушению образца при испытаниях на длительную прочность, т. е. под влиянием длительной статической нагрузки.

1.2. Внутреннее трение в металлах

Теория внутреннего трения

Колебания, искусственно созданные в твердом теле, с течением времени затухают, упругая энергия колебаний рассеивается, превращаясь в тепловую энергию. Различные механизмы превращения упругой энергии в тепловую объединены общим названием – внутреннее трение.

Для простоты обсуждения и обозначения допустим, что поле напряжений в образце можно охарактеризовать одной, составляющей σ (случай одноосного напряжения). Тогда можно осматривать только одну составляющую деформации ε , соответствующую напряжению σ . Соответствующий модуль упругости, связывающий деформацию и напряжение, обозначим через M .

В качестве меры внутреннего трения могут быть выбраны различные величины. Например, за меру внутреннего трения можно выбрать энергию, рассеянную в единице объема за одну секунду, т. е. величину

$$\omega = \overline{\sigma \dot{\varepsilon}} \text{ Дж/с*см}^3. \quad (1)$$

Удобнее, однако, пользоваться безразмерными величинами. Наиболее часто употребляемой характеристикой внутреннего трения является величина

$$\phi = \Delta W / W, \quad (2)$$

где
$$\Delta W = \frac{2\pi}{\omega} \int \overline{\sigma \dot{\epsilon}} dv \quad (3)$$

энергия, рассеянная за один период по всему объему образца, а

$$W = \frac{1}{2} \int \sigma_0 \epsilon_0 dv \quad (4)$$

энергия колебаний всего образца, отвечающая амплитудным значениям напряжения и деформации.

Величину φ называют по-разному, чаще всего коэффициентом поглощения.

По аналогии с терминами, применяемыми в электротехнике, можно ввести так называемую механическую добротность Q системы, которую определим как умноженное на 2π отношение максимальной энергии, запасенной за один период, к энергии, рассеянной за период в том же объеме. Таким образом,

$$Q = 2\pi W / \Delta W. \quad (5)$$

Многие авторы пользуются для обозначения внутреннего трения величиной Q^{-1} , которая обратна добротности.

Коэффициент поглощения φ можно определить по развертке свободных затухающих колебаний образца изучаемого материала (см. рис. 1).

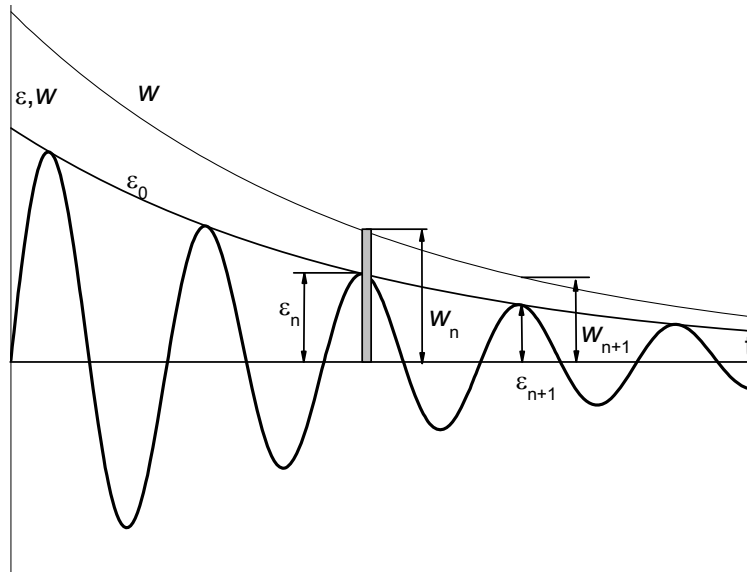


Рис. 1. Развертка затухающих колебаний стержня и соответствующая ей кривая рассеяния энергии

Между φ и δ существует простое соотношение:

$$\varphi = 2\delta, \quad (6)$$

где
$$\delta = \ln \frac{\epsilon_n}{\epsilon_{n+1}} - \text{логарифмический декремент колебаний.} \quad (7)$$

Оно справедливо для любых амплитуд деформации и не зависит от механизма рассеяния энергии.

Логарифмический декремент не зависит от амплитуды напряжения, когда упругая восстанавливающая сила пропорциональна перемещению конца стержня, а диссипативная сила, обуславливающая рассеяние энергии колебаний, пропорциональна первой степени скорости. В противном случае δ и φ зависят от амплитуды деформации, но соотношение $\varphi = 2\delta$ при этом не нарушается.

При рассеянии энергии колебаний возможен сдвиг по фазе между напряжением и деформацией; деформация отстает от напряжения на некоторый угол ψ . Угол сдвига фазы ψ является подходящей мерой внутреннего трения. Количество энергии, рассеянной за цикл, стремится к нулю, если ψ приближается к нулю.

Величина внутреннего трения может быть записана следующим образом

$$Q^{-1} = \frac{\Delta W}{2\pi W} \approx \operatorname{tg} \psi = \frac{\lambda \alpha}{\pi}, \quad (8)$$

где α – коэффициент затухания ультразвуковой волны, который выражается в неперах на 1 см (одному неперу соответствует ослабление амплитуды в e раз, для перехода к децибелам необходимо число неперов умножить на 8,686).

Имея в виду эту связь, можно сравнить между собой данные по внутреннему трению, полученные в различных экспериментах при различных частотах, где использованы разные меры внутреннего трения.

В действительности ослабление импульса вызывается не только поглощением, но и в значительной степени рассеянием на неоднородностях. Ослабление волн напряжения особенно велико в случае, если средний размер отдельных неоднородностей сравним с длиной волны λ . При этих условиях ослабление волн напряжения вызывается не столько за счет процессов релаксационного, гистерезисного или резонансного типа, сколько диффузным рассеянием волн напряжений на этих неоднородностях. Также следует всегда помнить, что связь $Q^{-1} = \frac{\Delta W}{2\pi W} \approx \operatorname{tg} \psi = \frac{\lambda \alpha}{\pi}$ нарушается при $\operatorname{tg} \psi > 0,1$ и она для большинства случаев будет зависеть от механизма рассеяния энергии.

Источники внутреннего трения

Внутреннее трение в металлах, особенно в чистых, очень чувствительно к холодной деформации. Даже при весьма осторожном, манипулировании с чистым отожженным монокристаллом его внутреннее тре-

ние может увеличиться в несколько раз. Резкие изменения способности рассеивать энергию происходят также в результате отжига. Эти факты свидетельствуют о том, что дислокации ответственны, по крайней мере, за часть внутреннего трения в металлах. Кроме того, облучение нейтронами или гамма-лучами значительно уменьшает внутреннее трение; это вполне естественно, если допустить, что точечные дефекты, образовавшиеся в результате облучения, диффундируют к дислокациям и затрудняют их движение. Атомы примесей также имеют тенденцию собираться около дислокаций; обнаружено, что внутреннее трение металлов с примесями обычно значительно меньше, чем внутреннее трение чистого материала. Известно, что дислокации свободно движутся только в своей плоскости.

В настоящее время имеется большое количество экспериментальных данных о явлениях рассеяния энергии в металлах, но интерпретация их весьма сложна, так как способы возникновения внутреннего трения весьма многочисленны. Поэтому в первую очередь укажем основные источники внутреннего трения в металлах, не связанные с дислокациями. Рассеяние энергии, являющееся следствием движения дислокаций, может быть связано с различными причинами, и выбор возможного механизма следует производить с осторожностью.

Эффект термоупругости. Деформация, возникающая в результате быстрого приложения напряжения к какому-либо элементу, сопровождается обычно изменением температуры. При гомогенном распределении напряжений в образце изменение температуры в каждой точке оказывается одинаковым, но если напряжение, как это часто бывает, не гомогенно, в материале возникнут температурные градиенты. В результате образуется тепловой поток, повысится энтропия и произойдет рассеяние энергии, являющееся причиной внутреннего трения.

В поликристаллическом материале температурный эффект также имеет место. Соседние зерна ориентированы неодинаково, вследствие чего приложенное напряжение в разных зернах вызывает различные изменения температуры. В результате через границы зерен устанавливаются тепловые потоки, являющиеся причиной внутреннего трения, величина которого является функцией размера зерна. Люке рассчитал затухание ультразвуковых волн вследствие термоупругого эффекта. Эксперименты в области мегагерцовых частот свидетельствуют о том, что затухание, связанное с потоком тепла между соседними зернами поликристаллического образца или между областями сжатия и растяжения, обычно маскируется рассеянием на границах зерен.

Вязкость границ зерен. Относительное движение зерен поликристаллического материала при сравнительно высоких температурах явля-

ется причиной рассеяния энергии на границах зерен и, как следствие этого, внутреннего трения. Рассеянная энергия пропорциональна произведению относительного перемещения соседних зерен на напряжение сдвига, вызывающее это перемещение: она мала при низких температурах, когда перемещение невелико, и при высоких температурах, при которых невелико напряжение сдвига, но имеет значительную величину при промежуточной температуре.

Упорядочение под действием напряжения. Характерно для твердых растворов внедрения в металлах с кубической объемноцентрированной кристаллической решеткой. Атомы, образующие твердые растворы внедрения, расположены в центре одного из ребер куба, т. е. в положении $[1/2, 0, 0]$; у них есть два ближайших соседа в направлении одной из осей куба, поэтому в этом направлении они вызывают наибольшие искажения. В отсутствие напряжения атомы внедрения в кристалле распределены беспорядочно, но после приложения растягивающего напряжения вызываемые ими искажения приводят к тому, что энергия атома внедрения в определенных положениях становится ниже. Вследствие этого происходит перераспределение атомов внедрения, в результате которого некоторые положения внедрения оказываются преимущественно занятыми. Процесс перераспределения приводит к увеличению внутреннего трения.

Дислокационное внутреннее трение

С дислокациями связан целый ряд релаксационных эффектов, проявляющихся в деформационных металлах и сплавах с достаточно высокой плотностью дислокаций.

Эти дефекты можно разделить на:

1. Вызываемые движением самих дислокаций по механизму образования и движения термических или геометрических перегибов (максимумы Бордони, Ниблея–Уилкса, ряд других дислокационных максимумов).
2. Обусловленные совместно дислокациями и собственными точечными дефектами (вакансиями, межузельными атомами) – максимумы Хасигути.
3. Вызываемые совместно растворенными внедренными атомами и дислокациями (релаксация Снука–Кестера, усиленный дислокациями максимум Снука).

В большинстве работ дислокационное внутреннее трение рассматривается на основе модели Гранато и Люке. Прямолинейная дислокация закреплена на концах так, что в ходе изменения внутреннего трения она

не отрывается от этих точек «сильного закрепления» – узлов дислокационной сетки (рис. 2).

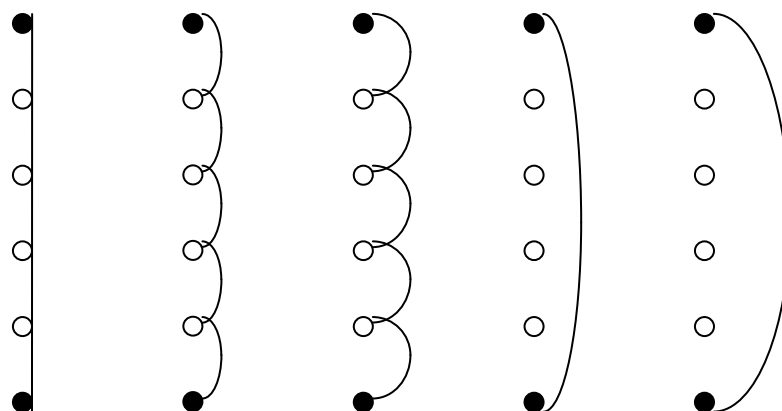


Рис. 2. Выгибание закрепленной дислокационной линии при увеличении приложенного напряжения

Между ними со средним шагом L_c расположены примесные атомы, от которых дислокация отрывается при достаточно высоких значениях ε_d и на которых дислокационная линия закрепляется при уменьшении напряжения. Отрыв и закрепление приводит к разному ходу кривой $\sigma - \varepsilon_d$ (ε_d – дислокационная упругая деформация, пропорциональная площади, «заметаемой» дислокацией при выгибании) при увеличении и уменьшении σ , т. е. к гистерезису и гистерезисным потерям.

Критерием применимости теории Гранато – Люке для описания амплитудной зависимости Q_m^{-1} является выполнение прямолинейной зависимости в координатах Гранато – Люке: $\ln(Q^{-1}\varepsilon_d) - 1/\varepsilon_d$. По углу наклона в этих координатах определяют изменение L_c , т. е. числа точек закрепления дислокации.

Теория Гранато–Люкке применима для растворов низкой концентрации со слабым закреплением дислокаций примесями в области относительно низких температур, при которых не существенно термоактивируемое освобождение дислокаций от примесных атомов. Экспериментальная проверка показала применимость теории для ряда металлов с г.ц.к. и гексагональной решетками.

В модификациях теории сделаны попытки учесть: отрыв от точек закрепления не только за счет приложенного напряжения, но и термической активации; перераспределение точек закрепления вдоль линии дислокации под действием приложенных напряжений; реальный механизм движения дислокаций путем образования и движения перегибов и

др. Однако все эти модификации не смогли существенно расширить область применения теории Гранато–Люкке.

Интересную информацию о дислокационной структуре может дать не зависящее от амплитуды внутреннее трение (при $\varepsilon_A < \varepsilon_{kp}'$), Фоновое внутреннее трение вызывается торможением колеблющихся дислокаций в кристаллической решетке и в значительной степени определяется подвижностью дислокаций при перемещении их на очень малые расстояния. Оно зависит от частоты колебаний, и при увеличении частоты проходит через максимум.

1.3. Поверхностная рэлеевская волна

Теоретическое описание волны Рэлея

Волны Рэлея являются основным типом звуковых поверхностных волн, т. е. наиболее распространенными, хорошо изученными и максимально используемыми.

Уравнения движения записываются в следующей форме:

$$\rho \frac{\partial^2 U_l}{\partial t^2} - (\lambda + 2\mu)\Delta U_l = 0, \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial^2 U_t}{\partial t^2} - \mu\Delta U_t = 0 \quad (10)$$

Здесь $U = U_l + U_t$ – вектор смещения частиц среды; ρ – плотность; λ и μ – упругие постоянные (параметры Ламе) среды; Δ – оператор Лапласа.

Первое из них описывает распространение продольных, второе – поперечных волн.

Продольные волны – безвихревые ($\text{rot}U_l = 0$), а в поперечных отсутствует объемное сжатие и расширение ($\text{div}U_t = 0$).

Рэлеевская волна состоит из двух волн – продольной и поперечной, которые распространяются вдоль границы полупространства с одинаковыми скоростями и затухают с глубиной по законам $\exp(-\sqrt{k_R^2 - k_l^2}z)$ (продольная волна) и $\exp(-\sqrt{k_R^2 - k_t^2}z)$ (поперечная волна). Здесь $k_l = \omega\sqrt{\rho/(\lambda + 2\mu)}$, $k_t = \omega\sqrt{\rho/\mu}$ – волновые числа соответственно продольных и поперечных волн. На границе ($z = 0$) эти волны взаимно компенсируют создаваемые ими напряжения.

Распределение энергии в рэлеевской волне по глубине. Плотность упругой энергии в рэлеевской волне складывается из плотностей кинетической и потенциальной энергий. Для всех твердых сред плотность энер-

гии сначала быстро убывает при удалении от свободной поверхности, затем это убывание замедляется (при коэффициенте Пуассона $\nu < 0,1$) или сменяется максимумом (при $\nu > 0,1$), после чего наступает плавный экспоненциальный спад плотности энергии с глубиной. Такой характер зависимости можно интерпретировать следующим образом. Вблизи свободной поверхности плотность кинетической энергии (пропорциональная квадратам амплитуд смещений в волне) максимальна и быстро спадает с глубиной, приводя к спаду и плотность суммарной энергии. Плотность потенциальной энергии, напротив, возрастает при удалении от поверхности и имеет максимум на глубине $\sim 0,2\lambda_R$ (где максимальны амплитуды деформаций в волне). Это и обуславливает наличие максимума у плотности суммарной энергии.

Кривые смещений, напряжений и плотности энергии в рэлеевской волне иллюстрируют, что рэлеевская волна локализована в поверхностном слое толщиной $\lambda_R - 2\lambda_R$. Длина волны λ – основная пространственная характеристика любой волны. Равенство указанной глубины локализации величине порядка λ демонстрирует, что рэлеевская волна является типично поверхностной.

Затухание рэлеевских волн. Поскольку рэлеевские волны не проникают в глубь твердого тела, их амплитуда вдали от источника убывает с расстоянием R пропорционально $(k_R R)^{-1/2}$ вследствие расхождения волнового пучка, излучаемого источником. Убыванию амплитуды рэлеевских волн вследствие поглощения и рассеяния упругой энергии присущи особенности, характерные для продольных и поперечных волн, поскольку рэлеевская волна является комбинацией этих волн. Поглощение и рассеяние рэлеевских волн на ультразвуковых частотах исследовано довольно слабо. Затухание же объемных (продольных и поперечных) ультразвуковых волн изучено весьма подробно. Так, была сделана попытка установить связь между затуханием поверхностных и объемных волн: получена формула, связывающая коэффициенты затухания указанных волн. Таким образом, коэффициент затухания рэлеевской волны на длине волны есть линейная комбинация из аналогичных коэффициентов затухания продольных и поперечных волн:

$$\gamma = C\alpha + (1 - C)\beta. \quad (11)$$

Величина C зависит только от коэффициента Пуассона ν . Расчеты показали, что для всех материалов «удельный вес» β в расчетной формуле (3) больше удельного веса α , т. е. при примерно одинаковых значениях величин α и β коэффициент γ затухания рэлеевских волн определяется в основном коэффициентом затухания поперечных волн β (например, для стали $\gamma = 0.89\beta + 0.11\alpha$).

При наличии на поверхности, вдоль которой распространяется рэлеевская волна, всякого рода дефектов (трещины, царапины, неровности и пр.) возникают рассеянная (отраженная) рэлеевская волна, а также продольные и поперечные волны, распространяющиеся в глубь среды. Исходная рэлеевская волна будет вследствие этих рассеяний ослабляться. Вопрос о влиянии дефектов поверхности на распространение рэлеевских волн очень важен для практического использования этих волн, особенно применительно к ультразвуковой поверхностной дефектоскопии.

2. Методика измерения затухания рэлеевской волны

2.1. Методика эксперимента

Одним из методов исследования дефектности металлов является метод, основанный на измерении затухания рэлеевской волны. В данном методе измеряются характеристики распространения поверхностной акустической рэлеевской волны. Дело в том, что скорость, затухание, и структура рэлеевской волны неразрывно связаны с механическими, термическими и прочими характеристиками материала, в котором она распространяется. Поэтому по скорости и поглощению рэлеевской волны можно получить информацию о состоянии поверхностного слоя исследуемого материала. В настоящей работе в качестве датчика и излучателя используются пьезопреобразователи с резонансной частотой 200 кГц. В этом частотном диапазоне на распространение акустических колебаний оказывает влияние дислокационное внутренне трение, как следствие этого появляется возможность судить о состоянии дислокационной структуры материала, измеряя параметры распространения звуковой волны. Применение рэлеевских волн в различных измерительных устройствах вызвано особенностями данных волн:

- 1) возможностью «вывести» акустический сигнал из любой точки поверхности образца, по которому распространяется волна;
- 2) относительно большой концентрацией энергии в волне вследствие малости слоя локализации волны.

Поэтому рэлеевские волны широко используются в чисто физических экспериментах как инструмент для изучения свойств поверхности и поверхностного слоя твердого тела.

Суть метода, основанного на измерении затухания рэлеевской волны, состоит в следующем. В исследуемом слое образца возбуждается поверхностная акустическая рэлеевская волна, которая, распространяясь на поверхности образца, рассеивается на различных дефектах, теряя при этом свою энергию. С помощью пьезодатчика, закрепленного на поверхности образца на фиксированном расстоянии от излучателя, ана-

лизатором акустических сигналов регистрируется относительная амплитуда рэлеевской волны. Проведя измерения амплитуды в нескольких точках образца, можно определить величину затухания рэлеевской волны на единицу длины, а задаваясь скоростью распространения волны можно определить логарифмический декремент затухания.

В данной работе для возбуждения рэлеевской волны используется так называемый метод «клина» [8], основанный на преобразовании продольных волн в рэлеевские.

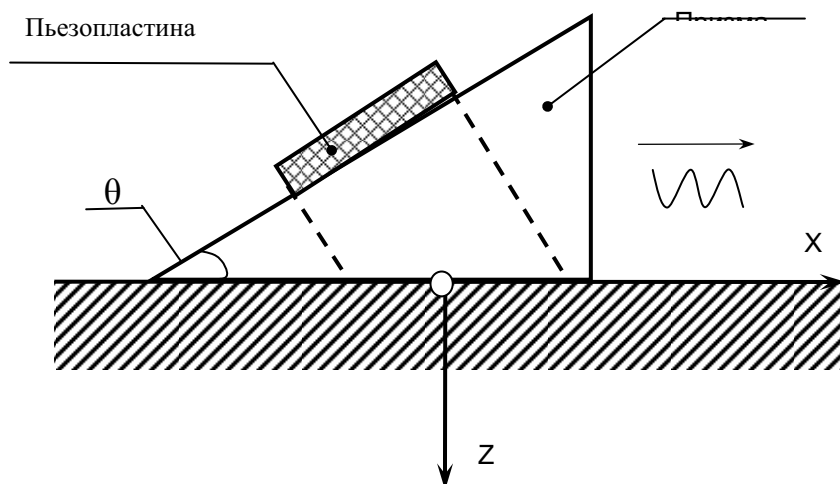


Рис. 3. Схема метода «клина» для возбуждения рэлеевской волны

В этом методе (рис. 3) пластмассовая призма вдоль одной своей грани имеет акустический контакт с поверхностью твердого тела. На наклонной грани призмы располагается пьезопластинка, излучающая плоскую продольную волну, которая падает под углом θ на границу твердого тела с призмой. Угол θ выбирается из условия оптимального возбуждения $\sin \theta = c_{\text{кл}}/c$, где $c_{\text{кл}}$ – скорость продольных волн в материале клина; c – скорость рэлеевских волн в образце (ясно, что материал призмы должен быть таким, что $c_{\text{кл}} < c$, поэтому призма делается обычно из пластмассы). При этом на границе твердого тела и призмы создается периодическое возмущение с пространственным периодом, равным длине рэлеевской волны в образце. Поскольку $\theta = \arcsin(c_{\text{кл}}/c)$ больше угла полного внутреннего отражения, как для продольной, так и для поперечной волн, прошедшие в образец волны являются неоднородными и возмущение затухает с глубиной. Это возмущение возбуждает рэлеевскую волну, распространяющуюся по поверхности образца в направлении положительной оси x . Наилучшее возбуждение получается, когда проекция ребра призмы на наклонную грань совпадает с передним краем пьезопластинки, как показано на рисунке 3. В методе «клина» воз-

буждается практически только одна рэлеевская волна, уровень возбуждаемых объемных волн лежит на 20–30 дБ ниже.

3. Экспериментальная установка

Схема установки для определения логарифмического декремента колебаний рэлеевской волны приведена на рис. 4. Генератор импульсов выдает импульсы фиксированной длительности и амплитуды на излучатель, который возбуждает рэлеевскую волну в образце. Возбужденная волна регистрируется датчиком со встроенным предусилителем, параметры полученного сигнала регистрируются анализатором акустического сигнала, форма сигнала отображается на осциллографе, который работает синхронно с генератором импульсов. Анализатор акустического сигнала позволяет измерить такие параметры как амплитуду импульса, длительность импульса, энергию импульса, количество периодов колебаний в импульсе и т. д.

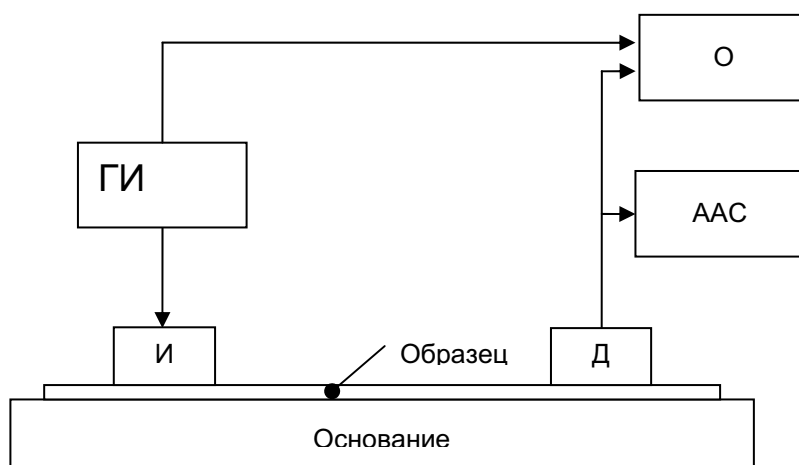


Рис. 4. Схема установки для определения логарифмического декремента колебаний: О – осциллограф, ААС – анализатор акустического сигнала, Д – датчик, И – излучатель, ГИ – генератор импульсов

Схема установки для исследования динамики дефектообразования в процессе наводораживания приведена на рис. 5. Здесь на образце размещается электролитическая ячейка, которая позволяет проводить наводораживание одновременно с измерением затухания акустического сигнала в образце.

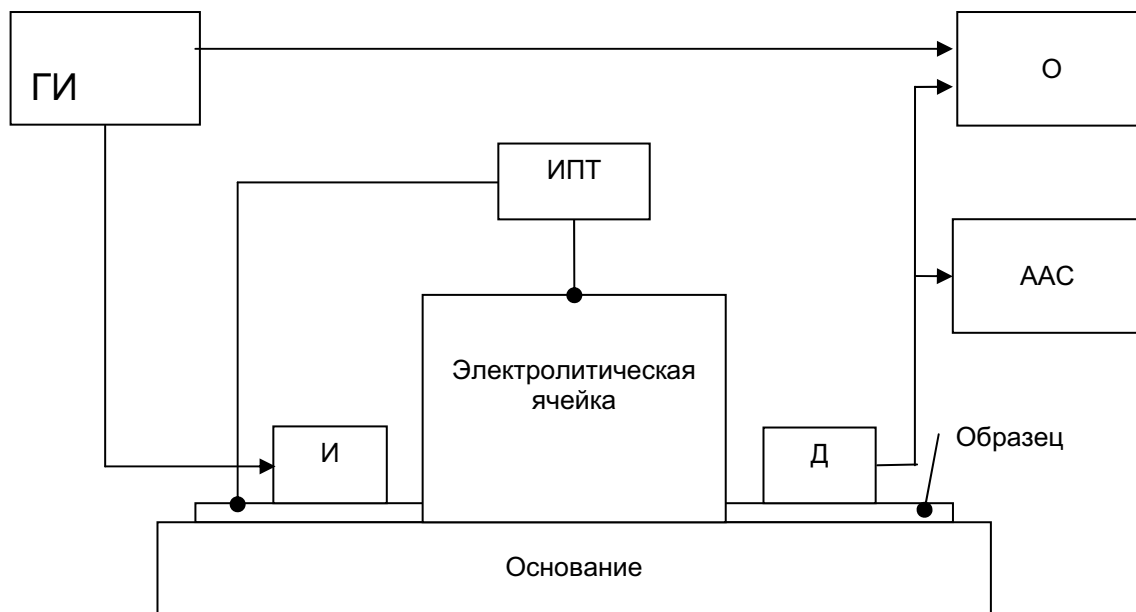


Рис. 5. Схема установки для определения логарифмического декремента колебаний:

*О – осциллограф, ААС – анализатор акустического сигнала,
Д – датчик, И – излучатель, ГИ – генератор импульсов,
ИПТ – источник постоянного тока*

4. Порядок выполнения работы

4.1. Подготовка образцов исследуемого материала

В лабораторной работе исследуются образцы: 1) из титана – готовятся образцы α – титана ВТ1-0 (состав (ат. %): Fe < 0,18, Si < 0,1; С < 0,07; О < 0,12; N < 0,04; Н < 0,01) размером 90 × 8 × 2 мм, образцы вырезаются из 2 мм листового титана, производятся операции шлифования, полирования и отжига при температуре 700 °С в течение одного часа с последующим охлаждением в печи; 2) из нержавеющей стали – готовятся образцы из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, (состав 1,2 % С, 18 % Cr, 10 % Ni, менее 1 % Ti) размером 90 × 8 × 2 мм, производятся операции шлифования, полирования, для снятия внутренних напряжений и обезгаживания образцы отжигаются в вакууме при температуре 1000 °С в течение одного час с последующим охлаждением в печи.

4.2. Порядок подготовки установки и измерение логарифмического декремента колебаний

1. Включите питание компьютера, дождитесь загрузки операционной системы и запустите программу «SEK-Mashine».
2. Включите генератор, осциллограф.
3. Установите исследуемый образец, поместите на него излучатель акустического сигнала, установите в необходимом месте датчик акустического сигнала (на расстоянии 20, 30, 40, 50, 60 мм от установленного на образце излучателя).
4. Для излучателя с резонансной частотой 200 кГц на генераторе установите параметры генерируемых импульсов: амплитуда импульса $A_{И} = 5$ В, длительность импульса задается как половина периода для резонансной частоты излучателя $t_{И} = 2,5$ мкс, период повторения импульсов $T = 1$ сек. Переключите генератор в режим генерации импульсов.
5. Проконтролируйте на осциллографе наличие сигнала на датчике, и оцените его амплитуду.
6. В программе «SEK-Mashine», в соответствии с руководством пользователя, установите порог дискриминации сигнала равный одной трети от амплитуды сигнала, зафиксированной на осциллографе.
7. Задайте имя файла, в котором будут сохраняться результаты измерений.
8. В программе «SEK-Mashine» запустите измерения в режиме вывода данных на экран, проконтролируйте параметры регистрируемого сигнала и далее переключитесь в режим записи результатов измерений. Через 100 секунд выключите запись результатов измерений.
9. Пункты 3–8 повторите для всех 5 положений датчика.
10. Для обработки полученных данных воспользуйтесь пакетом программ Excell или Origin. Для каждой полученной серии измерений значения энергии акустического сигнала рассчитайте среднее значение и доверительный интервал.
11. Постройте график зависимости логарифма энергии акустического сигнала от расстояния между датчиком и излучателем, аппроксимируйте экспериментальную зависимость прямой линией и по наклону прямой определите коэффициент затухания и логарифмический декремент колебаний.

4.3. Порядок подготовки установки к измерениям изменения коэффициента затухания при наводороживании

1. В соответствии с пунктами 1–8 подготовьте установку к измерениям. Образец устанавливается в специальную ячейку для измерения коэффициента затухания в процессе электролитического наводороживания.
2. Подсоедините минус источника питания к образцу (который является катодом в электролитической ячейке), плюс источника питания к аноду. Переключите источник питания в режим стабилизации тока, величину тока задать равной 0,5 А.
3. Налейте в ячейку электролит, и включите источник тока.
4. Измерения проводятся каждые пять минут в течение часа после начала наводороживания.
5. По окончании измерений выключите источник питания, вылейте электролит из ячейки, промойте ее проточной водой.
6. Каждое измерение обрабатывается соответственно пункту 10.
7. Постройте график зависимости относительной энергии акустического сигнала от времени измерения, назовите причины и механизмы изменения энергии регистрируемого акустического сигнала, обоснуйте их.

5. Контрольные вопросы

1. В каком состоянии может находиться растворенный в металле водород, какие связи он образует?
2. Какие существуют способы насыщения металлов водородом?
3. Каково влияние растворенного водорода на механические свойства металлов, опишите взаимодействие внедренного водорода с дислокационной структурой металлов.
4. Какие физические величины можно принять за меру внутреннего трения, как они определяются, в каких единицах измеряются?
5. Опишите источники внутреннего трения.
6. Опишите модель дислокационного внутреннего трения Гранато-Люке.
7. Как объяснить влияние растворенного в металле водорода на коэффициент затухания колебаний?
8. Какие акустические колебания могут возбуждаться в твердом теле?
9. Что такое рэлеевская акустическая волна, ее математическое описание, область распространения рэлеевской волны в материале.
10. Какой способ возбуждения рэлеевской волны используется в данной работе?

Список литературы

1. Чернов И.П., Черданцев Ю.П., Тюрин Ю.И. Методы исследования систем металл-водород. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 270 с.
2. Поволоцкий Д.Я., Морозов А.Н. Водород и флокены в стали. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 183 с.
3. Потак Я.М. Хрупкие разрушения стали и стальных изделий. – М.: Оборонгиз, 1955. – 298 с.
4. Малахов А.И., Жуков А.П.. Водородная хрупкость металлов. – М.: Metallurgizdat, 1976. – 238 с.
5. Шаповалов В.И. Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов. – М.: Metallurgiya, 1982. – 232 с.
6. Галактионова Н.А.. Водород в металлах. – М.: Metallurgizdat, 1958. – 267 с.
7. Корпенко Г.В., Крипякевич Р.И. Влияние водорода на свойства стали. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 200 с.
8. Швед М.М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. – Киев: Наукова думка, 1985. – 120 с.
9. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. – 288 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Акустическая эмиссия при электролитическом насыщении металлов водородом

Цель работы

Исследование выхода сигналов акустической эмиссии при электролитическом насыщении металлического образца водородом.

1. Теоретическая часть. Акустическая эмиссия в твердых телах

1.1. Введение

Акустическая эмиссия представляет собой излучение упругих волн, возникающих в процессе разрушения или перестройки внутренней структуры твердого тела. Акустическая эмиссия сопровождает все стадии разрушения или перестройки структуры материала и не регистрируется только в отдельных случаях, например, при микропластической деформации в повторных нагружениях (эффект Кайзера). Хорошо известно, что параметры сигналов акустической эмиссии связаны с характеристиками протекающих в твердом теле процессов и механическими свойствами этих материалов. Это позволяет по параметрам акустической эмиссии определять характеристики физических процессов, проходящих в материале. Эти сигналы появляются при воздействии на исследуемый объект внешней силы, приводящей к его пластической деформации или разрушению. В этом заключается принципиальная разница между акустической эмиссией и применением иных акустических методов контроля (измерение декремента затухания и дисперсии, измерения скорости распространения упругих волн и акустического ЯМР) в которых первичное возбуждение не должно приводить к необратимым последствиям. Обычные акустические методы широко используются для изучения накопления дефектов при пластической деформации, исследовании релаксационных явлений и других необратимых процессов, но при этом регистрируется изменение параметров (функции отклика) первичного сигнала, не оказывающего влияние на эти процессы. В последнее время методы акустической эмиссии все чаще используются для изучения динамики дефектообразования в металлических конструкциях содержащих примеси водорода. В первую очередь, это связано с тем, что водород существенно меняет механические характеристики материала, при этом, как будет показано ниже, сигналы АЭ значительно меняют свои параметры (причем, чаще всего, в сторону увеличения интенсивности этих сигналов).

Экспериментальные методики измерения сигналов акустической эмиссии при наиболее часто встречающихся в аналитической практике видах воздействия на материалы (в основном конструкционные) включают:

- а) растяжение, сжатие, циклическое нагружение;
- б) облучение поверхности материала пучками ионизирующего излучения;
- в) термическое воздействие, в том числе, облучение лазерным пучком, термоциклирование;
- г) электрохимическое (при катодном или анодном потенциале) и химическое (растворение, окисление, коррозия) действие активных веществ на поверхность исследуемых материалов;
- е) комплексное действие нескольких видов воздействия при исследовании сложных технологических процессов (сварка).

В исследованиях используется два способа передачи колебаний от поверхности образца к датчику сигналов АЭ (преобразователю энергии) – контактная и бесконтактная. В первом случае используются пьезопреобразователи, во втором – интерференционные лазерные методики передачи колебаний или методики мессбауровской спектроскопии, использующие колебания гамма-источника вместе с исследуемым объектом. В каждом из рассмотренных случаев, водородные дефекты играют заметную роль в формировании параметров сигналов АЭ.

1.2. Физическая природа и характеристики сигналов АЭ

Известно, что регистрируемые после некоторого воздействия на металлические конструкции сигналы АЭ производит не сам движущийся в решетке водород, а возникающие в результате механических нагрузок дефекты и комплексы дефектов, в образовании которых водород играет существенную роль. Поскольку реальный материал не является однородным, возникающие в нем локальные механические напряжения могут намного превышать средние значения, что приводит к образованию плоскостей скольжения до того, как процесс разрушения охватывает весь образец. Вследствие этого возникают локальные динамические явления, такие, как движение дислокаций, внутризеренное скольжение и распространение трещин. Область деформации, через релаксацию, как правило, частично снижающую напряжения, переходит в новое состояние равновесия, и поскольку переход носит импульсный характер, возникает колебательный процесс, охватывающий зону перераспределения напряжений. Форма распространяющейся волны напряжений зависит от освобождающейся энергии (это функция таких параметров, как размер зоны движения, локальное поле напряжений до начала процесса, по-

верхностная энергия и упругие свойства материала) и акустических свойств импульсивно разгружающейся зоны. Если длина возникающих упругих волн или величина зоны движения сравнимы по величине с размерами тела, колебаниям подвергается тело как целое либо его макроскопическая часть. Частотный спектр возникающих акустических сигналов в значительной степени зависит от геометрии и механических характеристик образца и имеет характерные пики на частотах, совпадающих с собственными частотами системы образец – датчик [28]. Многочисленными исследованиями установлено, что акустическая эмиссия проявляется в виде:

- а) «непрерывной эмиссии» – непрерывно следующих одна за другой всплеск (шума) малой амплитуды с широким частотным спектром;
- б) эмиссии взрывного типа – импульсов сравнительно большой амплитуды с интенсивной низкочастотной составляющей спектра.

Непрерывная эмиссия связывается большинством исследователей с пластической деформацией металлов. Двойникование, переориентация зерен, мартенситные превращения, дислокации являются причиной эмиссии этого типа. Установлено, что эмиссия, возникающая в начале пластической деформации, достигает максимальной скорости при пластическом течении материала. Интенсивность эмиссии (количество сигналов в единицу времени) зависит от скорости деформации, возрастая с ее увеличением. Минимальный сигнал, который может быть зарегистрирован, есть результат события, включающего движение 5–150 дислокаций. Чем больше анизотропия структуры, тем выше амплитуда сигналов непрерывной эмиссии.

Материалы, подобные урану, бериллию, олову, с ограниченными системами скольжения, которые проявляют наряду с деформацией скольжения двойникование, обычно обнаруживают эмиссию с большей амплитудой, чем ОЦК- и ГЦК-металлы. Уровень сигнала в этом случае примерно в 50 раз превышает уровень сигнала в отожженных стальных образцах. Хотя двойникование наиболее легко определимо, однако оно не является единственным источником освобождения упругой энергии в твердом теле, приводящего к возникновению волн эмиссии. Во всех случаях, когда имеет место перемещение дислокаций со значительными скоростями вблизи поверхности кристалла, наблюдаются звуковые импульсы. Анализ этих импульсов обнаруживает корреляцию между характером сигналов и скоростями перемещения дислокаций вблизи поверхности. Наличие такой корреляции, свидетельствует о том, что наблюдается излучательная часть поля движущейся дислокации. Наиболее

вероятным дислокационным источником эмиссии считают скользящие дислокации, которые перемещаются по пересекающимся плоскостям скольжения. Возможны также акустические явления при освобождении дислокационных скоплений перед препятствиями, коалесценции, аннигиляции и выходе дислокаций на поверхность образца или отдельного кристалла.

Столкновение и последующая аннигиляция дислокаций противоположного знака сопровождаются излучением звуковых импульсов. Это излучение состоит из двух частей. Первая обусловлена нестационарным характером движения дислокаций, и ее интенсивность определяется величиной ускорения в моменты времени, предшествующие столкновению. Вторая часть представляет собой звуковой импульс, возникающий в момент столкновения. Амплитуда этого импульса зависит от значения относительной скорости дислокаций. Как правило, более интенсивная акустическая эмиссия проявляется в прочных хрупких материалах, обладающих более высокими энергиями, связанными с дислокационными скоплениями и отрывам их от точек закрепления. Акустические сигналы, излучаемые хрупкими материалами при пластическом течении, имеют характер более редких импульсов большей амплитуды, чем у более мягких материалов. Это позволяет с помощью акустической эмиссии обнаруживать развивающееся охрупчивание, например, при деформационном старении, а также радиационное охрупчивание. Однородность материала существенно влияет на акустические эффекты в материале. Присутствие включений, второй фазы или комбинация различных материалов может привести к существенным различиям по сравнению с однофазным материалом.

Непрерывная акустическая эмиссия, чаще всего, используется для: определения уровня напряжений, ранее перенесенных материалом, и остаточных напряжений; изучения влияния термообработки и других видов поверхностной обработки на структуру материал; обнаружения фазовых превращений; исследования релаксации напряжений и нестационарной ползучести материалов. Не исключено применение непрерывной акустической эмиссии для решения других исследовательских задач. Например, окисный поверхностный слой при нагружении образца может производить шум, сходный с акустической эмиссией, наблюдаемой при пластической деформации основного материала. Отсюда следует возможность изучения прочности поверхностных защитных слоев – оксидных и т. п. пленок естественного и искусственного происхождения.

Частотный спектр сигналов непрерывной акустической эмиссии весьма широк. Отмечались составляющие непрерывной эмиссии с частотами до 30 МГц. Нижняя граница спектра трудно поддается опреде-

лению из-за вибраций и низкочастотного шума испытательных установок. Частота максимума излучения при пластической деформации изменяется в процессе деформации. Максимальная частота излучения достигается при достижении предела текучести σ_t , затем наблюдается сдвиг максимума спектра в область более низких частот. Обычно для исследования непрерывной эмиссии выбирается частотный интервал, по возможности свободный от внешних акустических помех и простирающийся от единиц килогерц до 2–3 МГц.

Эмиссия взрывного типа характеризуется большой амплитудой (на 10–14 порядков большей энергией вспышки, чем непрерывная эмиссия) и сравнительно низкочастотным спектром. Взрывная эмиссия сопровождает процессы, связанные с макроскопическими дефектами, зарождением и распространением трещин, и поэтому позволяет прогнозировать разрушение конструкций. Сигналы эмиссии взрывного типа аperiodичны по своему происхождению, однако, по мере распространения в объекте трансформируются, приобретая осциллирующий характер.

Взрывная эмиссия по-разному проявляется в тех или иных материалах. Она различна для гладких и надрезанных, тонких и массивных образцов, поэтому распространять результаты, полученные на образцах и моделях, на случай реальных конструкций следует с большой осторожностью. По-видимому, такое различие связано с большей величиной трехосных напряжений в более массивных элементах. Важную роль играет кристаллическая структура материала, изменяющая амплитуду эмиссии в некоторых случаях на порядок величины. Предыстория образца – нагружался ли он предварительно, находится в литом или ковном состоянии, является ли он двойной структурой или смесью различных материалов – эти и многие другие факторы определяют необходимую чувствительность аппаратуры, оптимальную скорость деформации и соответствующую интерпретацию полученных результатов.

Во многих случаях, когда высокопрочные материалы обнаруживают острые усталостные трещины, трудно различить сигналы, обусловленные ростом пластической зоны, и сигналы, связанные с малыми движениями трещины. Оба процесса могут развиваться скачками, причем микротрещины, возникающие из дислокационных скоплений, малы (менее 0,1 мкм), так что происходит по степенный переход от непрерывной эмиссии к взрывной.

Частотный спектр взрывной эмиссии имеет более интенсивные низкочастотные составляющие, чем у непрерывной эмиссии. Однако регистрация их обычно затруднена из-за окружающих акустических шумов. Поэтому для наблюдения взрывной эмиссии обычно определяют «частотное

окно», в котором отчетливо проявляются высокочастотные составляющие взрывной эмиссии. Для углеродистой стали, например, вязкому разрушению соответствует максимум излучения в области 40–50 кГц, при хрупком разрушении частоты составляют 200–300 кГц и более.

Характеристики сигналов АЭ

Основными характеристиками сигналов АЭ являются: количество сигналов АЭ в секунду; пиковая амплитуда импульса; энергетические характеристики сигнала (например, площадь под пиком сигнала АЭ); характеристики формы импульса (длительность импульса, время нарастания и спада амплитуды и др.). Длительность импульсов при акустической эмиссии находится в диапазоне 10^{-8} – 10^{-4} с; энергия отдельных импульсов 10^{-9} – 10^{-5} Дж. Смещение колебаний поверхности образца за счет АЭ составляет от 10^{-14} до 10^{-7} м. Частотный диапазон АЭ простирается от области слышимости до сотен мегагерц.

Получаемые в ходе измерений значения параметров АЭ определяются свойствами испытуемого объекта (образца, конструкции), внешними условиями (температура, напряжение) и характеристиками регистрирующей аппаратуры.

Амплитуда всплесков акустической эмиссии также является лишь некоторой относительной характеристикой, поскольку сильно зависит от свойств регистрирующей системы, установки датчиков и т. п. Для описания амплитудных зависимостей эмиссии взрывного типа обычно используют величину, называемую суммой амплитуд ΣA и получаемую простым суммированием амплитуд импульсов, зарегистрированных за время наблюдения. Ввиду трудности ее воспроизводимости эта величина используется только при лабораторных исследованиях с фиксированными условиями экспериментов, обычно при изучении усталостных явлений. Тем не менее, установленные в подобных исследованиях зависимости достаточно интересно. Найдена линейная связь между суммой амплитуд и увеличением длины трещины, отнесенными к одному циклу усталостных испытаний, и установлено количественное соотношение, справедливое для широкого круга материалов:

$$\Delta A \approx (\Sigma A)^2 E / K^2,$$

где ΔA – скачкообразное увеличение площади трещины; ΣA – сумма амплитуд; E – модуль упругости; K – коэффициент концентрации приложенных напряжений. Это же соотношение справедливо для медленного роста трещин, обусловленного коррозионным растрескиванием. Таким образом, акустическая эмиссия может быть использована для количественных измерений роста трещины при постоянной или увеличивающейся испытательной нагрузке.

Количество импульсов и связанная с ним интенсивность акустической эмиссии может быть непосредственно связана со скоростью распространения трещины, причем могут быть определены связи между интенсивностью эмиссии и критериями разрушения, не зависящие от материала и конфигурации образца. Установлено, например, что достаточно устойчива статистическая связь между интенсивностью эмиссии и величиной растягивающей нагрузки, выраженной в долях % от разрушающей. Эта связь сохраняется при весьма значительных изменениях термообработки материала, толщины и глубины надреза образца. Для исследованных образцов и материалов (сплавы титана, алюминия, слаболегированная сталь ДбаС) характерно резкое возрастание интенсивности эмиссии по мере приближения нагрузки к разрушающей, наиболее отчетливо проявляющееся при 70–99% предела прочности. Наиболее универсальна, по-видимому, связь между общим количеством импульсов эмиссии и коэффициентом концентрации напряжений K . Установлено, что зависимость между этими двумя характеристиками дается соотношением

$$N = N_0 K^m,$$

где N_0 – константа, зависящая от материала и чувствительности регистрирующей аппаратуры. Показатель степени m , по теоретическим оценкам, должен равняться четырем, однако наилучшее совпадение с экспериментальными данными имеет место при $m = 5–9$. Для идентичных условий эксперимента статистический разброс результатов относительно зависимости, константы в которой определяются по большому числу экспериментов, невелик. Это позволяет прогнозировать разрушение конструкций в процессе эксплуатации посредством счета числа импульсов и определения изменения интенсивности эмиссии во времени при использовании соответствующих систем обработки информации и вычислительной техники. С помощью последних можно определить степень близости текущего значения K к критическому коэффициенту концентрации напряжений K_c , по достижении, которого начинается катастрофическое разрушение, и своевременно подать сигнал автоматической аварийной остановки.

Исследование спектров зарегистрированных сигналов указывает, что по мере роста упругой энергии перед разрушением происходит расширение спектра в высокочастотную область, причем спектр занимает полосу от 0 до 1 МГц. Спектр характеризуется широким максимумом в области частот 200–250 кГц, который несколько смещается при увеличении запасенной упругой энергии в область более высоких частот.

1.3. Акустическая эмиссия при пластической деформации металлов

Выше были отмечены основные закономерности, связывающие параметры акустической эмиссии с характером макро- и микроскопических дефектов, возникающих при деформации. Известно также, что пластическую деформацию наиболее полно характеризуют интенсивность и общее число импульсов АЭ, а рост трещин – амплитуда или мощность сигналов АЭ. К настоящему времени в ряде работ изучали связь параметров АЭ с деформацией в условиях насыщения водородом, однако пока эти данные не привели к разработке методов количественного описания наблюдаемых эффектов, поскольку исследования различаются по методике измерений, характеристикам регистрирующей аппаратуры и исследуемым материалам. Несмотря на то, что не все из рассмотренных в данном разделе примеров, непосредственно относятся к изучению дефектов водородного происхождения, каждый из них может эффективно использоваться для изучения особенностей сигналов АЭ в материалах, содержащих растворенный водород.

Чаще всего измерение акустикой эмиссии в лабораторных условиях проводят при следующих вариантах использования контролируемых механических нагрузок: длительном измерении сигналов АЭ при стационарном действии приложенной силы (статическая нагрузка), равномерном постепенном растяжении или сжатии образца (до его разрушения) или при циклическом нагружении (динамические испытания).

1.4. Природа возникновения сигналов акустической эмиссии (механических упругих волн) при наводороживании

Ранее отмечалось, что источником механических упругих волн в металлах подверженных наводороживанию являются дефекты, в образовании которых водород играет существенную роль. Возникает локальное движение дислокаций, образуются микротрещины и микроскольжение зерен металла. Области деформации внутри металла импульсно переходят из одного состояния в другое, в результате возникает колебательный процесс. Этот процесс инициирует распространение волн напряжений, т. е. упругих волн. Если длина упругих волн сравнима с размерами образца, то колебаниям подвергается образец как целое или его макроскопическая часть.

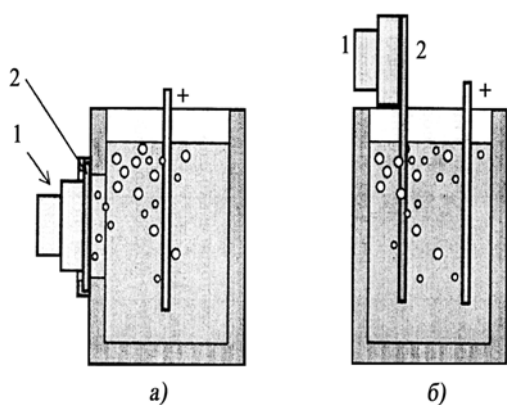
Частоты колебаний (частотный) спектр возникающих акустических волн зависят от геометрии и механических характеристик образца и имеют характерные максимумы (пики) на частотах, совпадающих с собственными частотами системы образец – датчик.

Установлено, что излучение механических волн в акустическом диапазоне проявляется в виде непрерывно следующих одна за другой коротких импульсов малой амплитуды в широком диапазоне частот и импульсов сравнительно большой амплитуды с малыми частотами.

Непрерывная эмиссия связана с изменением дислокаций внутри кристалла, их движением и выходом на поверхность. Оксидный поверхностный слой при нагружении образца может производить шум, сходный с акустической эмиссией, наблюдаемой при пластической деформации основного материала. Частота излучения при этом равна $3 \div 30$ кГц. Излучение большой энергии характеризуется большой амплитудой волны в тысячи раз больше, чем при непрерывной эмиссии. Этот вид излучения вызван макроскопическими дефектами, распространением трещин.

Основными характеристиками сигналов акустической эмиссии являются: количество импульсов в секунду; максимальная амплитуда импульса; энергия сигнала; длительность импульса, время увеличения и спада амплитуды; длительность импульса ($10^{-8} \div 10^{-4}$ с) и их энергия ($10^{-9} \div 10^{-5}$ Дж); амплитуда (смещение) колебаний поверхности образца ($10^{-14} \div 10^{-7}$ м). Интервал частот акустических колебаний – от килогерц до сотен мегагерц.

Методы регистрации и анализа сигналов АЭ используют для изучения скорости процессов дефектообразования проходящих при приложении к исследуемому материалу механических напряжений, облучении, электрохимическом или других воздействиях, приводящих к необратимым измерениям структуры материала. Метод АЭ можно с успехом использовать в качестве индикатора динамики образования полостей, трещин, массового возникновения или движения дислокаций при пластической деформации металла, содержащего водород в качестве примеси. Переход системы металл-водород в равновесное состояние также сопровождается интенсивной АЭ, вызванной аннигиляцией дефектов. Значительное внимание в последние годы уделяется изучению механических свойств твердого тела после радиационного воздействия.



*Рис. 1. Схема электролитической ячейки для изучения параметров сигналов АЭ при катодном насыщении металлов изотопами водорода:
а) для одностороннего насыщения водородом металлических пластин; б) для насыщения водородом всей поверхности образца.
1 – детектор сигналов АЭ;
2 – исследуемый образец*

Процесс наводороживания металлов сопровождается образованием дефектной структуры, созданием напряжений в решетке металла, появлением микро- и макротрещин, как на поверхности, так и в объеме материала. Формирование структурных нарушений сопровождается акустическими колебаниями решетки металла. Наибольший интерес вызывают исследования, в которых рассматривается связь между характеристиками процессов накопления водородных дефектов и сопровождающими этот процесс импульсами акустической эмиссии. Сложность регистрации акустических импульсов при электролизе заключается в наличии интенсивных фоновых импульсов, возникающих в электролите в процессе образования, движения и разрыва газовых пузырей, возникающих на катоде и аноде. Характеристики фоновых импульсов при электролизе во многом совпадают с акустическими сигналами, сопровождающими кипение жидкости или процессы кавитации. С разной степенью интенсивности эти сигналы охватывают частотный диапазон от единиц герц до десятков мегагерц.

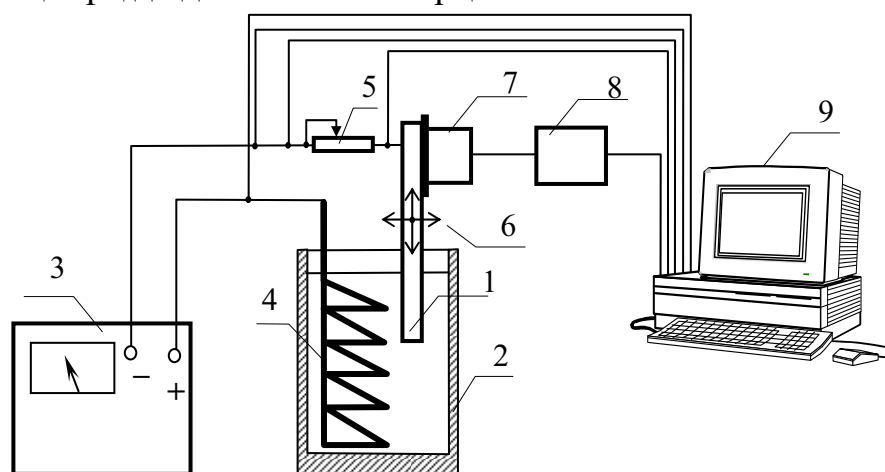


Рис. 2. Схема подключения электролитической ячейки:

1 – исследуемый образец (катод); 2 – ячейка электролиза; 3 – источник постоянного тока; 4 – платиновый анод; 5 – дополнительное сопротивление; 6 – устройство для перемещения катода; 7 – детектор АЭ; 8 – предусилитель; 9 – IBM PC

2. Приборы и оборудование

Насыщение металла водородом проводится в специальной электролитической ячейке (рис. 1). Одностороннее насыщение производится для образцов в форме фольги или пластины (рис. 1, а). Образцы в форме стержней опускаются в электролит и насыщаются водородом из раствора электролита со всех сторон (рис. 1, б). Ячейка во время электролиза размещается в вытяжном шкафу. С помощью спектрометра акустической эмиссии в процессе электролиза измеряются сигналы акустической эмиссии.

Для диагностики акустических сигналов использована широкополосная система, разработанная в Фраунгоферовском институте неразрушающих методов контроля. Спектрометр включает датчик сигналов АЭ (MAS-3), настроенный на регистрацию сигналов с частотой от 20 кГц до 2 МГц. Стандартный предусилитель сигналов (AE 3201A) работает с усилением 40 или 60 дБ. Наименьшее искажение усиливаемых акустических сигналов в диапазоне частот от 10 кГц до 2 МГц. Усилитель (3204) низкочастотного ультразвука позволяет менять усиление ступенчато (через 10 дБ) от 0 до 30 дБ. Порог регистрации сигнала можно регулировать от 0 до 5000 мВ с шагом 5 мВ. Накопление и обработка информации осуществляется с помощью программы SEK-Mashin. Программа позволяет получать следующие данные: зависимость числа импульсов, превышающих установленный порог регистрации от времени измерения (с сохранением информации о времени измерения до 72 мин); длительность сигнала; энергию звукового сигнала; амплитуду сигнала. Одновременно через заданный интервал времени (0,1 с), система позволяет измерять и заносить в память компьютера разность потенциалов между катодом и анодом при электролитическом наводороживании. Датчик сигналов АЭ через слой специальной смазки, необходимой для обеспечения акустического контакта, крепится к исследуемому образцу. На рис. 3 приведена фотография установки для измерения выхода сигналов акустической эмиссии.

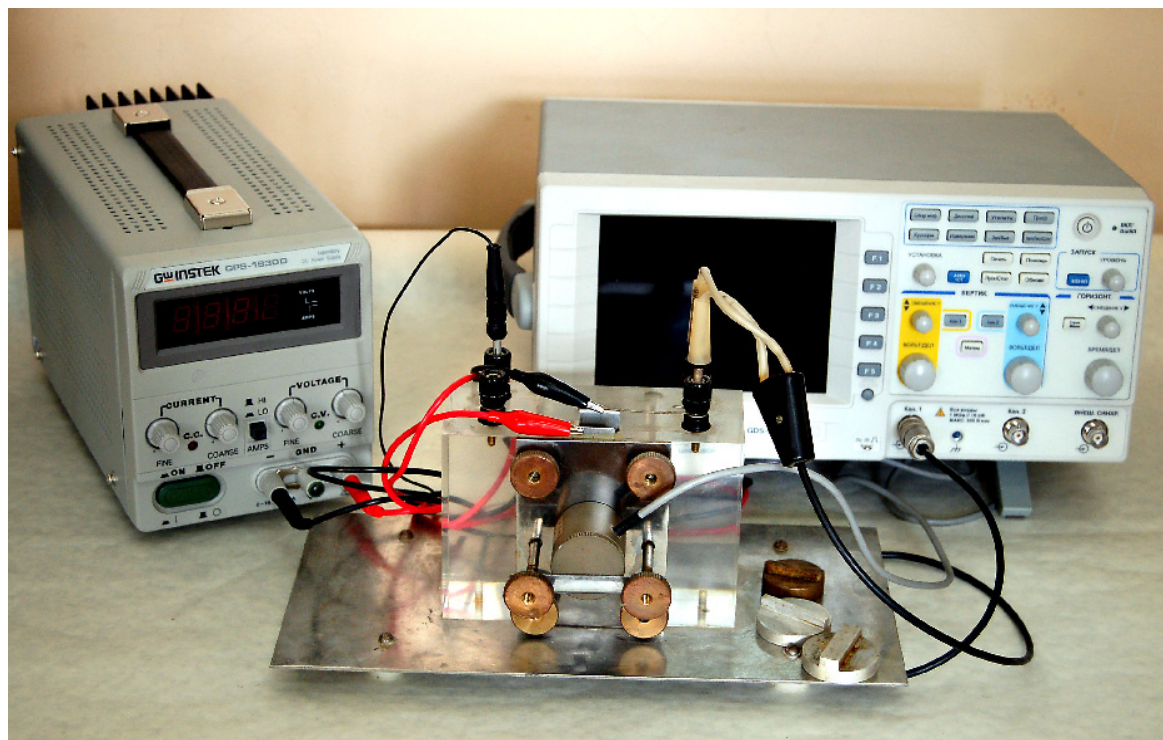


Рис. 3. Установка для измерения акустической эмиссии


Проведение измерений акустических сигналов с помощью программы «Sek-Mashin»



1. Производим загрузку операционной системы Win 3.11.

При помощи двойного щелчка левой кнопки мыши загружаем программу Sek-Mashine (Sek Mashine Standard version V1.5). Откроется главное окно на котором Вы увидите два графика: зависимость амплитуды сигналов АЭ от времени и гистограмму энергии АЭ (число сигналов в зависимости от энергии сигнала АЭ).

2. Запуск пробных измерений осуществляется нажатием кнопки .

Заканчиваем пробное измерение нажатием кнопки .

Автоматическая остановка может осуществляться по времени (time), указанному в нижней части экрана. Правее показано суммарное количество импульсов и средняя скорость набора импульсов АЭ. С помощью передвижного регулятора  в нижней части окна, мы устанавливаем (порог дискриминации, усиление и мертвое время).

При помощи кнопки  мы можем отменить измерения регулируемых параметров. Если установленные значения нас устраивают, их фиксируют нажатием кнопки .

С помощью кнопки  мы сохраняем наши измерения на диске

С (C:\ – т. е. в корневом каталоге). Там же (в опциях) мы можем установить галочку в нужных нам местах.


3. Опции позволяют регулировать параметры набора и записи файлов: [Overwrite Warning] – запрет на перезапись файла.



[Numbered files] – автоматическая нумерация файлов.


В дальнейшем при нажатии [Numbered files] на вы можете воспользоваться этой опцией и сами установить, с какого файла по счёту нужно производить нумерацию.


[Check Files] – проверка файлов.


А так же при помощи кнопки [Comment] вы можете добавить комментарий для данного файла.

Запустить процесс измерения с записью на диск можно при помощи кнопки .

Кнопка  останавливает программу, а кнопка  позволяет нам переходить от полноэкранный режим к изображению окна измерений.

После завершения процесса измерения (с записью в файл) запускаем диаграммный модуль, при помощи кнопки  и строим соответствующие диаграммы.

Кнопка  позволяет выйти из программы.

Кнопка  выводит в справочный раздел программы, который содержит ответы на ряд вопросов по использованию программы.

На рис. 4 представлен интерфейс программы Sek-Mashine: в верхней части информационной панели регистрируется энергия акустического импульса (точки), в нижней – напряжение сигнала (Вольт).

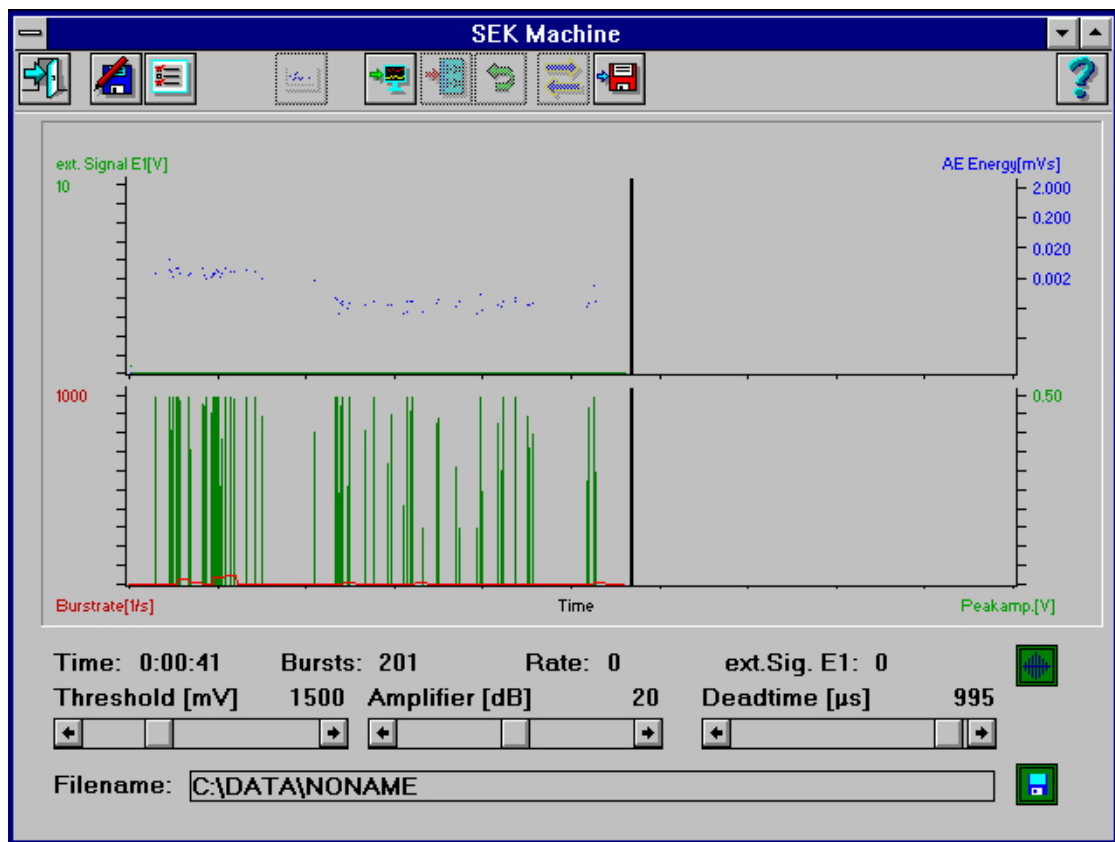


Рис. 4. Интерфейс программы Sek-Mashine

3. Задания

1. Научиться проводить электролитическое насыщение образцов водородом в различных режимах. Изучить работу спектрометра АЭ и научиться измерять энергетические спектры сигналов АЭ.
2. Измерить зависимость выхода сигналов АЭ от времени наводороживания.
3. Измерить энергетические спектры АЭ в различные моменты времени электролитического насыщения.
4. Определить время, при котором наблюдается наибольшая интенсивность сигналов АЭ.

4. Порядок выполнения работы

1. Установить в окно электролитической ячейки на пластиковую прокладку металлический образец, подготовленный для наводороживания (рис. 1, а). Собрать ячейку и проверить её герметичность (для этого вместо электролита заливается обычная вода).
2. Нанести на рабочую поверхность детектора АЭ смазку и закрепить его на образце, используя имеющееся крепление. Для проведения эксперимента по схеме рис. 1, б детектор через слой смазки крепится в верхней части образца.
3. Ячейку с детектором и образцом размещают в вытяжном шкафу. Образец (катод) и платиновый электрод (анод) соединяются с полюсами источника постоянного тока. На нем выставляется ток 0,1 А, напряжение 20 В.
4. В соответствии с инструкцией производится запуск программы «Sek-Mashin» и производится ряд пробных измерений, которые указывают на чувствительность детектора к акустическим сигналам и на отсутствие шумов выше установленного преподавателем порога дискриминации. После этого в течение 10 минут измеряется уровень фона. Проводится измерение полного числа импульсов, превышающих уровень дискриминации. Производится построение энергетической гистограммы фоновых импульсов.
5. В ячейку заливается электролит (0,1N раствор LiOH + H₂O), включается источник постоянного тока. Производится запуск спектрометра и проводятся измерения полного числа импульсов и энергетических спектров АЭ через каждые 10 минут электролитического насыщения образца водородом.
6. Проводится построение зависимостей выхода сигналов АЭ от времени наводороживания. Делаются выводы, объясняющие ход полученной кривой из теоретических положений о природе возникновения сигналов АЭ.

5. Контрольные вопросы

1. Объясните причины возникновения акустической эмиссии при насыщении металлов водородом.
2. Опишите принцип работы детектора сигналов акустической эмиссии.
3. Перечислите основные характеристики сигналов АЭ. Виды сигналов акустической эмиссии.
4. Как отличить пластическое и хрупкое разрушение металла анализируя выход сигналов АЭ.
5. Что из себя представляет спектр сигналов акустической эмиссии.
6. Приведите примеры использования метода регистрации сигналов акустической эмиссии в технике (машиностроение, автомобильная, атомная промышленность).
7. Какая аппаратура требуется для реализации статических испытаний оборудования методом регистрации сигналов АЭ.
8. Природа сигналов АЭ. Какова скорость распространения сигналов АЭ.

Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Механика: учебное пособие. – М.: Наука, 1983. – 688 с.
2. Алешкевич В.А., Деденко Н.Г., Мусаев Т.Ш. Механика сплошных сред. Лекции. – М.: Изд-во физического факультета МГУ, 1998. – С. 12–30.
3. Шапочкин М.Б. Меморандум конференции «Современный физический практикум» // Физическое образование в вузах. – Т. 8, № 3. – 2002. – С. 3–6.
4. Чернов И.П., Ларионов В.В., Веретельник В.И. и др. Компьютеризированные лабораторные работы по физике на базе графической программной технологии // Физическое образование в вузах. – Т. 8, № 1. – 2002. – С. 78–85.
5. Баумбах Х., Кренинг М., Чернов И.П., Черданцев Ю.П. Неравновесные системы металл-водород. Титан, нержавеющая сталь. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2002. – 195 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Название работы: «Измерение скорости звука в металлах для определения уровня пластической деформации и при наводороживании»

Цель работы

Изучение теоретических основ прохождения акустических волн через металлы, обучение магистров работе со спектрометром акустических колебаний, определение уровня дефектности металлов.

1. Теоретическая часть. Скорость звука в металлах

1.1. Введение

Акустические методы исследований широко используются для неразрушающего анализа металлических конструкций, в том числе, содержащих водород. Применение неразрушающих акустических методов для изучения систем металл – водород наиболее перспективно. Наиболее часто для изучения взаимодействия водорода в металлах используется метод внутреннего трения и метод акустической эмиссии. Одним из методов, используемых для исследования свойств металлических конструкций, находящихся в поле механических напряжений, является измерение скорости звука [1]. Несмотря на простоту измерения, метод редко используется для анализа водородосодержащих материалов, из-за сложной функциональной зависимости между скоростью звуковых волн и физико-механическими параметрами этих систем.

Известно, что скорость распространения ультразвука в металлах связана с их физическими (состав, структура, плотность) и механическими свойствами (предел прочности, предел текучести, твердость, ударная вязкость). По величине скорости звука можно определить сжимаемость, отношение теплоемкости C_p/C_v , модули упругости твердого тела. При пластической деформации скорость звука можно связать с увеличением плотности дислокации в ходе пластического течения. Этот эффект не может быть велик, поскольку $V \approx (E/\rho_0)^{1/2}$, а модуль Юнга и плотность не меняется существенно при растяжении. При появлении в объеме материала макродефектов (разрывы, трещины) происходит быстрый спад величины скорости звука, что позволяет определить момент наступления опасной стадии разрушения металлических конструкций. Известно, что при электролитическом насыщении металла водородом постепенно увеличиваются внутренние напряжения в решетке материа-

ла, поэтому в области малых деформаций скорость звука может служить индикатором количества накопленного водорода в металле.

1.2. Физические основы и закономерности распространения ультразвуковых волн в металлах

Спецификой используемой нами методики измерения скорости звука является то, что для исследований применяются рэлеевские волны. Расположение пьезоэлементов относительно поверхности металла показано на рис. 2. Рэлеевская волна движется вдоль границы поверхности металл-воздух или металл-жидкость. Причем во втором случае наблюдается быстрое затухание волны из-за распространения волны в жидкости. Рэлеевская волна состоит из двух волн – продольной и поперечной, которые распространяются вдоль границы полупространства с одинаковыми скоростями. Уменьшение амплитуды волны при удалении от поверхности металла описывается экспонентой и при частотах 1-10 МГц волна распространяется на глубину 1–3 мм. Скорость распространения рэлеевских волн определяется выражением:

$$v_{\text{рел}} = \frac{0,87 + 1,12\sigma}{1 + \sigma} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \sigma)'}}$$

где E – модуль Юнга; ρ – плотность; σ – коэффициент Пуассона.

При пластической деформации, термическом воздействии, облучении в металле развиваются неупругие процессы, которые приводят к необратимым изменениям структуры материала. При этом меняются как упругие характеристики материала (модули упругости) так и его прочностные свойства (пределы прочности, текучести, упругости). Принято считать, что скорость распространения ультразвуковой волны в металлах определяется упругими модулями, в то время как процесс затухания связан с рассеянием на неоднородностях кристаллической решетки и поглощением, обусловленным вязкостью среды и тепловыми потерями [3]. Модули упругости включают модуль Юнга и коэффициент Пуассона, модуль всестороннего сжатия и постоянные Ламе. Обычно скорость звука связывают с первыми двумя величинами. В свою очередь, модули упругости, хотя и слабо, но зависят от дефектности металлов.

1.3. Теоретические представления о влиянии дислокаций на скорость звука в металлах (струнная теория дислокаций)

Известно, что скорость ультразвуковой волны в металле связана с упругими модулями, от которых зависят физические характеристики сплавов. В свою очередь, модули упругости зависят от дефектности металлов. Изменение скорости звука в металлах показали, что дислокаци-

онные линии снижают скорость распространение ультразвуковой волны. Облучение нейтронами и гамма квантами, внедрение водорода ведет к образованию вакансий, которые закрепляют дислокации, что, вызывает увеличение скорости звука. В работе измерение скорости звуковых волн будет проводиться методом автоциркуляции импульсов на приборе ASTR.

Распространение упругих волн в веществе характеризуется двумя величинами: затуханием и скоростью звуковой волны. Измерив, эти величины можно определить большое число других физических характеристик твердого тела: определить упругие модули, оценить количество внесенных дефектов. Для хорошо отожженных металлов

$$v = \sqrt{E / \rho}, \quad (1)$$

где v – скорость звуковой волны; E – модуль Юнга.

Относительное изменение скорости звука ($\Delta v / v_0$) связано с изменением модуля Юнга соотношением.

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E_0}. \quad (2)$$

Традиционно, для анализа спектров внутреннего трения (ВТ) водородосодержащих материалов используют струнную модель дислокационного поглощения звука. Согласно этой модели, регистрируются только дефекты, которые оседают на дислокациях, создавая точки закрепления. Поэтому при исследовании методом ВТ примеси Н в металлах исследуемые образцы до или после насыщения Н подвергали пластической деформации. Сильные точки закрепления – связь дислокации с узловыми атомами решетки, слабые – связи с атомами водорода. Количество «сильных» точек закрепления дислокационной линии в металле достигает 10^{11} см^{-3} (предел обнаружения метода ВТ находится на уровне 10^9 см^{-3}). Хорошо известно, что наличие дислокаций снижает скорость звука в металлах. Под действием периодически меняющихся механических напряжений начинается движение дислокаций. В результате жесткость вещества несколько снижается. Экспериментальные данные [2] свидетельствуют о том, что упругие константы при этом могут снижаться на 1 %. Изменение упругих констант пропорционально плотности дислокаций. Плотность дислокаций может меняться практически от нуля для хорошо отожженных образцов, до 10^{12} см^{-2} в холоднокатаных образцах. Причем в разных частях поверхности их плотность может отличаться более чем на порядок.

При приложении достаточно большого напряжения происходит отрыв дислокации от места закрепления, и ее длина возрастает от L_c до L_N . Может произойти и обратный процесс, при котором длина дислокации

вновь сокращается. При росте длины дислокаций L или увеличении их плотности Λ до некоторой критической величины скорость звука прекращает изменения.

Связь затухания α и скорости звука с характеристиками дислокационной сетки описываются следующими зависимостями [3]:

$$\alpha = 8,86 \times 10^{-6} \left(\frac{4Gb^2}{\pi^4 C} \right) \left(\frac{B}{\pi^2 C} \right) \Lambda L^4 \omega^2; \text{дб / мкс}$$

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \left(\frac{4Gb^2}{\pi^4 C} \right) \Lambda L^2. \quad (3)$$

$$v_0 = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{1/2}.$$

где b – вектор Бюргерса, G – модуль сдвига. C , B и A – константы дифференциального уравнения звуковых колебаний: A – эффективная масса на единицу длины дислокации; B – сила торможения, отнесенная к единице длины дислокации; C – эффективное напряжение изогнутой дислокации.

$$A = \pi \rho b^2, \quad C = \frac{2Gb^2}{\pi(1-\nu)}. \quad (4)$$

Используя уравнения (3) можно определить из опытов значения L и Λ .

$$L = \frac{1}{2\nu} \left[\frac{10^6}{8,86} \frac{B}{C} \frac{\alpha(\text{дб / мкс})}{\Delta v / v} \right],$$

$$\Lambda = 8,86 \times 10^6 \left(\frac{\pi^4 B}{Gb^2} \right) \nu^2 \left[\frac{\Delta v / v^2}{\alpha(\text{дб / мкс})} \right]. \quad (5)$$

ν – коэффициент Пуассона.

Дислокации могут быть закреплены точечными дефектами (примесными атомами, вакансиями) или вакансионными комплексами. Многочисленные эксперименты по облучению металлов и сплавов нейтронами и гамма-квантами показали увеличение скорости звука и снижение затухания со временем облучения (ростом дозы). Результаты объясняются, в первую очередь, закреплением отрезков дислокаций радиационными дефектами, возникающими при облучении. Если отношение $R = (\Delta v / v) \alpha^{1/2}$ в процессе облучения не меняется, делается вывод, что плотность дислокаций Λ остается постоянной.

Количество точек закрепления дислокаций можно оценить, считая, что первоначальная длина дислокаций L_0 снизится до значения $L = \frac{L_0}{1+c}$, где c – число точек закрепления дислокаций, или число то-

чечных дефектов, возникающих при облучении в окрестности дислокаций. Используя выражение (2) можно записать зависимость концентрации дефектов от величины затухания и скорости звуковой волны.

$$c(\alpha) = \left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^{-1/4} - 1,$$

$$c(\nu) = \left(\frac{\Delta\nu/\nu_0}{(\Delta\nu/\nu_0)_0}\right)^{-1/2} - 1. \quad (6)$$

Здесь α_0 и ν_0 – начальные значения затухания и скорости звуковых волн.

Последнее выражение можно использовать, в частности, для оценки числа атомов водорода, закрепляющих дислокации.

1.4. Влияние дефектов кристаллической структуры на скорость звука в металлах

При пластической деформации, термическом воздействии, облучении в металле развиваются неупругие процессы, которые приводят к необратимым изменениям структуры материала. При этом меняются как упругие характеристики материала (модули упругости) так и его прочностные свойства (пределы прочности, текучести, упругости). Принято считать, что скорость распространения ультразвуковой волны в металлах определяется упругими модулями, в то время как процесс затухания связан с рассеянием на неоднородностях кристаллической решетки и поглощением, обусловленным вязкостью среды и тепловыми потерями [3]. Модули упругости включают модуль Юнга и коэффициент Пуассона, модуль всестороннего сжатия и постоянные Ламе. Обычно скорость звука связывают с первыми двумя величинами. В свою очередь, модули упругости, хотя и слабо, но зависят от дефектности.

К сожалению, до настоящего времени остается открытым вопрос о механизме связи скорости звука в сплавах с их структурным состоянием, дефектностью и напряжением. Исследования скорости звука в чистых ГЦК металлах при низкой температуре показали, что дислокационные линии снижают скорость распространения ультразвуковой волны. Облучение нейтронами и гамма-квантами ведет к образованию вакансий, которые закрепляют дислокации, что вызывает увеличение скорости звука. Известно [3], что модуль Юнга при облучении ряда металлов ионизирующим излучением возрастает. Так облучение монокристаллов меди пучком гамма-квантов от источника Co^{60} с активностью $33,3 \times 10^{12}$ расп/с приводит к постепенному росту модуля Юнга. Насыщение наблюдается через 50 часов облучения.

Монография [1] посвящена исследованию влияния структуры материалов на скорость звука. Особое внимание обращено на то, что после закалки стали, образуются твердые раствор внедрения (по углероду). При этом скорость звука минимальна, а искажения решетки наибольшие. Причем, чем больше в стали углерода в виде раствора внедрения, тем меньше становится скорость звука. В сплавах алюминия рост концентрации примеси замещения также приводит к снижению скорости звука. Если после закалки сплавы Al и нержавеющей сталь имеют неравновесную структуру, после отжига скорость звука в них возрастает. При уменьшении скорости закалки плотность дислокаций снижается от 10^9 до 2×10^8 см⁻².

Образующиеся при высокой температуре вакансии успевают мигрировать к границам зерен и в металле образуются области, с пониженной вакансионной плотностью. Установлено, что скорость ультразвука снижается с уменьшением скорости закалки. Следовательно, наиболее высокая скорость звука соответствует малой концентрации вакансий.

При миграции атомов растворенных элементов (Cu, Mg, Si), равномерно распределенных в решетке алюминия, возникают скопления, полностью когерентные с кристаллической решеткой. Они ответственны за упрочнение сплава, поскольку служат препятствием для движения дислокаций. При этом наблюдается корреляция между скоростью звука, изменением твердости и электропроводностью. Процесс перехода сплава в результате старения в более упорядоченное состояние сопровождается ростом скорости звука. Форма кривой изменения твердости во времени аналогична кривой изменения скорости звука, а электропроводность зеркальна по отношению к ним.

1.5. Скорость звука и дефекты

К сожалению, до настоящего времени остается открытым вопрос о механизме связи скорости звука в сплавах с их структурным состоянием, дефектностью и напряжением. Исследования скорости звука в чистых ГЦК металлах при низкой температуре показали, что дислокационные линии снижают скорость распространения ультразвуковой. Облучение нейтронами и гамма-квантами ведет к образованию вакансий, которые закрепляют дислокации, что, вызывает увеличение скорости звука. Известно [3], что модуль Юнга при облучении ряда металлов ионизирующим излучением возрастает. Так облучение монокристаллов меди пучком гамма-квантов от источника Co^{60} с активностью $33,3 \times 10^{12}$ расп/с приводит к постепенному росту модуля Юнга. В ряде случаев этот рост можно напрямую связать с увеличением скорости звука.

Монография [1] посвящена исследованию влияния структуры материалов на скорость звука. Особое внимание обращено на то, что после закалки стали, образуются твердые раствор внедрения (по углероду). При этом скорость звука минимальна, а искажения решетки наибольшие. Причем, чем больше в стали углерода в виде раствора внедрения, тем меньше становится скорость звука. При уменьшении скорости закалки плотность дислокаций снижается от 10^9 до 2×10^8 см⁻².

Образующиеся при высокой температуре вакансии успевают мигрировать к границам зерен и в металле образуются области, с пониженной вакансионной плотностью. Установлено, что скорость ультразвука снижается с уменьшением скорости закалки. Следовательно, наиболее высокая скорость звука соответствует малой концентрации вакансий. Результат подтверждает предположение о росте скорости звука в образцах после отжига.

1.6. Влияние пластической деформации на скорость звука

В настоящее время установлена связь между стадийностью кривой пластического течения алюминия и низкоуглеродистой стали и скоростью ультразвука (СУ) в этих металлах [4]. Определена форма зависимости скорости распространения ультразвука (волны Рэлея) от внешних и внутренних напряжений для материалов с ГЦК, ОЦК и ГПУ решетками и дано физическое обоснование природы этих зависимостей. Скорость распространения ультразвука измеряли методом автоциркуляции импульсов непосредственно при растяжении исследуемого образца. Показано, что измеряя скорость распространения ультразвука в процессе деформации, можно получать информацию о кинетике движения очагов деформации в ходе пластического течения.

1.7. Деформационное старение насыщенных водородом металлов

В механизмах влияния водорода существенную роль играют взаимодействия дислокаций с внедренными атомами. При относительно малых механических напряжениях движение дислокаций может сопровождаться движением примесных атомов; в поле достаточно больших напряжений возможен отрыв дислокаций от тормозящих их перемещение примесных атмосфер. Разблокировка дислокаций возможна, скорее всего, вблизи концентраторов напряжения, где локальные внутренние напряжения, складываясь с внешними, становятся большими, чем критические.

В исследуемых образцах развиваются процессы так называемого деформационного старения металлов в присутствии подвижной примеси. Деформационным старением принято называть широкий круг явле-

ний, связанных с формированием примесных атмосфер вблизи дислокаций и соответствующим изменением свойств материалов. Оно имеет место в результате миграции к дислокациям атомов углерода, азота, кислорода и водорода. На эффективность подобной сегрегации примесных атомов вблизи дислокаций известное влияние оказывают и другие точечные дефекты. Известно, что в присутствии вакансий концентрация примесных атомов в атмосферах уменьшается из-за образования парных комплексов вакансия – внедренный атом, а также за счет формирования комплексов из примесных атомов вблизи вакансий.

Деформационное старение наблюдается, когда диффузионная подвижность примесей внедрения достаточно велика и обеспечивает их сегрегацию в поле напряжений дислокаций. Согласно Коттреллу и Билби, изучавших кинетику ранних стадий формирования примесных атмосфер, доля сегрегируемых у дислокаций атомов q растет со временем пропорционально $t^{2/(n+2)}$ (где для случая упругого взаимодействия примеси с дислокацией $n = 1$ при преобладании размерного фактора и $n = 2$ при преобладании различия упругих постоянных) и существенно зависит от температуры старения и диффузионной подвижности внедренных атомов. Соответственно с этим развивается блокировка дислокаций и, как следствие, изменение механических характеристик металла.

Наиболее ярко деформационное старение обнаруживается, когда после генерации (тем или иным способом) в металле «свежих» дислокаций создаются условия, обеспечивающие достаточно высокую подвижность примесных атомов. Если стальной образец подвергнуть холодной пластической деформации, а затем разгрузить, то после некоторой выдержки и повторного нагружения «зуб» текучести увеличится. Этот эффект отсутствует, если повторное нагружение осуществляется без промежуточной выдержки образца, необходимой для формирования примесных атмосфер, и усиливается с увеличением времени промежуточной выдержки в ненагруженном состоянии. Описанные особенности не наблюдаются для ненаводороженных образцов, поэтому влияние примесей кислорода, углерода и азота можно исключить. При электролитическом насыщении водородом деформированного железа и никеле.

При увеличении времени старения в соответствии с предсказаниями теории зависимость $\Delta\sigma/\sigma$ от времени усложняется, особенно при большом содержании водорода.

Нужно отметить, что процессы деформационного старения происходят и во время деформации. Скорость движения дислокаций увеличивается с напряжением по показательному закону ($v \sim \sigma^n$), в связи с чем, по достижении критического значения $v_{кр} \sim$ дислокации отрываются от окружающих атмосфер. В результате наблюдается интенсивное пласти-

ческое течение металла, сопровождаемое рождением новых свободных дислокаций и ростом их плотности. Это в свою очередь ведет к уменьшению σ , а следовательно, и v (при постоянной скорости деформации). Скорость движения дислокаций становится меньше критической и вокруг них формируются примесные атмосферы.

По мере роста прикладываемых напряжений, описанные процессы могут периодически повторяться, приводя к появлению серии «зубов» текучести; кривая растяжения приобретает прерывистый характер. Подобные особенности диаграмм растяжения наводороженных металлов неоднократно описывались многими исследователями. В частности, прерывистость кривой деформации отмечали для электрохимически наводороженного железа Роджерс, а для насыщенного газообразным водородом никеля – Григорьев и его соавторы. Интервалы температур, при которых проявляется зубчатость, смещаются в сторону роста температуры при увеличении скорости деформации металлов.

1.8. Техника эксперимента

Измерения скорости звука проводились методом автоциркуляции импульсов [1] на приборе ASTR. Суть метода заключается в том, что прошедший по образцу ультразвуковой импульс преобразуется в приемном пьезопреобразователе ультразвукового датчика в электрический сигнал, формирующий следующий вводимый в образец импульс. Встроенный частотомер подсчитывает число импульсов, прошедших через исследуемый участок поверхности материала за 1 секунду. При этом частота импульсов автоциркуляции зависит от времени прохождения импульсом расстояния между преобразователями, а значит от скорости распространения ультразвука в контролируемом объекте. Ультразвуковой датчик присоединяется к поверхности образца через контактирующую жидкость (трансформаторное масло). Измерение скорости звука можно проводить как после снятия механической нагрузки, так и в процессе измерения в режиме *in situ*. Расстояние между пьезопреобразователями фиксировано и не меняется при изменении длины образца во время измерения при растяжении. Скорость звука определяют как произведение измеряемой частоты на расстояние между пьезопреобразователями (32 мм). Электронно-измерительный блок прибора соединен с компьютером, что позволяет через заданные интервалы автоматически измерять временные зависимости скорости звука на протяжении длительного времени (сутки и более).

2. Технические характеристики прибора.

Используемый прибор ASTR предназначен для измерения частоты автоциркуляции ультразвуковых колебаний в материалах, скорость распространения ультразвуковых рэлеевских волн в которых находится в диапазоне от 2000 до 3000 м/с (сталь, цветные металлы, сплавы и т. д.). Прибор включает ультразвуковой датчик УД-2,5-32 с двумя пьезопреобразователями и электронно-измерительный блок (ЭИБ). Технические характеристики прибора: погрешность измерений частоты автоциркуляции – 0,01 %; несущая частота ультразвуковых колебаний – 2,5 МГц; температурный диапазон измерений – от –20 до +40 °С. Изменение температуры датчика на 5 К приводит к изменению частоты на 2 кГц. Изменение шероховатости поверхности учитывается следующим выражением для частоты автоциркуляции: $\Delta f_{ц} = 4,3 R_z$, где R_z – шероховатость поверхности в микронах.



Рис. 1. Установка для измерения скорости звука

Работа измерительного блока

Принципиальная схема прибора показана на рис. 1. Блок обеспечения автоциркуляции работает следующим образом. Генератор 8 парафазным напряжением формирует на выходе электронного коммутатора 10 короткий импульс, запускающий ключ 1 и первую ступень генератора 7. В результате срабатывания ключа акустический импульс посылается с пьезопреобразователя 2 в исследуемый образец 3. Прошедший по задан-

ной базе изделия акустический сигнал принимается пьезопреобразователем 4 и подается на вход усилителя-формирователя 5. На выходе усилителя возникает пакет «импульсов-откликов», что связано с акустическими реверберациями в контролируемом изделии. Поскольку интересующий отклик приходит (по времени) первым, формирователь, собранный по схеме одновибратора, срабатывая по первому импульсу, выдает импульс заданной длительности, несколько превышающий длительность пакета «импульсов-откликов». В дальнейшем обработка пакета ведется по переднему фронту импульса, вырабатываемого формирователем.

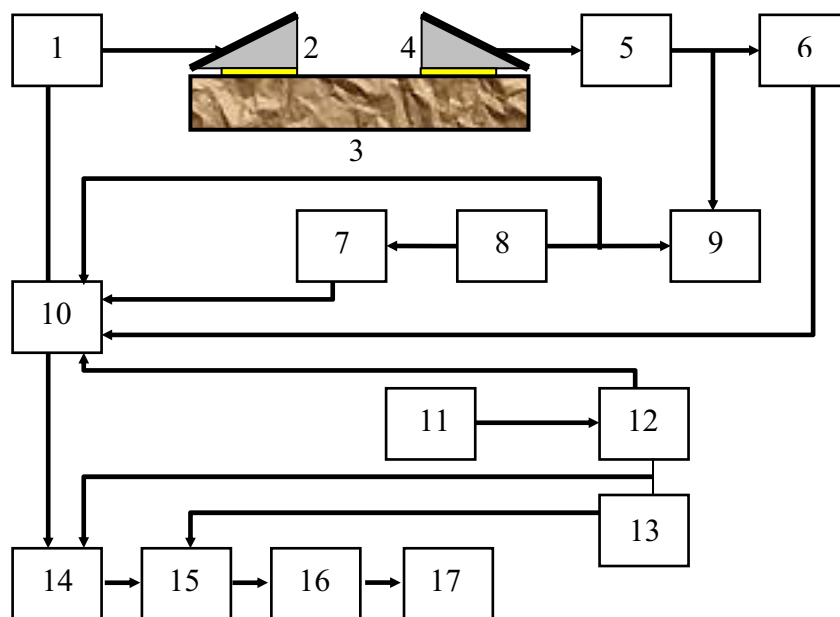


Рис. 2. Функциональная схема прибора ИСП-12.

Блок автоциркуляции акустических импульсов: 1 – запускающий ключ; 2, 4 – пьезопреобразователь соответственно ввода и приема ультразвуковых импульсов; 3 – образец (изделие); 5 – усилитель-формирователь; 6 – генератор импульсов регулируемой длительности; 7 – первая ступень генератора парафазного напряжения; 8 – запускающий генератор; 9 – звуковой сигнал-индикатор; 10 – электронный коммутатор.

Блок индикации результатов измерений: 11 – генератор; 12 – делитель; 13 – дешифратор; 14 – счетчик; 15 – регистр памяти; 16 – дешифратор результата; 17 – цифровой индикатор

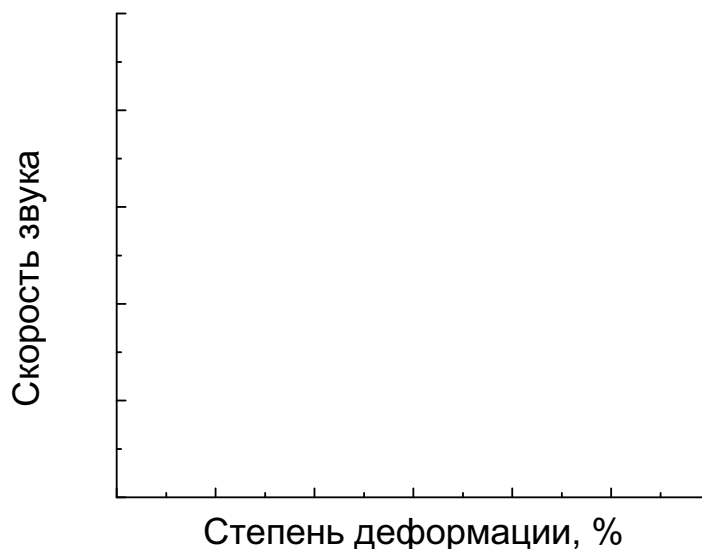
3. Задание

1. Изучить теоретические основы прохождения акустических волн через металлы.
2. Изучить работу спектрометра акустических колебаний. Научиться проводить измерения скорости звука.
3. Исследовать влияние деформации на скорость звука в металлах.
4. Исследовать влияние наводороживания на скорость звука.

4. Порядок выполнения работы

Первая часть

1. Включить тумблер сетевого питания в положение «вкл». При включении и должно засветиться табло индикаторного устройства. Прогреть прибор в течение 20–30 мин. На рабочую поверхность нанести контактную смазку (трансформаторное масло). Установить датчик на измеряемый образец. Убедиться, что появившиеся значение частоты не изменяется с течением времени.
2. Провести пятикратное измерение скорости звука для исходного образца.
3. Провести пятикратное измерение скорости звука для каждого из деформированных образцов (от 1 до 10 % относительной деформации).
4. Вычислить среднее арифметическое значений частоты автоциркуляции.
5. По окончании измерений тумблер переключить в положение выключено, выключить вилку из розетки сети, снять ультразвуковой датчик с измеряемого образца и протереть его.
6. Построить зависимость скорости звука от степени деформации.
7. По наклону кривой определить относительное изменение скорости звука (в расчете на 1 % деформации).
8. Рассчитать погрешность измерений скорости звука.



Вторая часть

1. Производится шлифовка и полировка образца, предназначенного для наводороживания.
2. Измеряем скорость звука в этом образце.
3. В ячейку для наводороживания устанавливается образец и катод (платина).
4. Устанавливаются режимы насыщения.

5. Ячейка помещается в вытяжной шкаф и в неё заливается электролит (1М раствор LiOH + H₂O).

ВНИМАНИЕ: при работе с электролитом быть осторожными, не проливать и не касаться!

6. Включается источник постоянного тока. Насыщение образцов проводят в течение 10 минут.

7. Выключить установку, тщательно промыть образец водой. После промывки температура образца не должна отличаться от комнатной.

8. Проводится пятикратное измерение скорости звука, находится среднее значение.

Пункт 6–8 повторяется в течение 10–15 раз

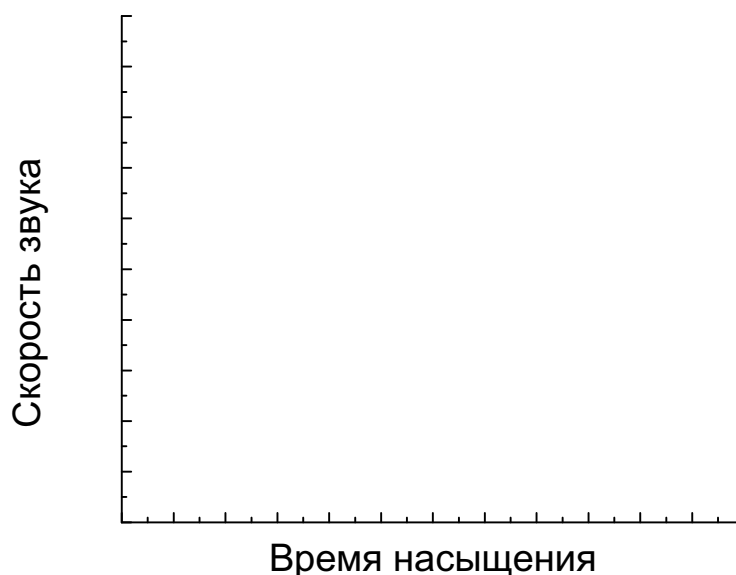
9. Результаты измерения скорости звука (частоты осцилляций) занести в таблицу.

Время № изм.	Исх.	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1										
2										
3										
4										
5										
Среднее значение										
Погрешность										

10. Строится зависимость скорости звука от времени насыщения образца водородом.

11. Проводится теоретическое обоснование полученного результата.

12. Рассчитывается и указывается на графике погрешность измерений.



5. Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит величина скорости звука в металлах.
2. Опишите принцип работы прибора АSTR.
3. Суть метода автоциркуляции импульсов.
4. В чем специфика использования методики измерения скорости звука используемой в наших измерениях?
5. Изменение каких физико-механических свойств влияют на скорость распространения ультразвука в металлах.
6. Как изменится скорость звуковых волн при насыщении металла водородом?
7. Как изменится скорость звука при увеличении уровня пластической деформации?
8. Как влияет облучение металла на распространение ультразвука?
9. В чем заключается особенность распространения волн Релея?
10. Как, на ваш взгляд, будет отличаться скорость звука для пластических и упругих металлов.
11. Что представляет собой диаграмма растяжения.

Список литературы

1. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 185 с.
1. Сосин А., Кифер Д.В. В кн.: Микропластичность. – М.: Металлургия, 1972. – С. 130–236.
2. Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств материалов. М.: Машиностроение, 1981. – 80 с.
3. Семухин Б.С., Бушмелева К.И., Зуев Л.Б. Скорость распространения ультразвука и явление текучести в стали 09Г2С. Металлофизика и новейшие технологии, 1998. – Т. 20. – № 5. – С. 68–71.

Учебное издание

ЧЕРДАНЦЕВ Юрий Петрович
ГАРАНИН Георгий Викторович

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Приборы и установки для анализа твердого тела»
для магистрантов, обучающихся по магистерской программе
«Физика конденсированного состояния вещества»
направления 010700 «Физика»

Научный редактор
кандидат физико-математических наук

Г.П. Грабовецкая

Верстка

В.П. Аршинова

Дизайн обложки


*О.Ю. Аршинова
О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 11.12.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 3,08. Уч.-изд. л. 2,79.
Заказ 841. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.