

УДК 620.178

С.Е. Невский, А.Ю. Горохов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТА МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ УСТАЛОСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Дзержинский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Приведены сведения о специальном оборудовании для исследования материалов на стабильность упругих свойств при многоцикловом нагружении с частотой в сотни герц. Даются экспериментальные данные влияния режимов термообработки сталей на предел усталости и дефект модуля упругости.

*Ключевые слова:* усталость, термообработка, модуль упругости.

К современным гидроакустическим излучателям, используемым в акустической океанографии, предъявляются высокие требования. Излучатели должны развивать акустическую мощность в десятки киловатт в режиме когерентного излучения и обеспечивать высокую эффективность преобразования энергии. Весо-габаритные характеристики должны допускать их использование в морских условиях. Исходя из этого материалы, применяемые для изготовления упругих элементов излучателей, служащих для преобразования электрических колебаний в механические, должны выдерживать высокие амплитудные напряжения на базе в сотни миллионов циклов нагружения и обладать стабильностью частоты собственных колебаний. Так, относительное изменение частоты колебаний не должно превышать 1% в процессе работы излучателя.

Необходимые сведения о свойствах и поведении материалов, работающих в указанных условиях, а также влиянии на них технологических факторов в литературе отсутствуют. Стандартные методики не позволяют осуществлять многоцикловое усталостное воздействие при определении модуля упругости.

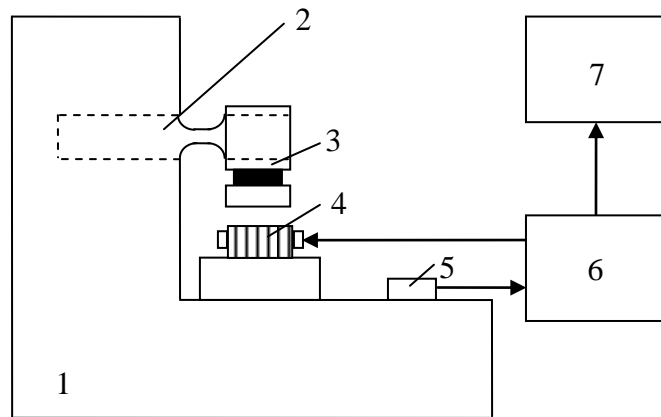
Нашей задачей явилось создание специального испытательного оборудования и проведение на нем необходимых исследований. При этом учитывалось, что для заданных практических целей необходимо знать относительное изменение упругих постоянных, а не их абсолютные значения.

В разработанной установке стабильность упругих свойств материалов оценивается на основе изменения частоты собственных колебаний образцов. Вид деформации – консольный изгиб. Установка работает в автоколебательном режиме на частоте собственных колебаний образца. Диапазон исследуемых параметров: амплитуда колебаний образца 0,3–3 мм; максимальное напряжение цикла нагружения 100–1000 МПа; частота механических колебаний 150–300 Гц. Частоты колебаний и схема нагружения определяются условиями работы реальных изделий.

Установка (рис. 1) состоит из трех основных элементов: станины 1, блоков питания и автоматики 6, а также средств измерения параметров колебательного процесса 7.

Испытываемый образец 2 жестко крепится одним концом в станине, другим к ферромагнитному якорю 3. Статор электромагнитного возбудителя 4 жестко крепится к станине через виброизоляционные прокладки. Станина воспринимает колебания образца и передает их пьезоэлектрическому датчику 5.

Сигнал с датчика поступает в блок управления 6, который вырабатывает импульсы тока для питания катушки электромагнитного возбудителя с частотой, равной частоте собственных колебаний образца. Блок управления содержит усилитель-преобразователь, резонансный тиристорный инвертор, формирователь импульсов управления тиристорами, стабилизатор амплитуды колебаний образца.

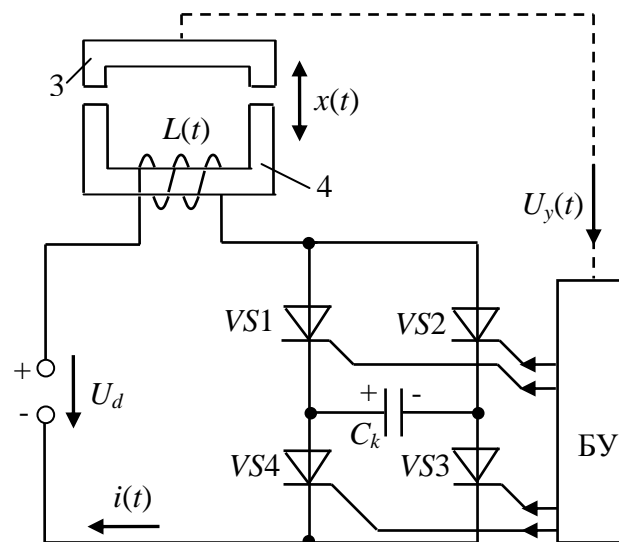


**Рис. 1. Схема установки для испытаний на стабильность частоты собственных колебаний**

Для возбуждения механических колебаний образца применяется электромагнитный силовозбудитель однократного действия с обратным движением образца за счет сил упругости.

Рассмотрим работу установки на рис. 1 как электромеханической системы для возбуждения механических колебаний в режиме, когда частота возбуждающей силы всегда равна частоте собственных механических колебаний образца, выполненного из исследуемого материала.

На рис. 2 показаны статор электромагнитного силовозбудителя 4, состоящий из неподвижной части магнитопровода с катушкой, подвижная часть магнитопровода (якорь) 3, с прикрепленным к нему испытываемым образцом и резонансный инвертор на тиристорах  $VS1-VS4$ , с помощью которого создается ток необходимой частоты в катушке силовозбудителя.



**Рис. 2. Электромеханическая система**

Резонансный контур инвертора образуется индуктивностью рабочей катушки и коммутирующей емкостью  $C_k$ . Через емкость протекает переменный ток, а через катушку однополярный импульсный, так как она включена в цепь питания постоянного тока. Длительность импульса тока  $t_{и}$  определяется частотой электрических колебаний резонансного контура и задается коммутационной емкостью  $C_k$ , которая выполнена в виде батареи конденсаторов со ступенчатым регулированием емкости. Последовательно с катушкой включается

силовой транзистор (на рис. 2 не показан), с помощью которого за счет изменения напряжения на инверторе и рабочего тока  $i(t)$  задается и поддерживается неизменной амплитуда механических колебаний.

При включении пары тиристоров  $VS1, VS3$  или  $VS2, VS4$  в электрической цепи возникает колебательный переходный процесс и через рабочую катушку протекает импульс тока в виде полуволны синусоиды. Когда этот импульс проходит через ноль, включенная ранее пара тиристоров закрывается, разрывая электрическую цепь, и наступает пауза тока. При протекании тока через катушку возникает электромагнитная сила  $F_3$ , под действием которой образец изгибается к низу. Во время паузы тока  $F_3 = 0$  образец совершает обратное перемещение под действием силы упругости. Затем возникает новый импульс тока и цикл повторяется.

С помощью пьезоэлектрического датчика получается электрическое напряжение, пропорциональное ускорению движения образца. Это напряжение усиливается и дважды интегрируется электронным блоком управления БУ.

В результате получается сигнал обратной связи, пропорциональный величине перемещения образца  $x(t)$  и имеющий частоту, равную частоте собственных механических колебаний образца. Частота напряжения обратной связи задает частоту подачи напряжения управления тиристорами. Благодаря этому частота включения импульсов тока, протекающего через рабочую катушку, и, соответственно, частота возбуждающей электромагнитной силы  $F_3$  равна частоте собственных колебаний подвижной части 3 электромеханической системы. При изменении частоты механических колебаний автоматически изменяется частота возбуждающей силы вследствие изменения частоты импульсов тока катушки.

Ввиду того, что внешняя сила несинусоидальна, а также вследствие зависимости этой силы от положения образца, форма движения образца отличается от синусоидальной, и амплитуда колебаний при движении вниз будет больше, чем при движении вверх. Однако анализ формы движения образца показал, что при скважности тока  $q \geq 2$  содержание постоянной составляющей и высших гармоник в кривой  $x(t)$  не превышает 1%, то есть форма колебаний образца практически является синусоидальной. Осциллограммы тока в катушке  $i(t)$  и перемещения подвижной части  $x(t)$ , приведенные на рис. 3, подтверждают это допущение.

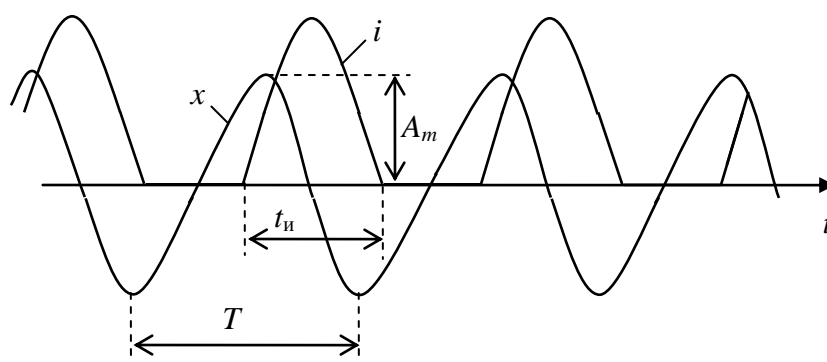


Рис. 3. Осциллограммы тока в катушке  $i$  и перемещения образца  $x$

Возбуждение механических колебаний осуществляется слабым ударом резинового молоточка по образцу, после чего система поддерживает колебания с заданной амплитудой и частотой. По мере увеличения числа циклов колебаний изменяются упругие свойства материала образца и частота собственных колебаний, что фиксируется средствами измерений. Основные из них следующие:

- измерение частоты колебаний и счет числа циклов нагружения с помощью электромагнитных частотомеров;

- измерение амплитуды колебаний с помощью пьезоэлектрического датчика и цифрового вольтметра после предварительной тарировки;
- наблюдение за колебательным процессом с помощью осциллографа.

На рис. 4 приводится форма реального образца. Его основные размеры:  $a=10$  мм,  $l=43$  мм,  $h=5$  мм,  $H=13$  мм. Ширина образца  $b=10$  мм. Рабочие поверхности длиной  $l$  и высотой  $h$  тщательно шлифуются.

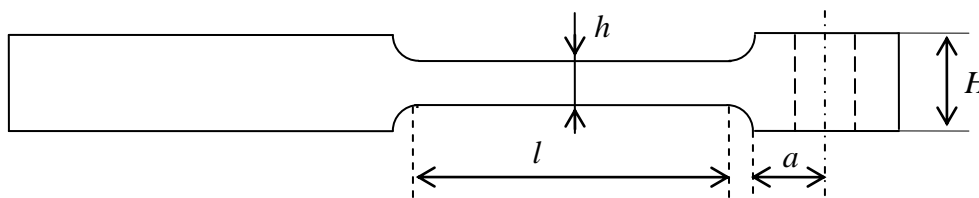


Рис. 4. Форма испытываемого образца

Максимальное напряжение цикла нагружения в расчетном сечении рассчитывается по измеряемой амплитуде колебаний образца. При установлении расчетной зависимости предполагалось, что в динамическом режиме действующие на образец силы создадут такие же максимальные напряжения и перемещения, как и статическая сила, равная по величине результирующей динамической. Статическим нагружением образца на специальном стенде определяется зависимость между приложенной силой  $F_m$  и перемещением  $A_m$  образца в точке ее приложения. Затем находится коэффициент упругости, характеризующий упругие свойства образца,

$$K_y = F_m / A_m. \quad (1)$$

Реальному образцу приводится в соответствие прямоугольный стержень равномерного сечения, равного расчетному, испытывающему изгиб под действием силы  $F_m$ . Причем, длина этого стержня  $l_3$  берется такой, чтобы коэффициент упругости стержня совпадал с коэффициентом  $K_y$  реального образца. Известно, что при консольном изгибе балки равномерного прямоугольного сечения под действием сосредоточенной силы максимальное механическое напряжение, возникающее в месте заделки,  $\sigma_m$  и максимальное смещение в точке приложения силы  $A_m$  определяются из выражений

$$\sigma_m = \frac{6F_m l_3}{bh^2}; \quad A_m = \frac{4F_m l_3^3}{Eb h^3},$$

где  $F_m$  - амплитуда действующей на образец силы,  $E$  - модуль нормальной упругости материала образца,  $b$ ,  $h$  - размеры расчетного сечения. Отсюда находим эквивалентную длину с учетом (1):

$$l_3 = h \left( \frac{Eb}{4K_y} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (2)$$

Используя выражения (1) и (2), а также формулу для напряжения в расчетном сечении консольной балки, нагруженной сосредоточенной силой, получим зависимость между максимальным напряжением  $\sigma_m$  в расчетном сечении и амплитудой колебаний  $A_m$ :

$$\sigma_m = \frac{3,78 A_m}{h} \left( \frac{EK_y^2}{b^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

Контрольные исследования показали, что отклонение напряжений  $\sigma_m$ , рассчитанных по формуле (3), не превышает 10% от значений максимального напряжения цикла нагружения, полученных с помощью тензометрирования в динамическом режиме.

При изменении упругих свойств материала под действием длительной знакопеременной нагрузки происходит изменение частоты собственных колебаний образца, по которому можно судить о стабильности упругих свойств.

Известно [1], что квадрат частоты собственных колебаний образца определяется соотношением

$$f^2 = kE, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от номера гармоники, условий закрепления концов образца, плотности и линейных размеров образца. Считая  $k$  постоянным для данного образца и зная относительное изменение частоты собственных колебаний, можно определить  $\delta_E$  – дефект модуля упругости (относительное изменение модуля  $E$ ).

Разложив соотношение (4) в ряд и ограничившись членами первого порядка малости, можно получить

$$\delta_E = \frac{\Delta E}{E_0} = 2 \frac{\Delta f}{f_0}, \quad (5)$$

где  $E_0$ ,  $f_0$  и  $\Delta E$ ,  $\Delta f$  – модуль Юнга, частота собственных колебаний в начале испытаний и их абсолютные изменения.

Так как частота колебаний образцов составляет ~200 Гц, а изменение ее определяется с абсолютной погрешностью 0,01 Гц, то относительная погрешность в определении  $\delta_E$  будет равна ~10% при абсолютном изменении частоты колебаний на 0,1 Гц. При увеличении  $\Delta f$  эта погрешность уменьшается.

Исследовались различные материалы, в том числе, стали и титановые сплавы. Далее приводятся данные для двух типов сталей, рекомендованных к исследованию.

Для исследования были выбраны малолегированная конструкционная сталь 6ХС и высоколегированная мартенситно-старяющаяся сталь Н18К9М5Т (ВКС-210). Режимы термообработки сталей представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Режимы термообработки сталей

Марка стали	Закалка	Отпуск (старение), °С	Время выдержки, ч
6ХС	920°С, время выдержки 20 мин в масле	370	1
		550	1
		600	1
		150+370	0,5+1
ВКС-210	820°С, время выдержки 1 ч в воде	500	3
		525	3
		550	3
		350+510	1+3

Выбор температур и условий закалки производился по режимам, рекомендованным заводом-изготовителем. Температура последующего отпуска (старения) изменялась с целью выяснения оптимальных соотношений между усталостными свойствами материала и стабильностью упругих свойств.

Наибольшее значение предела усталости для стали 6ХС наблюдалось у образцов, термообработанных по режиму с отпуском при температуре 370°C, - 720 МПа. Значения пределов усталости для серий образцов, отпущенных после закалки при температуре 550°C, 600°C и с двойным отпуском (160°+370°), составили 700, 680 и 650 МПа соответственно.

Максимальное значение дефекта модуля нормальной упругости на базе  $10^8$  циклов нагружения для образцов из стали 6ХС составило: 2,5% (двойной отпуск), 2% (отпуск при температуре 600°C), 1% (отпуск при температуре 550°C) и 0,8% (отпуск при температуре 370°C). Наименьшее значение дефекта модуля упругости наблюдалось у образцов из стали, имевших температуру отпуска 370°C. Эта температура отпуска предшествует температурному интервалу, при котором начинается интенсивное образование цементита и способствует сохранению в структуре стали довольно высокого содержания когерентных метастабильных карбидных фаз. При данной температуре отпуска значительно снижается уровень закалочных напряжений, способствующих протеканию микропластической деформации [2]. Увеличение дефекта модуля нормальной упругости при увеличении температуры отпуска предположительно можно объяснить изменениями, происходящими в мартенситной матрице вследствие ухода углерода из твердого раствора и укрупнения карбидов.

Наибольшее значение предела усталости для стали ВКС-210 700 МПа было получено при температуре старения 550°C. При более низкой температуре старения пределы усталости имеют меньшее значение: 650 МПа (525°C); 480 МПа (500°C) и 550 МПа (350°+510°C).

Для стали ВКС-210 при повышении температуры старения от 500 до 550°C наблюдалось уменьшение дефекта модуля нормальной упругости. Так, для образцов, имевших температуру старения 500°C, максимальное значение  $\delta_E$  составило 2,8%, а для образцов с температурой старения 550°C – 1%.

Сталь ВКС-210 относится к мартенситно-стареющим. В закаленном состоянии мартенситно-стареющие стали содержат остаточный аустенит и мартенсит. При нагреве закаленной стали, начиная с некоторых температур, происходит выделение из мартенсита дисперсных включений интерметаллидов и карбидов, что обуславливает ее упрочнение. При более высоких температурах начинается обратное превращение  $\alpha$ - $\gamma$  [3].

Электронно-микроскопические исследования тонких фольг «на просвет» показали, что микроструктура стали 6ХС после закалки и отпуска при температуре 370°C представляет собой  $\alpha$ -твердый раствор на основе железа. Встречаются выделения округлой формы размером 0,1-0,5 мкм. Сталь ВКС-210 после закалки и старения при температуре 550°C имеет разориентированную субзеренную структуру. Наблюдается очень дисперсная (~0,04 мкм) равномерно распределенная в матрице фаза  $(\text{FeNiCO})_2\text{Mo}$ , имеющая нечеткие очертания.

Установлено, что при многоцикловом нагружении для стали 6ХС дефект модуля нормальной упругости возрастает с повышением температуры отпуска. Для мартенситно-стареющей стали ВКС-210 при повышении температуры старения до 550°C наблюдается уменьшение дефекта модуля упругости. В структурах обеих сталей, соответствующих наиболее упрочненному состоянию, наблюдаются мелкодисперсные частицы, являющиеся эффективными препятствиями для движения дислокаций.

Таким образом, определение предела усталости в режиме, приближенном к реальным условиям работы, и дефекта модуля упругости материалов при усталостном воздействии позволяет подобрать материалы и режимы их термообработки, которые удовлетворяют требованиям, предъявляемым к упругим элементам при их работе в реальных условиях, и на базе полученных данных провести расчет упругих элементов излучателей различной мощности.

#### Библиографический список

1. Вибрации в технике / под ред. В.В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1976. Т. 1. – 352 с.
2. Сарак, В.И. Локальные напряжения в мартенсите закаленной стали / В.И. Сарак, Г.А. Филиппов // Взаимодействие дефектов и свойства стали. – Тула: ТГТУ. 1976. С. 101–104.

3. **Спиридонов, В.В.** Фазовый состав мартенситно-стареющих сталей на основе композиции ООН18К9М5 / В.В. Спиридонов [и др.] // Физика металлов и металловедение. 1974. №4. С. 850–856.

*Дата поступления  
в редакцию 21.09.2010*

**S.E. Nevsky, A.U. Gorohov**

**DETERMINATION OF MATERIALS COEFFICIENT OF ELASTICITY FLAW UNDER  
FATIGUE LOAD**

Information about special equipment studying the materials for detecting stability of elastic characteristics at high-cycle loading with the frequency of hundreds of hertz has been given in the report. Experimental data about the influence of steels heat- treatment conditions on the fatigue limit and the coefficient of elasticity flaw have been presented.

*Key words:* fatigue, heat treatment, coefficient of elasticity.