

УДК 621.386.12 +539.16.04

**ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ  
ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН  
В НАВОДОРОЖЕННЫХ МЕТАЛЛАХ**

Г.В. Гаранин, В.В. Ларионов, А.М. Лидер

Томский политехнический университет  
E-mail: garanin\_gv@tpu.ru

Описана лабораторная установка и приведены ее технические параметры. Показано, что схема измерений с высокой степенью точности позволяет определять содержание водорода в металлах на основе легких сплавов. Даны конкретные рекомендации по использованию разработанного устройства

**Ключевые слова:**

Ультразвуковые волны, легкие сплавы, наводороживание металлов.

**Введение**

Развитие космической техники, атомной энергетики, ракетно- и самолетостроения, газотурбинных двигателей требует создания устройств для контроля за содержанием водорода в изделиях из легких сплавов на основе титана для увеличения ресурсов их эксплуатации, исключения и прогнозирования причин водородной деградации изделий из титана, являющегося основной многочисленных деталей в перечисленных отраслях промышленности. Одним из распространенных методов контроля водородного воздействия на металлы легких

сплавов являются методы прямого воздействия на материал [1, 2]. Материал растягивают на испытательной машине, определяют предельную прочность и относительное удлинение до разрыва детали. Водородное охрупчивание металлов определяют на основе измерения микротвердости, термо-эдс, вихревых токов высокой частоты [3]. Содержание водорода определяют измерением скорости распространения ультразвуковых волн [4].

Физической основой контроля является зависимость скорости распространения акустических волн от физических свойств металлов, в частности от степени наводороженности металла. Наиболее эффективным методом измерения скорости распространения ультразвуковой (рэлеевской) волны в образцах является метод автоциркуляции. Применение рэлеевских волн в металлах обусловлено 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.

**Экспериментальная часть**

Для исследования использовали образцы из титана ВТ1-0 вдоль различных направлений проката исходного листа в виде прямоугольных листов с размером рабочей части 90×40 мм. Исходные образцы подвергали отжигу в вакууме в течение одного часа при температуре 750 °С с последующим охлаждением в печи. Образцы титана ВТ1-0 насыщали водородом на установке РСИ«GasReactionController» по методу Сивертса. Интегральное содержание водорода в образ-

**Гаранин Георгий Викторович**, зав. лаб. кафедры общей физики Физико-технического института ТПУ.

E-mail: garanin\_gv@tpu.ru

Область научных интересов: физико-химические и радиационные проблемы материаловедения.

**Ларионов Виталий Васильевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры общей физики Физико-технического института ТПУ.

E-mail: lvv@tpu.ru

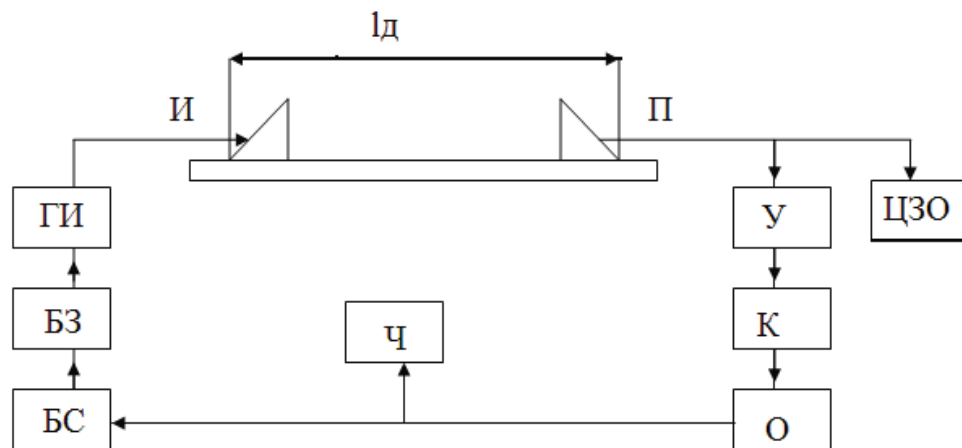
Область научных интересов: экспериментальные исследования поведения водорода в металлах.

**Лидер Андрей Маркович**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики Физико-технического института ТПУ.

E-mail: lider@tpu.ru

Область научных интересов: физико-химические и радиационные проблемы материаловедения.

цах титана контролируют плавлением на установке фирмы RHEN 602 LECO. Лабораторная установка для измерения скорости ультразвуковых (УЗ) волн приведена на рис. 1. Установка включает электронно-счетный частотомер ЧЗ-85/3, генератор импульсов Tabor 8500, цифровой запоминающий осциллограф Tektronix TDS 2024В, пьезопреобразователи с резонансной частотой 5 МГц. Измерения осуществляются следующим образом: генератор формирует импульс, который через излучатель создает в образце рэлеевскую волну. Импульс возбуждения распространяется по образцу и регистрируется приемником. Контроль параметров импульса обеспечивается с помощью цифрового осциллографа. Далее импульс усиливается широкополосным услителем, компаратор по заданному порогу формирует логический сигнал, который запускает одновибратор для формирования синхронизирующего импульса заданной длительности. Импульс с выхода одновибратора подается на измерительный вход частотомера и на синхронизирующий вход генератора, замыкая тем самым петлю обратной связи генератора. Используемая система расположения датчиков акустического стенда позволяет измерять частоту автоциркуляции в зависимости от расстояния между датчиками и их положения по длине образца. Для автоматизации системы измерения и сбора данных используется программное обеспечение, разработанное в инженерной среде LabView.



**Рис. 1.** Схема лабораторного устройства для измерения скорости распространения ультразвуковых волн в металле:  $l_d$  – базовое расстояние между излучателем и приемником; И – излучатель; П – приемник; У – широкополосный усилитель; К – компаратор; О – одновибратор; Ч – частотомер; БС – блок синхронизации; БЗ – блок задержки; ГИ – импульсный генератор; ЦЗО – цифровой запоминающий осциллограф

Для определения скорости распространения УЗ (рэлеевской) волны в металле необходимо измерить частоту автоциркуляции. Частота автоциркуляции зависит от времени распространения сигнала по образцу титана и по цепям обратной связи и равна:

$$f_{\text{Ц}} = \frac{1}{t_{\text{Зад}} + t_{\text{АП}} + t_{\text{ОБР}}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{Зад}}$  – время задержки возбуждающего импульса относительно запускающего импульса;  $t_{\text{АП}}$  – время задержки сигнала, определяющееся используемой аппаратурой;  $t_{\text{ОБР}}$  – время распространения волны в образце. Скорость распространения ультразвуковой волны в образце титана:

$$V_R = \frac{l_d}{t_{\text{ОБР}}}, \quad (2)$$

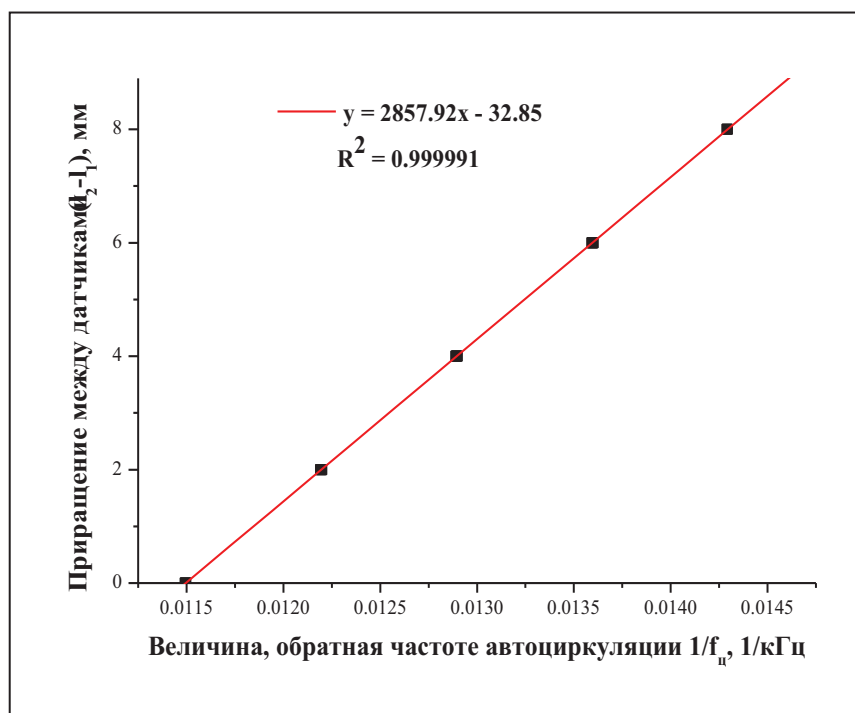
где  $l_d$  – базовое расстояние между излучателем и приемником датчика. Из уравнений (1) и (2) получают формулу для определения скорости ультразвука:

$$V_R = \frac{l_d}{\frac{1}{f_{\text{Ц}}} - (t_{\text{Зад}} + t_{\text{АП}})} = \frac{l_d f_{\text{Ц}}}{1 - (t_{\text{Зад}} + t_{\text{АП}}) \cdot f_{\text{Ц}}}. \quad (3)$$

Точность измерения скорости  $V_R$  можно увеличить путем изменения базового расстояния  $l_D$ . В этом случае выражение (3) для  $V_R$  принимает вид

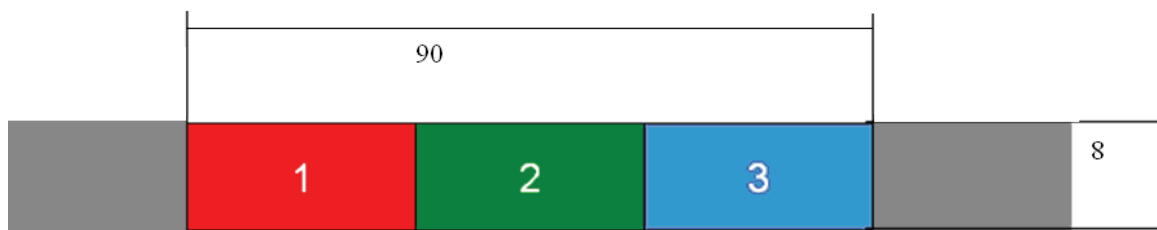
$$V_R = \frac{l_{D_1} - l_{D_2}}{\frac{1}{f_{ц_1}} - \frac{1}{f_{ц_2}}} \quad (4)$$

В выражении (4) измеряемыми параметрами являются базовые длины датчика и соответствующая им частота автоциркуляции. Точность измерения  $V_R$  зависит от точности изменения базы  $l_{Di}$ . При этом величина  $V_R$  определяется из уравнения линейной регрессии  $V_R$  от  $1/f_{ц}$ ;  $l_{Di}$  (рис. 2). Значение коэффициента  $R^2 = 1$  свидетельствует о высокой методической и аппаратурной точности схемы акустических измерений для определения скорости распространения ультразвуковой (рэлеевской) волны.

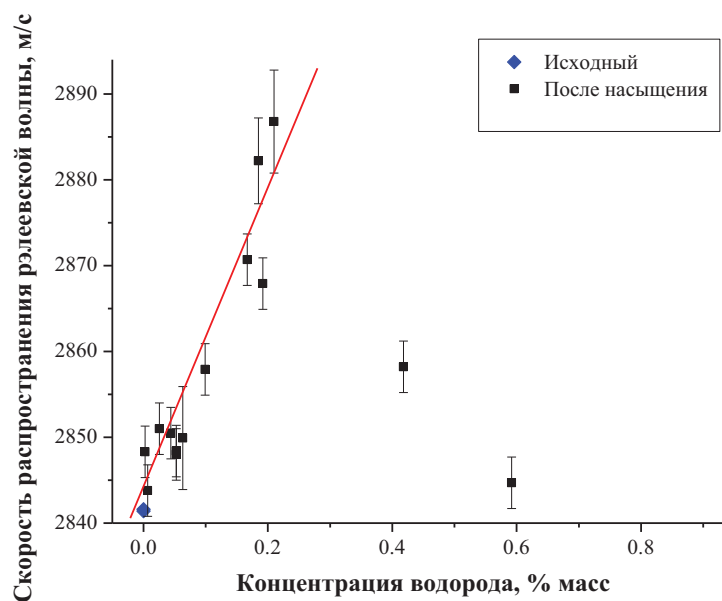


**Рис. 2.** Связь между обратной частотой автоциркуляции и изменением расстояния между датчиками измерительной установки

В качестве основных применяли датчики с резонансной частотой 5 МГц. Начальное расстояние между датчиками выбрано равным  $l_D = 20$  мм. Измерение частоты автоциркуляции осуществляли с шагом 5...10 мм по длине рабочей части образца не менее чем в 12 точках. Схематично области 1–3 измерения представлены на рис. 3. Для увеличения точности измерения необходимо проводить в 5 точках при каждом из положений датчиков при исходном базовом расстоянии между датчиками и с приращением расстояния между датчиками на 2, 4, 6 и 8 мм. График зависимости скорости рэлеевской волны от концентрации водорода в образце показан на рис. 4. С увеличением концентрации водорода в испытуемом образце в диапазоне концентраций от 0 до 0,21 массовых процента скорость рэлеевской волны линейно возрастает. Наводороживание титанового сплава ВТ1-0 в данном интервале концентраций приводит к росту внутренних напряжений, к росту модуля упругости (соответственно увеличению скорости распространения УЗ волн). Уменьшение скорости рэлеевской волны в диапазоне концентраций водорода в образце от 0,21 до 0,60 массовых % объясняется образованием множественных дефектов и значительным ухудшением прочностных характеристик материала.

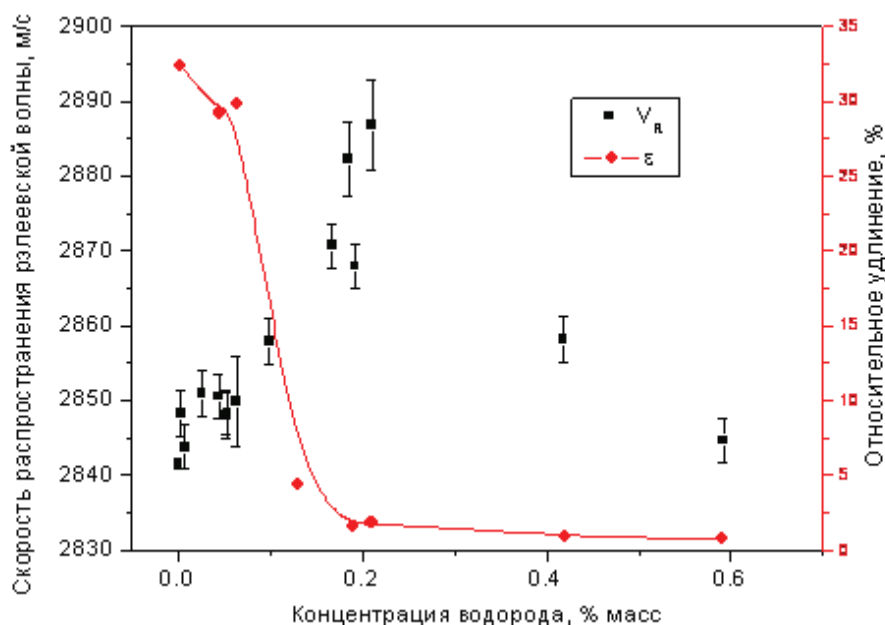


**Рис. 3.** Пример образца из титана. 1, 2, 3 – области, в которых проводят измерения скорости распространения ультразвуковой волны.

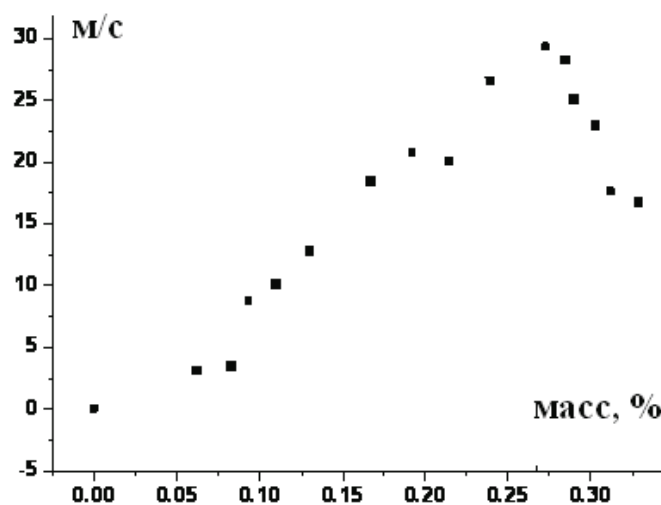


**Рис. 4.** Зависимость скорости ультразвуковой волны от концентрации водорода в образце титана

Для сравнения полученных выводов акустическим методом и методом нагружения (удлинения) образцов на рис. 5 приведены соответствующие зависимости от концентрации водорода. Наблюдается однозначная корреляция между началом значительного увеличения скорости ультразвуковой (рэлеевской) волны в образце и потерей пластичности в нем. На рис. 6 приведено изменение скорости УЗ волн от концентрации водорода в титане. Обнаруженная зависимость имеет ярко выраженный максимум и состоит из двух ветвей. Восходящая ветвь имеет вид, характерный для различных марок наводороженных сталей, нисходящая аналогична наводороженному палладию. Это может свидетельствовать об уникальных свойствах наводороженных легких сплавов на основе титана.



**Рис. 5.** Скорость распространения ультразвуковой волны в наводороженном титане и относительное удлинение образца от концентрации водорода в титане



**Рис. 6.** Зависимость изменения скорости ультразвуковой волны от содержания водорода в титане

Во всех экспериментах наблюдается четкая корреляция между относительным изменением скорости рэлеевской волны по длине образца и содержанием водорода. Чем больше концентрация водорода в титане ВТ1-0, тем больше отклонение точек графика функции, отражающего зависимость между относительным значением скорости рэлеевской волны и положением датчика в наводороженных образцах. Выявлено, что после наводороживания по методу Сиверста относительное распределение скорости рэлеевской волны по длине образцов является неравномерным. На неравномерность пространственного распределения упругих свойств оказывает влияние неоднородность насыщения образцов с размерами рабочей части  $90 \times 8$  мм из-за существующего температурного градиента по длине камеры, в которой происходит насыщение сплава ВТ1-0 водородом.

### Заключение

Разработана лабораторная установка, позволяющая проводить измерения содержания водорода в легких сплавах по скорости распространения УЗ-волн. Эффективность измерений зависит от выбора частоты автоциркуляции, базового расстояния между приемником и излучателем и контролируется посредством корреляции между скоростью ультразвуковых волн и величиной обратной частоты автоциркуляции. Эта связь должна быть линейной. Устройство может быть применено для анализа содержания водорода в легких сплавах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коттерилл П.В. Водородная хрупкость металлов. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 245 с.
2. Ткачев В.И., Витвицкий В.И., Холодный В.И. Сравнительная оценка водородостойкости сталей и сплавов // Материаловедение. – 2006. – № 1. – С. 54–56.
3. Чернов И.П., Черданцев Ю.П., Мамонтов А.П., Панин А.В., Никитенков Н.Н., Лидер А.М., Гаранин Г.В. и др. Неразрушающие методы контроля водородного охрупчивания конструкционных материалов // Альтернативная энергетика и экология. – 2009. – № 2. – С. 15–22.
4. Yang C.-H., Huang M.-F. Characterization of hydrogen concentration in Zircaloy claddings using a low-frequency acoustic microscope with a PVDF/LFB transducer // J. Nucl. Mater. – 2004. – V. 335. – № 3. – P. 359–365.

Поступила 10.05.2012 г.