

**Константин Михайлович Ладейщиков^{1,2*}, Родион Петрович Карагерги¹,
Александр Владимирович Козлов¹**

¹Акционерное Общество Институт Реакторных Материалов, г. Заречный, Россия

²ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

*k.ladeish@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕРЖАВЕЮЩИХ АУСТЕНИТНЫХ И ФЕРРИТОМАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

Определение характеристик упругости является важной задачей для инженерно-технических расчётов поведения конструкций при эксплуатации. В работе продемонстрированы возможности оригинальной установки по определению характеристик упругости неразрушающим ультразвуковым динамическим резонансным методом. Получены диаграммы характеристик упругости материала тонкостенных труб из сталей X16H19 аустенитного и X12C феррито-мартенситного класса при изменении температуры в диапазоне температур от 25°C до 600°C. Полученные температурные зависимости имеют линейный характер, что свидетельствует о фазовой стабильности исследованных материалов, вплоть до температур 600°C.

Ключевые слова: ультразвуковой динамический резонансный метод, тонкостенная труба, модуль Юнга, модуль сдвига, температурная зависимость, аустенитная и феррито-мартенситная стали.

Konstantin M. Ladeyshchikov^{1,2}, Rodion P. Karagergi¹, Alexander V. Kozlov¹

¹ Joint Stock Company Institute of Reactor Materials, Zarechny, Russia

² "UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin", Yekaterinburg

DETERMINATION OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF STAINLESS AUSTENITIC AND FERRITE-MARTENSITIC STEELS

Determination of elasticity characteristics is an important task for engineering calculations of structural behavior in operation. The paper demonstrates the capabilities of the original installation for determination of elasticity characteristics by non-destructive ultrasonic dynamic resonance method. The diagrams of material elasticity characteristics of thin-walled pipes made of steels X16H19 of austenitic and X12C of ferrite-martensitic class at temperature change in the temperature range from 25°C to 600°C have been obtained. The obtained temperature dependences have a linear character, which indicates the phase stability of the studied materials up to temperatures of 600°C.

Keywords: ultrasonic dynamic resonance method, thin-walled tube, Young's modulus, shear modulus, temperature dependence, austenitic and ferrite-martensitic steels.

Упругие характеристики материала, такие как модуль Юнга и модуль сдвига, являются важными величинами для инженерно-конструкторских

расчетов и моделирования поведения изделий при их эксплуатации. В настоящее время разработано множество установок для проведения неразрушающего контроля, использующих различные методы, которые делятся на два основных направления: дефектоскопию и контроль физических параметров материала. При исследовании физических параметров ряд преимуществ имеет ультразвуковой динамический резонансный метод, который позволяет контролировать упругие характеристики материалов, проработавших длительное время в напряженном состоянии при повышенных температурах, в условиях действия различных видов излучения.

В Институте реакторных материалов была разработана оригинальная установка для определения характеристик упругости материалов ультразвуковым динамическим резонансным методом. В дальнейшем установка была усовершенствована специалистами МИФИ и на данный момент смонтирована на площадке Института реакторных материалов.

Ультразвуковой динамический резонансный метод основан на зависимости скорости звука и частоты собственных колебаний, возбуждаемых в образце, от характеристик упругости материала, из которого он изготовлен, и заключается в измерении резонансных частот вынужденных изгибных, продольных или крутильных колебаний образца. В описанном выше методе нет принципиальных ограничений для использования образцов практически любой формы: дисков, стержней различного поперечного сечения, трубчатых образцов и т.д. Основными преимуществами данного метода являются: точность определения упругих характеристик до 2%, возможность регистрации температурных зависимостей в температурном диапазоне от 25 до 1000°C, одновременная регистрация резонансных частот продольных и сдвиговых колебаний. Данный метод является неразрушающим.

Функциональная схема устройства представлена на рис 1. Образец 1 закрепляют в измерительном устройстве между двумя заостренными концами звукопроводов 2 и 3, соединёнными с пьезоэлектрическими преобразователями 5 и 6. Один из них возбуждает ультразвуковые колебания за счет усилителя генератора электрических колебаний изменяемой частоты и создает механические колебания. Второй принимает механические колебания измеряемого изделия, преобразует их в электрические и передаёт через блок сопряжения на управляющий компьютер. Затем образец передвигается в центр печи к нагревателям 10, контроль температуры осуществляется хромель-алюмелевой термопарой. Система заполнения инертным газом включается в себя форвакуумный насос и баллон с инертным газом.

В момент совпадения частоты генератора с частотой собственных колебаний образца возникает резонанс; амплитуда сигнала на входе блока управления достигает максимального значения.

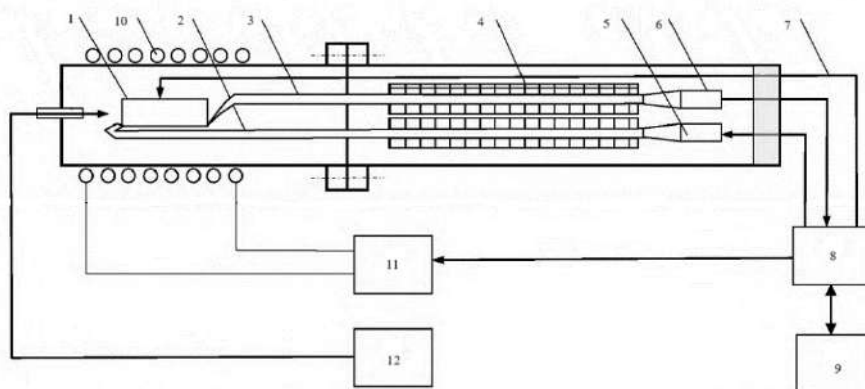


Рис. 1. Схема устройства: 1 - образец; 2 - возбуждающий звукопровод; 3 - приёмный звукопровод; 4 - демпфер; 5- возбуждающий пьезопреобразователь; 6 - приёмный пьезопреобразователь; 7 - термопара; 8 - блок сопряжения; 9 - управляющий компьютер; 10 - нагреватель; 11 - блок питания нагревателя; 12 - система заполнения инертным газом;

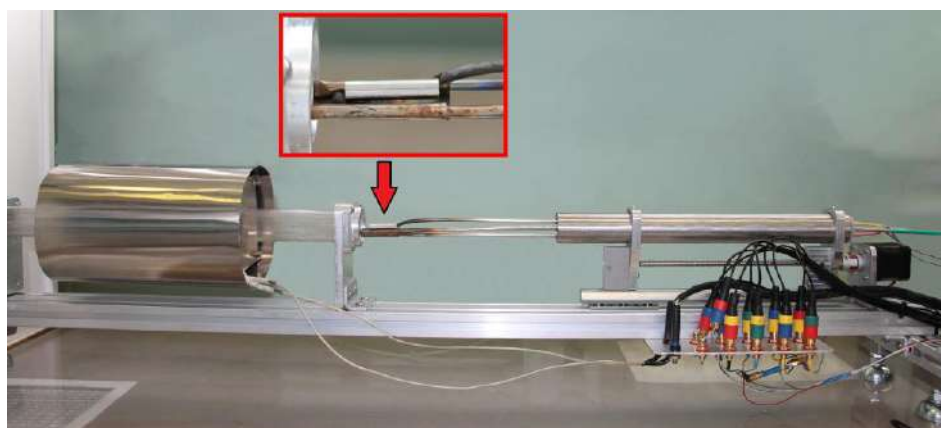


Рис 2. Вид прибора

В Программном обеспечении реализован механизм слежения за двумя выбранными резонансными пиками в процессе нагрева и охлаждения исследуемого образца. Он обеспечивает автоматическую подстройку центральной частоты, ширины окна просмотра, измерение частот и ширины выбранных резонансных пиков, а также коэффициентов усиления входного каскада усилителя в процессе изменения температуры образца.

В верхней части основного окна программы рис 4. (а) отображается основной график амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) исследуемого образца в частотном диапазоне, который задаётся выбором минимального и максимального значения в кГц непосредственно на графике. Параметры отслеживаемых пиков резонансных сдвиговых и продольных частот автоматически регистрируются в виде графиков представленных на рис 4. (б,в). Программа позволяет управлять передвижением образца в зону нагрева и герметизацией рабочего объема, задать температуру и время нагрева, параметры регистрации сигналов.

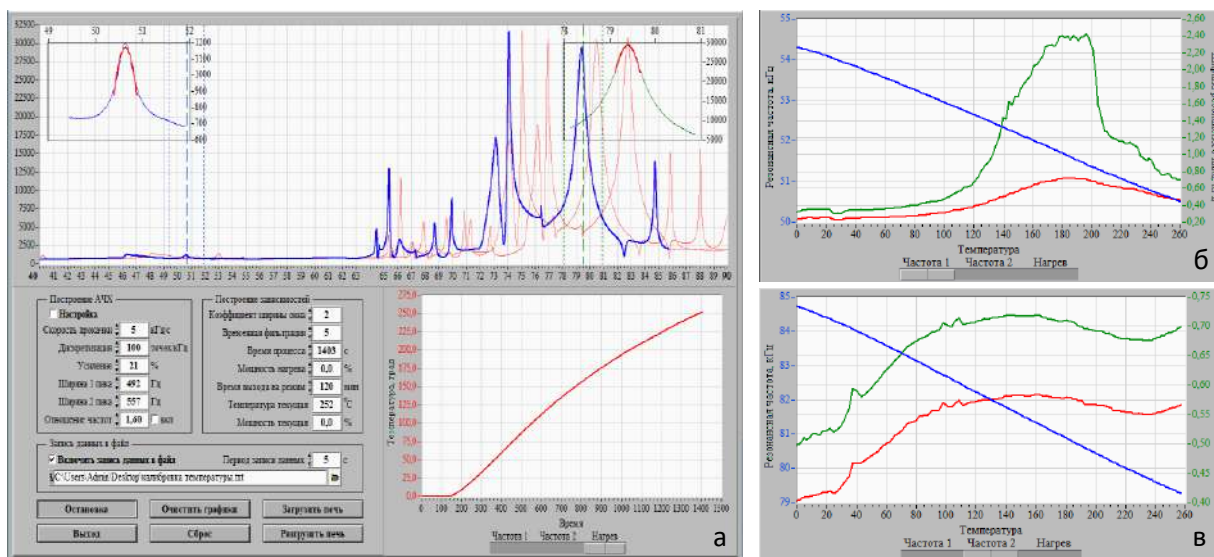


Рис 4. Программное обеспечение прибора: а - основное окно программы, б – диаграмма изменений параметров сдвиговой резонансной частоты, в - диаграмма изменений параметров продольной резонансной частоты

Зная плотность и длину образцов, используя формулы 1, 2 можно рассчитать упругие характеристики материала: модуль Юнга- E и модуль сдвига - G .

$$E = 4 \cdot \rho \cdot l^2 \cdot f_n^2 \cdot K_T \quad (1)$$

$$G = 4 \cdot \rho \cdot l^2 \cdot f_k^2 \cdot K_T \cdot K_\Phi \quad (2)$$

где ρ – плотность материала образца, кг/м³, l – длина образца, м., f_n – резонансная частота продольных колебаний образца на первой гармонике, Гц, f_k – резонансная частота сдвиговых колебаний образца на первой гармонике, Гц, $K_T = \frac{1}{1 + \alpha \cdot T}$ – безразмерный поправочный коэффициент, учитывающий термическое удлинение образца при проведении высокотемпературных испытаний, α – коэффициент термического расширения материала, 1/°С, T – температура испытания, °С, K_Φ – безразмерный поправочный коэффициент формы образца, для цилиндрических и трубчатых образцов $K_\Phi=1$.

В качестве исследуемых материалов были взяты две тонкостенные трубки из сталей X16H19 и X12C. Такие трубы используются в качестве оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах. У каждого образца были измерены характеристики упругости при температуре 25 °С, затем их нагревали до температуры 600 °С при скорости нагрева 5 °С/мин. Во время нагрева непрерывно регистрировали изменения резонансной продольной и сдвиговой частоты. Из полученных результатов рассчитали по формулам 1 и 2 Модуль Юнга и модуль сдвига материалов и также построили их зависимости от температуры рисунок 2.

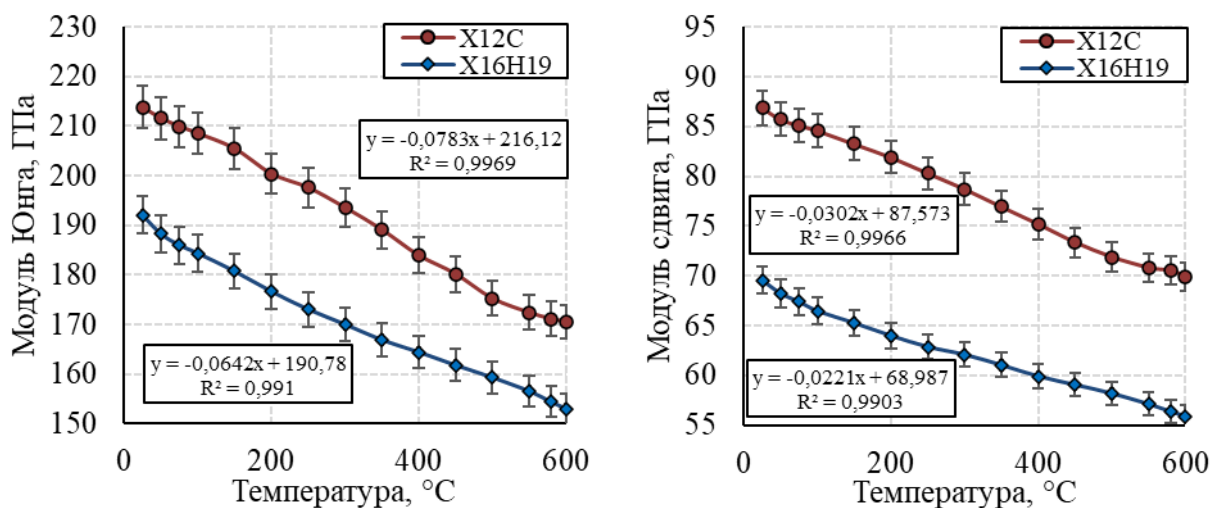


Рис. 5. График зависимости изменения модуля Юнга и модуля Сдвига от температуры

На протяжении всего нагрева упругие характеристики материалов линейно уменьшаются, без видимых выбросов значений. Полученные зависимости свидетельствуют о том, что данные материалы обладают фазовой стабильностью. У обеих сталей при увеличении температуры с 25 °C до 600 °C модули Юнга и сдвига уменьшаются. Относительные изменения в пределах погрешности определения для обоих материалов и характеристик одинаковы и составляют ~20%.

Выводы

Разработана и введена установка для измерения характеристик упругости, ультразвуковым динамическим резонансным неразрушающим методом.

С использованием программного обеспечения получены зависимости модулей Юнга и сдвига образцов тонкостенных труб из сталей X16H19 и X12C в температурном интервале от 25 до 600 °C, свидетельствующие о фазовой стабильности обоих материалов в этом температурном интервале

Установка позволяет проводить измерения не только образцов необлученных материалов, но и материалов на с наведенной активностью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аверин Е.Б., Методы и устройства для исследований физико-механических свойств материалов / Е.Б. Аверин [и др.]// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерная техника и технология, 1992, вып. 2, с. 43—51.
2. Драпкин Б.М. свойства сплавов в экстремальном состоянии / Б.М. Драпкин, В.К. Конононенко, В.Ф. Безъязычный. М: «Машиностроение», 2004. 44 с.

REFERENCES

1. Averin, E.B., Methods and devices for research of physical and mechanical properties of materials / E.B. Averin [et al.]// Voprosy atomnoy nauki i tekhnika. Nuclear Engineering and Technology, 1992, vol. 2, p. 43-51.
2. Drapkin, B.M. Properties of Alloys in Extreme State / B.M. Drapkin, V.K. Konononenko, V.F. Bezyazychny. M: "Mashinostroenie", 2004. 44 с.