

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Лунёв А.Г.^{1,4}, Баранникова С.А.^{1,2,3}, Бочкарёва А.В.^{1,4}, Зуев Л.Б.^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

³Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

⁴Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

agl@ispms.ru

Одним из направлений неразрушающего контроля физико-химических свойств материалов является физическая акустика. Основные фундаментальные исследования в данном направлении были проведены в середине 20-го века и представлены в работах Мэзона [1], Труэлла [2] и других авторов [3,4]. В частности, было показано, что изменение структуры и химического состава металлов и сплавов приводит к изменению их акустических свойств. К таким акустическим свойствам относится скорость распространения ультразвуковых волн и их затухание. Так, например, влияние изменяющейся в процессе деформации дислокационной структуры металла на скорость и затухание акустических волн было сформулировано в рамках теории дислокационного внутреннего трения Гранато и Люке. Недавно данная теория была расширена [5] и вошла в новую теорию как частный случай. Известны работы, в которых исследовалось влияние на скорость ультразвука изменения структуры, вызванное режимами термообработки [3]. Также известны результаты исследования изменения внутреннего трения и скорости рэлеевских волн [6] от степени насыщения металлов и сплавов водородом. В присутствии водорода изменяется интенсивность и скорость накопления дефектов на стадиях однородного и локализованного повреждения материала. Стадия однородного повреждения в водороде сопровождается активной релаксацией микронапряжений. В настоящей работе представлены результаты исследования влияния времени электролитического насыщения водородом на акустические характеристики нержавеющей стали 40X13. Результаты получены аккуратным измерением скорости и затухания рэлеевских волн, как ненагруженных образцов, так и непосредственно в процессе пластического деформирования, вплоть до разрушения.

Образцы для наводороживания изготавливались из листа нержавеющей стали 40X13 электроискровым способом в виде двухсторонней лопатки с размерами рабочей области 10x2,4x50 мм³. Перед наводороживанием образцы подвергались закалке на воздухе от температуры 1050°C, после чего отпускались выдержкой в печи при температуре 600°C в течение 3 часов с последующим охлаждением в печи.

Механические испытания проводились по схеме одноосного растяжения при комнатной температуре с использованием универсальной машины Walter+Bai AG со скоростью 6,67·10⁻⁵ с⁻¹. Наводороживание образцов осуществляли в трехэлектродной электрохимической ячейке при постоянном катодном потенциале $U = -600$ мВ, задаваемом относительно хлор-серебряного электрода сравнения, в 1N растворе серной кислоты с добавлением тиомочевины 20 мг/л при температуре 50°C.

Скорость распространения рэлеевских волн определялась как отношение длины пути волны в образце ко времени задержки сигнала на приемном преобразователе относительно излучающего. Время задержки измерялось по осциллограмме, записанной с помощью цифрового осциллографа с частотой дискретизации 2 ГГц. Точность измерения составляет 10⁻⁴ – 10⁻⁵. Суть измерения времени задержки заключается в следующем. Осциллограмма, записываемая осциллографом, представляет собой развертку колебания приемного преобразователя во времени. Начало отсчета времени – время запуска импульса на излучающем преобразователе. Время прихода сигнала определяется по моменту пересечения сигналом нулевого уровня. При этом используется аппроксимация сигнала прямой линией вблизи

нулевого уровня, что позволяет достичь требуемой точности. Полученное в результате время задержки, уменьшается на время распространения волны в волноводе датчика.

Одновременно со скоростью звука измерялось затухание. Ввиду сложности учета потерь, связанных с пьезопреобразованием и акустическим контактом датчика с исследуемой средой, в экспериментах регистрировалось изменение затухания в процессе нагружения относительно ненагруженного состояния. В этом случае изменение затухания записывается как

$$\Delta\alpha = \ln\left(\frac{E_0}{E_t}\right)/2d,$$

где d – длина пути рэлеевской волны в образце, E_0 – энергия сигнала в ненагруженном образце, E_t – энергия сигнала в нагруженном образце.

В качестве передающего и приемного преобразователей использовались пьезопреобразователи с резонансной частотой 5 МГц.

Первоначально мы провели измерения скорости распространения рэлеевских волн в образцах нержавеющей стали в пяти состояниях. Первое состояние – закаленное (закалка на воздухе от температуры 1050°C) с последующим высоким отпуском при температуре 600°C в течение 3 часов с последующим охлаждением в печи (подготовка к наводороживанию), второе и третье состояния – после насыщения водородом в течение 12 и 24 часов, соответственно. Результаты измерения скорости ультразвуковых волн V_s и механические характеристики образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Акустические и механические свойства образцов

№	Состояние образцов	V_s , м/с	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %
1	Закалка + отпуск	3021±3	218	1251	12,9
2	Закалка + отпуск + водород 12 ч	3013±3	132	922	9,8
3	Закалка + отпуск + водород 24 ч	3027±3	73	798	4,7

При наводороживании скорость звука изменяется неоднозначно, по-видимому, существует экстремум на зависимости скорости звука от концентрации водорода в образце. На неоднозначность влияния водорода на скорость рэлеевских волн обратили внимание авторы работы [6], однако они отмечают, что эффект исчезает при больших временах выдержки образцов после наводороживания. Кроме того, необходимо отметить, что для измерения скорости звука авторы упомянутой работы использовали метод автоциркуляции импульсов, на погрешность измерений которого оказывает значительное влияние затухание акустической волны в объекте контроля. Снижение скорости рэлеевских волн при низкой степени наводороживания (в нашем случае в течение 12 часов) мы связываем с сорбцией атомов водорода вблизи дислокаций [7], что приводит к увеличению дислокационного внутреннего трения и, как следствие, снижению скорости ультразвуковых волн, согласно теории Гранато-Люкке [8]. Дальнейшее наводороживание может приводить к формированию областей скопления молекулярного водорода. Вследствие чего растут сжимающие напряжения первого рода [7], что приводит к росту скорости звука. Однако при больших концентрациях водорода в легированных сталях возможно сложное физико-химическое взаимодействие водорода с компонентами сплава, вследствие чего выделить факторы, влияющие на скорость звука, не представляется возможным.

Методика измерения скорости и затухания рэлеевских волн позволяет нам регистрировать изменение акустических параметров материала непосредственно в процессе деформирования. Поэтому испытания на растяжение образцов стали 40Х13 проводились одновременно с регистрацией изменения скорости и затухания волн Рэлея. Полученные результаты приведены на рис. 1.

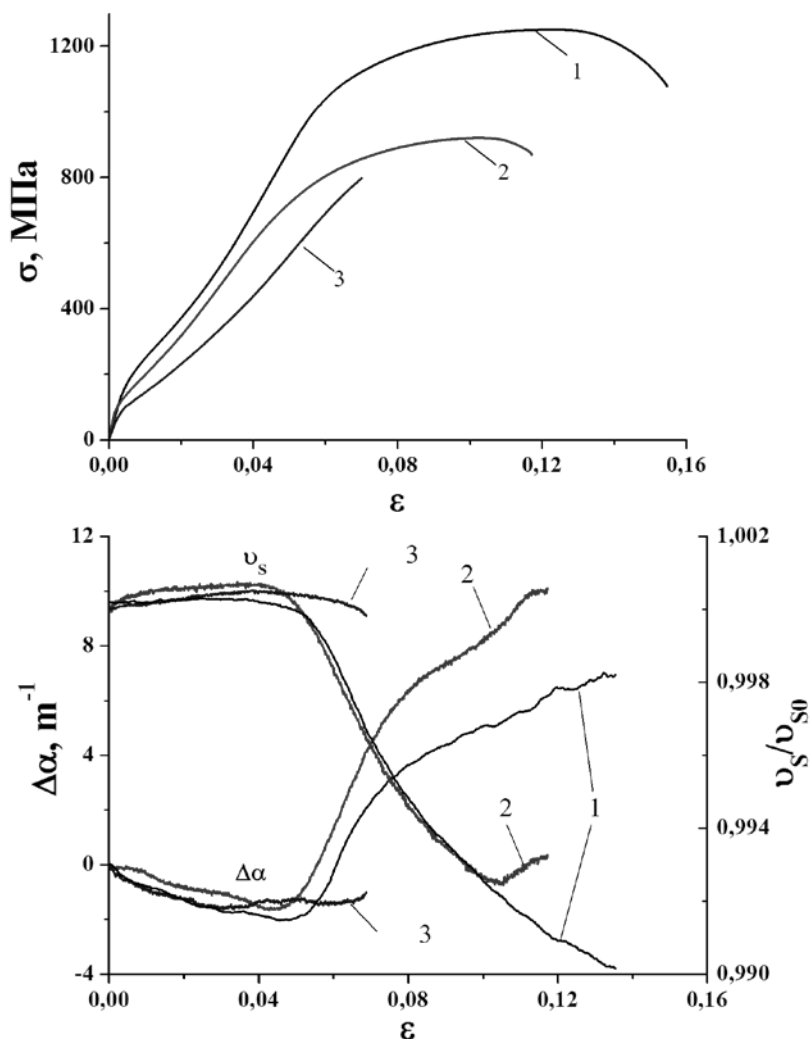


Рис. 1. Зависимости напряжений и акустических свойств от деформации стали 40X13 в трех состояниях

На фоне значительной деградации механических свойств с увеличением концентрации водорода в образце относительное изменение скорости распространения волн Рэлея, в целом, происходит однотипно для всех состояний. При этом, по-видимому, наибольшее влияние водород оказывает на изменение дислокационного внутреннего трения в процессе пластического течения образца, что проявляется в изменении затухания акустических волн.

Таким образом, использование точного измерения акустических свойств металлических материалов позволяют проводить оценку влияния водорода на их пластичность. Затухание акустических волн является основным информативным параметром исследования деформации наводороженных образцов.

Список литературы

1. Физическая акустика = Physical acoustics: пер. с англ. / под ред. У. П. Мэзона. — Москва: Мир, 1966-Т. 1. Ч. А: Методы и приборы ультразвуковых исследований. — 1966. — 592 с.: ил.
2. Труэлл, Рон. Ультразвуковые методы в физике твердого тела : пер. с а нгл. / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. — Москва: Мир, 1972. — 307 с.: ил.
3. Муравьев, В.В. Скорость звука и структура сталей и сплавов / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л., Комаров. — Новосибирск: Наука, 1996.— 219 с.
4. Ультразвуковые методы исследования дислокаций : сборник статей: пер. с англ. / под ред. Л. Г. Меркулова. — Москва: Изд-во иностранной литературы, 1963. — 376 с.: черт.
5. Ultrasound as a probe of plasticity? The interaction of elastic waves with dislocations / A. Maurel [et al.] // International Journal of Bifurcation and Chaos.— 2009.— V. 19 (8).— p. 2765-2781.
6. Поведение водорода в нержавеющей стали в процессе радиационного воздействия / И. П. Чернов [и др.] // Альтернативная энергетика и экология: международный научный журнал. — 2006. — № 6. — С. 58-59.
7. Карпенко, Георгий Владимирович. Влияние водорода на свойства стали / Г. В. Карпенко, Р. И. Крипьякевич. — Москва: Металлургиздат, 1962. — 197 с. — Библиогр.: с. 189-196.
8. Theory of Mechanical Damping Due to Dislocations / A. Granato, K. Lücke // Journal of Applied Physics. — 1956.— V. 27.— p.583-593.