

В. И. Горбунов, В. А. Суторихин

ООО «Дистанционные Индикаторы Активных Дефектов»

Россия, 634012, г. Томск, пер. Нахимова, 12/2, 46.

тел.: 3822-54-12-61, 8-913-824-40-39, e-mail: wind@mail.tomsk.ru

Возможность дефектоскопии металлических деталей СВЧ полем

Получена 26.06.2010, опубликована 30.11.2010

Приведено краткое описание необычного физического явления. Механическое нагружение металла вместе с ультразвуковым воздействием, в некоторых случаях, приводит к изменению поверхностной проводимости с частотой ультразвука. Условием реализации необычных результатов является наличие активных дефектов, выявляемых методами акустической эмиссии. Значительные коэффициенты преобразования ультразвука в изменения поверхностной проводимости, на 20...36 дБ выше пороговых по шуму, позволяют построить и широко использовать дистанционный индикатор активных дефектов (ДИАД) с использованием СВЧ поля.

Ключевые слова: ультразвук, поверхностная проводимость, СВЧ сенсор.

ВВЕДЕНИЕ

Несколько лет назад сотрудники Томского Политехнического Университета выполняли работы по определению параметров акустической эмиссии (АЭ) дистанционно, с помощью СВЧ поля частоты 9,8 и 28 ГГц [1]. В процессе исследований было построено и испытано несколько лабораторных макетов СВЧ сенсоров ультразвука. Испытания проводились на разрывных машинах с образцами из стали марки Ст45. Полученные результаты были оформлены в виде отчетов, часть из них опубликована [2].

Данная статья является кратким описанием проведенных исследований. Было замечено, что совместное применение механической нагрузки (растяжение) и волн ультразвука в некоторых случаях приводит к резкому увеличению чувствительности СВЧ сенсора, регистрирующего спектральные составляющие ультразвука. В обычных условиях регистрация ультразвуковых волн на поверхности металла СВЧ сенсором практически невозможна. Амплитуда упругих колебаний кристаллической решетки (поперечные колебания) должна составлять несколько десятков микрон, чтобы можно было обнаружить их с помощью СВЧ поля (10...40 ГГц). Но при таких амплитудах ультразвуковых колебаний происходит быстрое разрушение металла. Безусловно, можно регистрировать упругие колебания меньшей амплитуды (1...10 нанометров) с помощью лазера. Однако обнаруженное авторами явление — индикация

ультразвуковых колебаний поверхности амплитудой 40...60 ангстрем СВЧ сенсором частоты 10 ГГц можно считать необычным событием, которое изменило представление авторов о возможностях метода дистанционного контроля скрытых дефектов металлических деталей и конструкций.

ОПИСАНИЕ ОБНАРУЖЕННОГО ЯВЛЕНИЯ

Основным прибором, используемым авторами для дистанционной регистрации (индикации) единичных актов акустической эмиссии был прибор на основе радара Доплера. Во время исследований, построенный авторами радар располагался перпендикулярно испытываемой поверхности образца на расстоянии 140...180 мм. Сам образец плавно растягивался разрывной машиной, причем, в отличие от метода акустической эмиссии, образец подвергался дополнительному воздействию ультразвука. Источник ультразвука (одной или двух частот) играл роль имитатора ультразвуковых колебаний, вызванных актами акустической эмиссии. Такая методика обнаружения одиночных сигналов акустической эмиссии не является идеальной, но именно она позволила обнаружить новое физическое явление.

Во время испытаний было выявлено аномальное увеличение чувствительности СВЧ сенсора к имитационному сигналу ультразвука. Испытания проводились на разрывной машине с максимальным усилием 10 тонн (100 кН). Для проверки чувствительности СВЧ сенсора частоты 9,8 и 28 ГГц металлическая поверхность стальной пластины (3×45×450 мм) возбуждалась ультразвуковой волной частоты 44 кГц, мощностью не более 5 Вт. До начала испытаний с выхода СВЧ сенсора не удавалось регистрировать какой-либо уровень сигналов частоты ультразвука на экране анализатора спектра СК4-49. При нагрузках близких к пластическим деформациям регистрировалось резкое увеличение уровня полезного сигнала, который достигал 20...26 дБ над уровнем шума. Причем на максимуме механической нагрузки, при возбуждении бигармоническим сигналом ультразвуковой частоты (f_1, f_2) , удавалось регистрировать не только две боковые, но и суммарно-разностные составляющие $((f_1 + f_2), (f_1 - f_2))$ [2].

РАСЧЕТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СВЧ СЕНСОРА

Для используемой частоты ультразвука (44 КГц) и толщины пластины (3 мм) основным типом колебаний являлись изгибные волны [3]. Измеренная длина стоячей волны этих колебаний составляла 100...120 мм, что позволяет регистрировать механические колебания поверхности СВЧ полем частотой 10 ГГц (эллипс диаграммы направленности с размерами — 30×32 мм). Измеренная амплитуда стоячей изгибной волны, определенная с помощью калиброванного пьезопреобразователя (33 КВ/мм), составляла 200 мВ или 60 ангстрем (dl). При такой амплитуде колебаний и частоте СВЧ поля 10 ГГц (длина волны $\lambda = 30$ мм) электрический сдвиг фазы отраженного сигнала не превышает $2\pi \times dl / \lambda = 6,28 \times 6^{-6} / 30 = 1,2^{-6}$ радиана, что соответствует коэффициенту амплитудной модуляции на смесительном диоде доплеровского радара

$dl \times 100\% / (\lambda / 2) = 6^{-4} / 15 = 2,8^{-5}\%$ или 129 дБ относительно 100% модуляции при девиации в полволны. Поскольку измеренная мощность на смесительном диоде радара составляла 0,4...0,5 мВт, переменная составляющая модуляции не превышает 129 дБ относительно этой величины (–132 дБ/мВт). Учитывая влияние коэффициента шума макета СВЧ сенсора (–10,12 дБ), становится очевидно, что наблюдение спектральных составляющих на уровне (–142 дБ/мВт) на экране прибора СК4-59 (чувствительностью минус 110 дБ/мВт /МГц/град.), практически невозможно. Расчетное значение сигнала должно быть на уровне шума (–143 дБ) по экрану СК4-59 для полосы частот регистрации 300 Гц. Это противоречие, расчетного значения сигнала, которой должен быть на уровне шума (–141...142 дБ/мВт) и практически наблюдаемого, на 20...36 дБ больше порогового по шуму, вначале казалось авторам аппаратурной ошибкой. Но дальнейшие эксперименты с разными толщинами, составом стале подтвердили обнаруженное явление, дали возможность начать практическое использование СВЧ сенсора для дистанционного контроля сигналов, предупреждающих о начале разрушения металлических деталей.

ИЗВЕСТНЫЕ ВАРИАНТЫ ОПЫТОВ С ПЕРЕМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Авторы предположили, что причиной значительного увеличения уровня модуляции СВЧ поля должно быть не механическое колебание поверхности, а изменение проводимости «скин слоя» металла, изменяющего свойства при появлении дефектов. Известна запись поверхностного импеданса через коэффициент отражения ρ [4]:

$$\rho = H_t(x) / H_t(0) = (1 - cZ / 4\pi) / (1 + cZ / 4\pi), \quad (1)$$

где H_t — вектор магнитного поля, c — скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с), $Z(\omega, \sigma)$ — поверхностный импеданс (с/м),

$$Z(\omega, \sigma) = (4\pi / c) \sqrt{\varepsilon(\omega, \sigma)}, \varepsilon = \varepsilon_l + j4\pi\sigma / \omega, \quad (2)$$

где $\varepsilon(\omega, \sigma)$ — комплексная диэлектрическая проницаемость (Ф/м), ε_l — действительная часть, ω — круговая частота (рад/с) и σ — электрическая проводимость металла (1/Ом·м). Подставляя численные значения $f = 10^{10}$ (Гц), $\varepsilon_l = 0,87^{-11}$ (Ф/м), $\sigma = 2^{11}$ (1/Ом·м) для металлического образца, можно заметить, что действительная часть выражения (2) много меньше мнимой части по модулю ($3,2 > 0,87 \cdot 10^{-11}$), поэтому (1) можно переписать:

$$\rho = (1 - j\sqrt{4\pi\sigma / \omega}) / (1 + j\sqrt{4\pi\sigma / \omega}).$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$\rho = (\sqrt{\varepsilon(\omega, \sigma)} - 1) / (\sqrt{\varepsilon(\omega, \sigma)} + 1). \quad (3)$$

Измеренное среднее значение уровня полезного сигнала в эксперименте соответствовало 20 дБ над уровнем шума. Для детального исследования был изготовлен имитатор, представляющий собой неплотный контакт медной фольги (40×20×0,2 мм) с металлом образца (простейший аналог активного дефекта). В отсутствие растяжения удалось получить график зависимости амплитуды сигнала с выхода СВЧ сенсора от амплитуды возбуждения пьезоэлектрического передатчика. Амплитуда сигнала, регистрируемая СВЧ сенсором, линейно зависела от амплитуды ультразвукового сигнала (Таб. 1). Расчетное значение уровня модуляции по фазе было получено относительно прогнозируемого уровня сигнала (60 дБ) при максимальном уровне модуляции (100 %).

Таблица 1. Зависимость регистрируемого сигнала от уровня ультразвукового воздействия

Амплитуда УЗ (Вольт)	24	37	44	54
Сигнал анализ. спектр. (дБ) над шумом	18	22	24	26
Расчетное значение модуляции по фазе (рад)	0,012	0,019	0,024	0,0314
Расчетное значение девиации проводимости, %	$0,17 \cdot 10^{-3}$	0,09	0,146	0,25

Данные таблицы показывают, что весьма незначительные изменения поверхностной проводимости (0,1...0,3%) способны привести к значительным изменениям фазы отраженного сигнала (0,02...0,03 радиан) и соответственно значительным амплитудам измеренного полезного сигнала на экране анализатора спектра СК4-59.

Кроме проведенных авторами опытов с переменной поверхностной проводимостью известны другие экспериментальные работы. Условия их выполнения отличаются от перечисленных ранее. В данной работе эти эксперименты приведены с целью демонстрации принципиальных отличий, подчеркнуть необычность нового явления.

Известны эксперименты для температур близких к абсолютному нулю [5, 6], показывающие, что в магнитном поле, приложенном параллельно исследуемой металлической поверхности (медной пластине), можно наблюдать изменение коэффициента отражения (в несколько раз) от величины приложенного магнитного поля. Феноменологическое объяснение явления А. Пиппардом с помощью концепции неэффективности взаимодействия СВЧ поля с большей частью электронов проводимости при низкой температуре и сильном магнитном поле, демонстрирует это явление [5].

Переменное значение поверхностной проводимости для СВЧ поля 25 ГГц, при вариациях магнитного поля известно как эффект Азбея-Канера [6]. Значительное изменение коэффициента отражения достигается здесь применением переменного магнитного поля и малой толщины медного образца. В отличие от наших экспериментальных результатов вариации поверхностной проводимости здесь достигаются за счет сверхнизких температур, переменного магнитного поля. Известен эксперимент [7], который демонстрирует прерывистую деформацию аустенитных нержавеющей сталей 310S и 304L при статическом растяжении в условиях

адиабатической деформации при температуре 4К и скорости деформирования $3 \cdot 10^{-4}$ 1/с. В экспериментах фиксировали скачки температуры ΔT , соответствующие скачкам нагружения. Была установлена степенная зависимость между частотой повторения температурных пиков N и величиной ΔT :

$$N(\Delta T) \approx 10/(\Delta T^D), \quad (4)$$

где $N(\Delta T)$ — число тепловых осцилляций в секунду в зависимости от перепада температуры ΔT , $D = 0,63$ — фрактальная размерность множества Кантора.

Дискретность процесса пластической деформации схематически описывали последовательностью деформированных и недеформированных «областей» металла, принимая при этом, что недеформированные области образуют множество Кантора с фрактальной размерностью $D=0,63$. В этом эксперименте внешняя температура составляет 4К, отсутствует внешнее магнитное поле и дополнительный источник ультразвука. Из описания эксперимента становится ясно, что диапазон изменения температуры при пластической деформации составляет 80...90 К, при этом частота колебаний составляла от 1 до 30...40 Герц. В этом случае не исключается возможность наблюдать переменное значение поверхностной проводимости, возникающее при скачках поверхностной температуры, в условиях растяжения образцов.

Большинство практически важных случаев определения дефектов происходит при нормальных или повышенных температурах (300...900 К), практическом отсутствии сильных магнитных полей. Определение коэффициента отражения СВЧ поля через комплексную диэлектрическую проницаемость (3) показывает, что для неизменной частоты ($\omega = const$) аргументом остается проводимость σ . Поскольку деформируемое твердое тело является открытой системой, его свойства наиболее отчетливо проявляются при переходе в пластическую область. Именно в этой области фиксируется прерывистость течения деформации, на проявление которой в макромасштабе, помимо химического состава сплава, оказывают влияние скорость деформации, температура и другие факторы.

ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ОБЪЯСНЕНИЯ НОВОГО ЯВЛЕНИЯ

Как известно [7], для металлов нагретых выше температуры Дебая ($\theta > 0^\circ\text{C}$) проводимость прямо пропорциональна времени свободного пробега электронов проводимости (τ):

$$\sigma = ne^2\tau / m, \quad (5)$$

где n — число электронов проводимости (близко к числу атомов металла, практически не зависит от температуры), e — заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-9}$ К), m — масса электрона ($9 \cdot 10^{-31}$ кг), τ — время свободного пробега электронов проводимости ($10^{-10} \dots 10^{-13}$ с) обратно пропорционально температуре Кельвина. Следовательно, в соответствии с выше приведенными теоретическими выкладками, изменение проводимости поверхности возможно в области пластической деформации. Расчетное значение

амплитуды вариации температуры при пластической деформации не превышает 30...40 градусов Кельвина в опытах [7]. Такое изменение температуры может привести к изменению поверхностной проводимости (те же 10...15%). Простейший расчет, согласно (3), позволяет сделать вывод, что изменение σ на 1...2% способно привести к модуляции фазы коэффициента отражения, соответствующего уровню полезного сигнала СВЧ сенсора до величины 20...26 дБ. Предложенное объяснение могло бы удовлетворить полученным практическим результатам, но остается не выясненным вопрос преобразования ультразвуковой волны в механизм прерывистого течения пластической деформации, высокая скорость этого преобразования. Наибольшие затруднения представляет объяснение механизма изменения поверхностной проводимости ультразвуком малой мощности. Прямое изменение проводимости металла на 1...2% может быть следствием его нагрева на температуру 1...2% превышающую первоначальную. Причем изменение этой температуры должно происходить со скоростью изменения ультразвукового сжатия-растяжения. Но в этом случае нет объяснения неограниченной области регистрации нового явления. Наши опыты показывают, что зона переменной проводимости не ограничена зоной пластического растяжения (зона изменения температуры). Полезный сигнал регистрируется в любой точке исследуемой поверхности.

Интересный материал относительно возможности изменения поверхностной проводимости предложен авторами работы [8]. Рассматривая модель электронного Ферми-газа в металле, авторы получили формулы для полной энергии и химического потенциала электронов проводимости в недеформированных и деформированных кристаллах металла. На этой основе ими показано, что при неоднородных деформациях кристаллов металла возникает электрическое поле, пропорциональное градиенту объемной деформации, а также объемный заряд, который компенсируется противоположным по знаку поверхностным зарядом. Скорость изменения объемной деформации может быть прямо связана с частотой ультразвуковых волн, являющихся источником или способствующих появлению объемной деформации металла. В любом случае поверхностный заряд приводит к изменению поверхностной проводимости по причине появления дополнительных носителей заряда, кроме электронов проводимости. Авторы [8] показали, что концентрация носителей заряда изменяется именно на поверхности — там, где концентрация прямо связана с проводимостью «скин слоя». Несложно подсчитать, что объем, содержащий повышенную деформацию, может вызвать поверхностное изменение заряда пропорциональное числу деформированных микрообъемов, равных минимальному (межатомному) расстоянию. Так, если предположить, что объем деформированных межатомных состояний равен кубическому миллиметру, объем, ограниченный увеличением зарядов («скин слой» в одно межатомное расстояние) составит кубический метр. Проявится закон степени $3/2$, связывающий размер грани объема деформированных состояний с размером грани поверхности с дополнительным зарядом. Поскольку прежнее состояние поверхности (число электронов проводимости) соответствует числу межатомных расстояний,

произойдет их удвоение для случая описанного выше. Следовательно, поверхностная проводимость слоя в одно межатомное расстояние изменится в два раза.

В настоящее время эта модель наиболее полно отражает обнаруженный нами эффект модулирования СВЧ поля поверхностью металла, содержащего дефекты. Причем теоретическая работа Б. В. Васильева и В. Л. Любошица указывает на возможность контроля дефектов не только на поверхности металла, но и в теле, где скрытые дефекты раньше могли быть обнаружены только контактными методами. Авторы считают необходимым продолжение работ как теоретического, так и практического направлений. Важнейшей задачей для современных исследований является создание нового прибора для дистанционного контроля уровня нагруженности металлических деталей, степени их износа. Примером такого прибора является макет установки ДИАД выполненный авторами (Рис. 1).

СОСТАВ УСТАНОВКИ

Одна из установок ДИАД, состоящая из СВЧ сенсора рабочей частоты 9,8 ГГц, источника ультразвука вместе с пьезопреобразователем, регистрирующей аппаратуры типа анализаторов спектра (СК4-59 или фирмы РОДЕ и ШВАРЦ), имитатора активных дефектов, предназначенного для настройки СВЧ сенсора по дальности, была использована для получения экспериментальных результатов.



Рис. 1. Вариант комплекта ДИАД, сенсор СВЧ 10 ГГц

Волноводные секции СВЧ сенсора изготавливались из латуни с последующими полировкой и серебрением. Толщина серебряного покрытия была не менее 20 микрон. Обе секции, генераторная и смесительная, дополнительно оборудовались рупорными излучателями из меди. Площадь раскрыва рупоров 25×25 мм при длине рупора 50 мм. Принятый сигнал на выходе смесительного диода предварительно обрабатывался усилителем-демодулятором. Рабочая частота генератора составляла 9,8 ГГц, выходная мощность не более 50 мВт. Для удобства настройки на исследуемую поверхность были использованы лучи двух полупроводниковых лазеров, образующие одну точку (эллипс 2×3 мм) в случае удаления от поверхности раскрыва рупоров на 180 мм (рабочее расстояние дефектоскопа). Настойка СВЧ преобразователя-сенсора выполнялась с помощью специально изготовленных «Модулятора Проводимости» (частота модуляции 100 Гц) и «Имитатора активных дефектов» (частота модуляции 44 и 74 Гц). Площадь мгновенного обзора СВЧ полем составляет эллипс с размерами 30×32 мм при дальности 120...140 мм. На рис. 2 представлены результаты измерений. Изображения соответствуют файлам анализатора спектра фирмы РОДЕ и ШВАРЦ, полученным при экспериментах на стальных образцах с разрывной машиной, любезно предоставленной сотрудниками института Физики Прочности и Материаловедения СО РАН г. Томска.

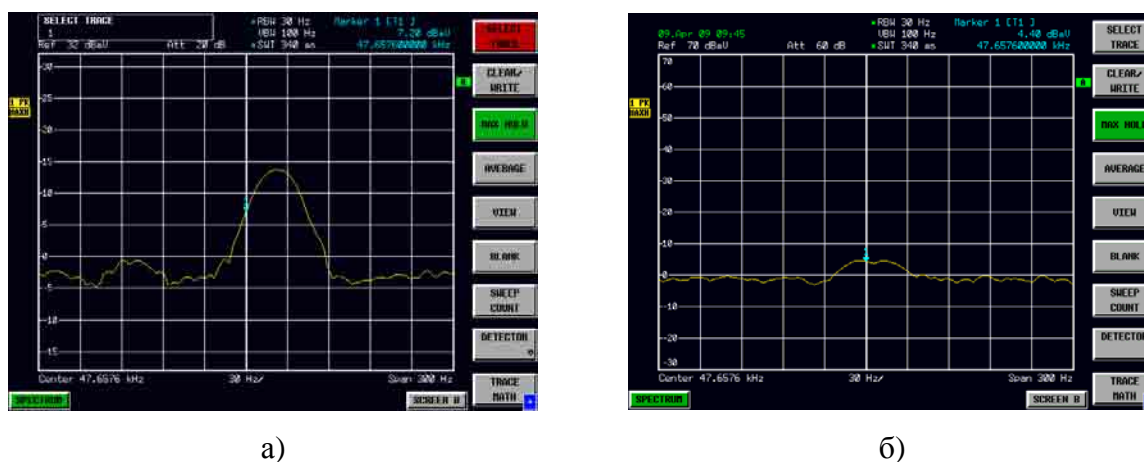


Рис. 2.

- а) распечатка файла полезного сигнала при растяжении стального образца,
б) распечатка файла при регистрации слабого сигнала (начало эксперимента)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженное явление, относящиеся к области неразрушающего контроля металлов при воздействии внешних факторов (механическое нагружение, ультразвук, поле СВЧ), относится к слабо изученным, не имеющим строгой теоретической базы. Авторам не известны экспериментальные работы, связывающие условия механического нагружения при дополнительном воздействии ультразвука небольшой мощности с появлением в спектре отраженного СВЧ поля сигналов с частотой приложенного ультразвука. Наиболее близкой к полному объяснению нового явления, по

совокупности эффектов, является теория, выдвинутая в работе [8]. Практическое использование обнаруженного явления возможно при бесконтактном контроле деталей, узлов, имеющих скрытые дефекты в виде трещин, отслоений, неплотностей прилегания, выполненных из металлов и сплавов [9–11]. В частности, доработанный прибор может быть использован для обнаружения дефектов железнодорожных колес во время движения состава мимо специально изготовленного прибора, состоящего из нескольких ультразвуковых передатчиков, установленных на рельсах, нескольких СВЧ сенсоров, неподвижно закрепленных рядом с колесом, на расстоянии 170...180 мм. Прямой экономический эффект достигается за счет исключения остановки состава, сокращения расхода энергии на последующее ускорение. Кроме того, прибор может найти применение для управления процессом резания металла. Экспериментальная установка с таким резцом показала возможность получения точности резания в пределах 0,2...0,3 микрона [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунов В. И. и др. А.С. № 1578636 «Способ регистрации сигналов акустической эмиссии» Приоритет изобретения 4364845, зарегистрированный 28 октября 1987г.
2. Горбунов В. И., Суторихин В. А. Возможности контроля предела упругих деформаций СВЧ методом /Дефектоскопия, № 7, с. 75–80, 1999.
3. Ультразвук. Глав. ред. И. П. Голямина. М., Советская энциклопедия, 1970, 400 с.
4. Бредов М. М., Румянцев В. В., Топтыгин И. Н. Классическая Электродинамика /под ред. И. Н. Топтыгина. М., Наука, 1985, 400 с.
5. <http://edu.ioffe.ru/edu/skobov/tt2/electronmet/Met4.pdf/> электромагнитные свойства металлов / свободный доступ.
6. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/solidst/physmet5.htm/> Лекция, экспериментальные методы исследования поверхности Ферми / свободный доступ.
7. Ishikawa K., Ogata T., Nagai K. // J. Mater. Sci. Lett., vol. 8, pp. 1326–1327, 1989.
8. Васильев Б. В., Любошиц В. Л. Теорема вириала и некоторые свойства электронного газа в металлах / Успехи Физических Наук, 4(164), с. 367–374, 1994
9. Суторихин В. А., Устинов Б. Ф. Устройство для обнаружения активных дефектов в металлических изделиях. Патент на ПМ № 81677. Приоритет изобретения 04.08.2008.
10. Горбунов В. И., Суторихин В. А., Устинов Б. Ф. Способ регистрации сигналов акустической эмиссии в металлах. Патент на способ №2372615. Приоритет изобретения 22 июля 2008 г.
11. Бричков С. А., Суторихин В. А. Устройство прецизионного позиционирования при обработке поверхности металлического изделия. Патент на ПМ № 85390. Приоритет ПМ 01 декабря 2008 г.