

# РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© 2022 г. Дмитрий Александрович Рябов\*, А. А. Хлыбов\*\*

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950  
г. Н. Новгород, улица Минина, 24

\* - ryabovdm1996@gmail.com; \*\* - hlybov\_52@mail.ru

Одним из проблемных узлов ЯЭУ является парогенератор, трубчатка которого изготавливается из титанового сплавов ПТ-7М [1]. Анализ разрушения теплообменных труб показал, что причиной деградации материала в этой зоне является чрезмерное содержание водорода. Негативное действие водорода чаще всего проявляется в виде водородной хрупкости [1, 2], которая характеризуется снижением пластичности и вязкости титановых сплавов. Анализ современных исследований показывает, что проблема, связанная с изучением наводороживания титановых сплавов в процессе длительной эксплуатации и разработкой методов мониторинга содержания водорода является актуальной. Целью исследовательской работы является разработка современных неразрушающих подходов к оценки наводороженного состояния (охрупчивания) титановых  $\alpha$ -сплавов на примере сплава ПТ-7М с использованием методов физической акустики.

В данной работе исследования проводили на трубчатых и плоских образцах из  $\alpha$ -титанового сплава ПТ-7М. Образцы подвергали наводороживанию при температурах 200°C - 500°C в течение 30 минут для каждой температуры. После насыщения образцы имели различные массовые доли водорода. Также для проведения исследований использовали образцы, вырезанные из теплообменной трубы парогенератора РУ, который эксплуатировался в течение  $\sim 10^5$  ч. Для акустических измерений использовался измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» и датчики поперечных и продольных волн с частотой 5 МГц.

Для практического применения акустических методов оценки степени наводороживания удобнее использовать акустический диагностический параметр  $D_\tau$  [1]:

$$D_\tau = \frac{\tau_t^{II} + \tau_t^+}{\tau_l},$$

где  $\tau_t^{II}$  [нс] – время распространения импульса упругой сдвиговой волны с продольной поляризацией;  $\tau_t^+$  [нс] – время распространения импульса упругой волны сдвиговой с поперечной поляризацией;  $\tau_l$  [нс] – время распространения импульса упругой продольной волны.

Микроструктурный анализ наводороженных образцов показал (рис. 1а,б), что титановый сплав ПТ-7М склонен к значительному наводороживанию при температурах свыше 400 °С.

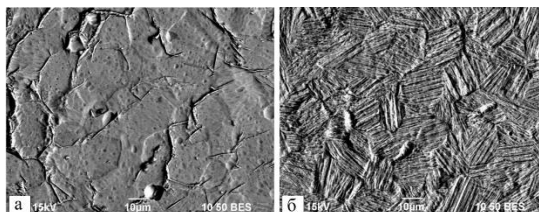


Рис. 1. Микроструктуры наводороженных образцов: а - при 500 °С на внешней (С[Н] = 0, 01 масс. %), б – на внутренней (С[Н] = 0,1 масс. %) поверхностях образца

Комплекс исследований сплава ПТ-7М продольными и поперечными волнами показывает чувствительность данного типа волн к структурным изменениям, вызванным поглощением водорода. Результаты (рис. 2а,б) доказывают, что выбранный в качестве диагностического параметра акустический параметр D является достаточно информативным и может быть использован при диагностике охрупченного состояния изделий из титановых сплавов после контакта с водородосодержащими средами.

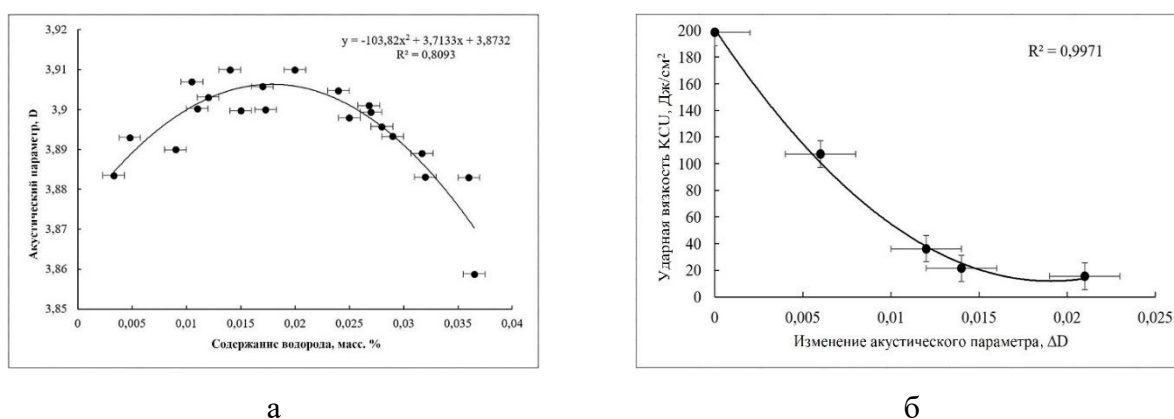


Рис. 2. Зависимость акустического параметра D от массовой доли водорода (а) и зависимость ударной вязкости сплава ПТ-7М от изменения акустического параметра D

Таким образом, полученные зависимости акустического параметра D от содержания водорода в сплаве ПТ-7М позволяют проводить техническую диагностику водородного охрупчивания материала трубных систем, а также оценивать их остаточный ресурс.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Khlybov A.A., Ryabov D.A., Pichkov S.N., Shishulin D.N., Zakharov D.A. Developing an Acoustic Method for Determining the Degree of Hydrogenation in Structures Made of Titanium Alloys. Russian Journal of Nondestructive Testing. Vol. 55 (4), pp. 255-261.
2. Khlybov A.A., Ryabov D.A., Pichkov S.N., Shishulin D.N. Study of the hydrogenation effect on the structure and flattening of tubular samples of PT-7M titanium alloy/ Tsvetnye Metally. 2021. No. 4. pp. 71–77.