

## Разработка метода диагностики начальной стадии поврежденности материала по излучаемому акустическому полю

А. В. Попова\*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (МГСУ)*

*Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

*(Статья поступила 30.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)*

Динамические нагружения конструкций ответственного назначения, таких как корпуса энергетических установок, химические реакторы, резервуары, сосуды давления и др. обуславливают развитие поврежденности материалов и элементов конструкций, начальная стадия которой не выявляется традиционными средствами дефектоскопии.

В качестве метода, дополняющего существующие методы дефектоскопического контроля, предлагается бесконтактный дистанционный метод мониторинга изменений спектральных характеристик колебаний образцов и элементов конструкций через изменения в излучаемом ими акустическом поле после локальных ударных воздействий. Экспериментально установлено, что наиболее структурно-чувствительной среди других спектральных характеристик является внутреннее трение, величина которого обусловлена, в основном, рассеянием энергии в материале. Изменения данной характеристики позволяет контролировать начальные стадии процесса структурной повреждаемости металла, в то время как другие характеристики сохраняют стабильные значения.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований по изучению влияния уровня усталостной поврежденности стальных балочных образцов на характеристики добротности излучаемого акустического поля, эксплуатировавшихся в одинаковых условиях, но с разными сроками. Представлены методика и аппаратура для проведения испытаний балочных образцов на добротность свободных затухающих колебаний со спектральным анализом излучаемого ими акустического поля.

PACS: 43.58.+z

УДК: 534.631

Ключевые слова: балочные образцы, затухающие колебания, звукоизлучение, добротность, спектральный анализ.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач по продлению ресурса материалов и элементов конструкций повышенной опасности является диагностика степени их поврежденности при разных сроках эксплуатации в условиях интенсивных механических нагрузок и воздействия агрессивных сред, содержащих сероводород. В настоящее время в диагностике конструкций и объектов повышенной опасности можно выделить следующие направления:

1. развитие средств дефектоскопического контроля: повышение чувствительности диагностических приборов в отношении формы, размеров и распределения трещиноподобных дефектов, размеров и распределения коррозионных язв на поверхности конструкций и других дефектов;
2. развитие физических методов и средств для более точного установления напряженно-деформированного состояния элементов конструкций.

В обоих этих направлениях достигнуты определенные успехи. Результаты дефектоскопии широко использу-

ют в диагностике технического состояния нефте- и газопроводов, объектов нефтепереработки, нефтехимии, энергетики и других отраслей. Однако существующие методы диагностики не в полной мере позволяют регистрировать зернограничные повреждения, являющиеся одной из наиболее вероятных причин зарождения разрушений и распространения трещин, связанной с наводораживанием металла во время эксплуатации.

Необходимость развития новых методов диагностики тем более важна ввиду того, что зачастую возникает ситуация, когда размер зарождающихся дефектов ниже предела чувствительности существующих средств дефектоскопического контроля, но их выявление необходимо для прогнозирования срока безопасной эксплуатации оборудования.

В качестве метода, дополняющего традиционные методы дефектоскопического контроля, предлагается бесконтактный дистанционный метод мониторинга зарождения и развития дефектов по изменениям спектральных характеристик колебаний образцов и элементов конструкций в излучаемом ими акустическом поле после локальных ударных воздействий. Экспериментально установлено, что наиболее структурно-чувствительной среди других спектральных характеристик является внутреннее трение, величина которого обусловлена, в основном, рассеянием энергии в процессе зернограничного проскальзывания в материале. Изменения данной характеристики, выраженные через коэффициент потерь (или обратную ему величину

\*E-mail: [anastacia.popova@mail.ru](mailto:anastacia.popova@mail.ru)

ну — добротность) позволяет контролировать начальные стадии процесса структурной повреждаемости металла, в то время как другие характеристики сохраняют стабильные значения.

Возможности метода внутреннего трения (добротности) в плане реагирования на различные стадии процесса структурной поврежденности материалов продемонстрированы в экспериментах, выполненных методом бесконтактной регистрации затухающих акустических колебаний, излучаемых балочными образцами после ударных воздействий.

## 1. ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ

В экспериментах использовались несколько балочных образцов одинаковых геометрических размеров из стали одной марки, эксплуатировавшихся в одинаковых условиях, но с разными сроками. Представленные для исследований образцы были пронумерованы цифрами от 1 до 8 без указания их «истории», в том числе — сроков эксплуатации металла образцов. На рис. 1 приведена фотография образцов. Габаритные размеры образцов:  $300 \times 20 \times 4$  мм<sup>3</sup>.

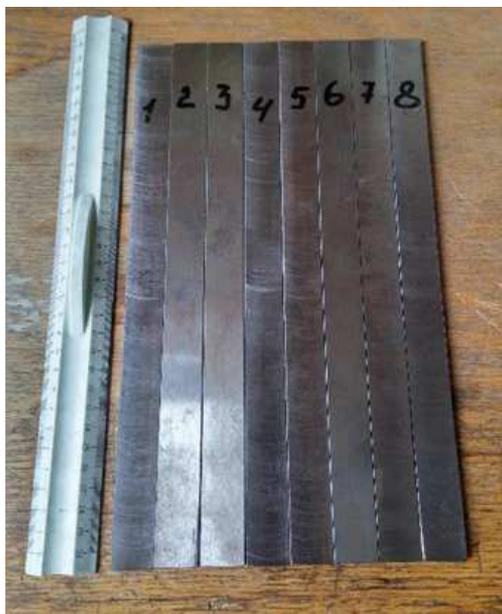


Рис. 1: Балочные образцы из стали с разными сроками эксплуатации

Некоторая информация была предоставлена после получения результатов измерения добротности образцов. В частности, образцы под номерами 1, 7, 8 изготовлены из проката стали 20; металл в эксплуатации не был. Образцы под номерами 2–6 эксплуатировались около тридцати лет. Точные сроки и условия эксплуатации этих образцов, а также схемы их вырезки не были предоставлены.

## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения выполнялись стенде, состоявшем из ударного устройства, двух направленных микрофонов 130D20, соединенных с двухканальным спектроанализатором А19-У2, ЭВМ с программой Zetlab для обработки акустической информации и нитяного подвеса для образцов (рис. 2).



Рис. 2: Измерительный стенд: 1 — образец, 2 — сферический ударник, 3 — измерительные микрофоны, 4 — спектроанализатор

Ударное устройство состояло из закаленного стального шарика на нитяном подвесе и ограничителя, который обеспечивал постоянство силы удара и точки его приложения. Применение ударного устройства в виде закаленного стального шарика на нитяном подвесе с ограничителем начального отклонения, обеспечивающего постоянство силы удара и точки его приложения, оказалось предпочтительнее, чем применение ударного молотка, имеющегося в комплекте двухканального спектроанализатора А19-У2. К освободившемуся измерительному каналу был подключен дополнительный микрофон, что удвоило объем снимаемой акустической информации.

На рис. 3 представлен типичный многочастотный затухающий акустический сигнал продолжительностью 0,2 с, снимаемый с одного из микрофонов, после ударного воздействия на образец.

На рис. 4 показан спектр сигнала, отображённого на рис. 3, содержащий довольно большое количество дискретных составляющих, обозначающих собственные частоты преимущественно изгибных колеба-

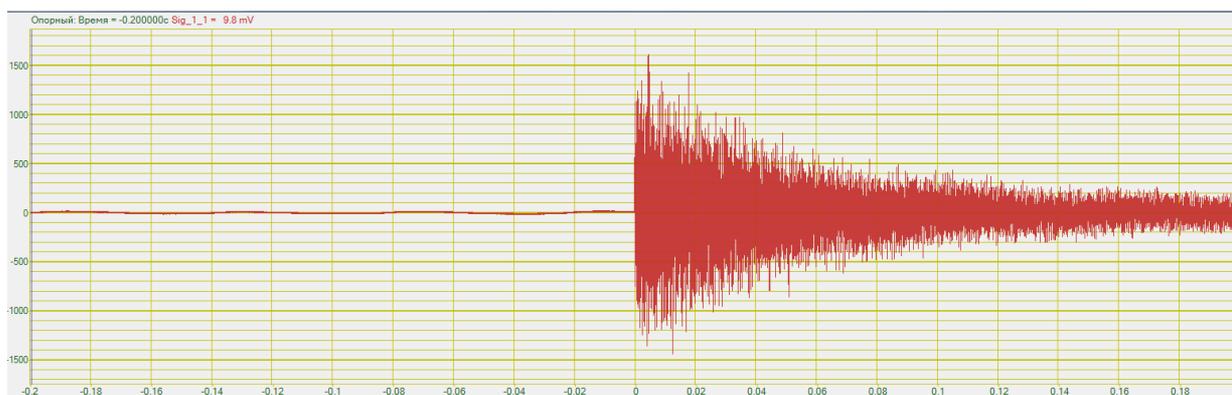


Рис. 3: Затухающие колебания одного из образцов: по горизонтальной оси отложено время в с, по вертикальной — амплитуда акустического давления

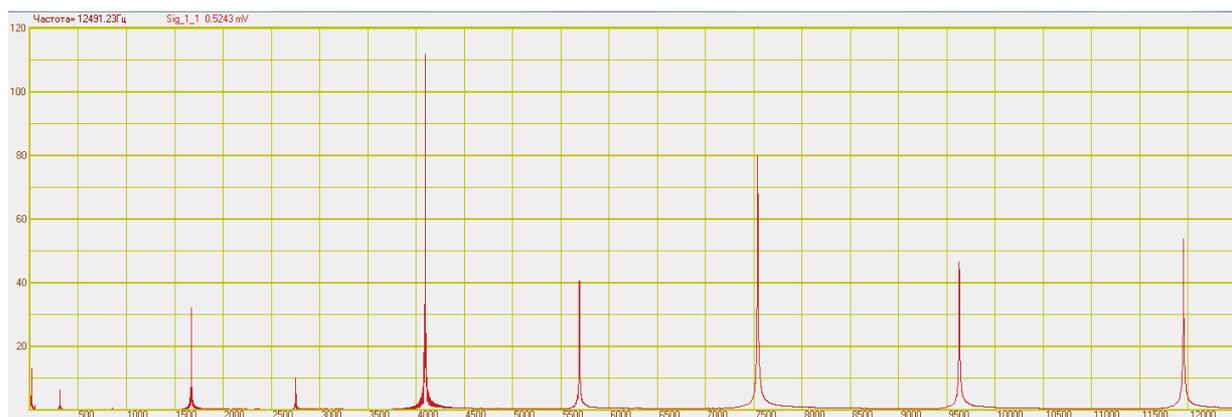


Рис. 4: Спектр затухающего колебания, рассчитанный по записи с рис. 3: по горизонтальной оси отложена частота в Гц, по вертикальной — амплитуда в мВ

ний образца.

Для каждой из зарегистрированных собственных частот в спектре затухающего колебания по алгоритму, заложенному в программное обеспечение спектроанализатора, вычислялось значение добротности колебаний и аппаратная погрешность этого значения в процентах. Определение добротности для отдельных частот спектра многочастотного затухающего колебания производилось в соответствии с ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Ч. 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации».

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

По каждому образцу выполнялось 10 измерений добротности в излучаемом акустическом сигнале. В ходе измерений было установлено, что по величинам добротности образцы металла, бывшего в эксплуатации, и образцы металла в состоянии поставки значимо (до 30%) отличаются друг от друга. Распределение сред-

них значений добротности по образцам, сгруппированное по срокам эксплуатации и, предположительно, по уровню эксплуатационной нагруженности представлено на рис. 5 в форме диаграммы.

На диаграмме рис. 5 образцы по значениям добротности группируются по срокам эксплуатации: слева — образцы №1, 7, 8, не бывшие в эксплуатации, в центре — образцы №2, 6 со сроком эксплуатации около 30 лет, справа образцы №3–5 со сроком эксплуатации около 30 лет, но, предположительно, с меньшим, чем у образцов №2, 6 уровнем эксплуатационной нагруженности. Видно, что наиболее высокие и примерно одинаковые значения добротности отмечены именно у образцов №1 и №8, не бывших в эксплуатации; образец №7 примыкает к ним по значению добротности. Наиболее низкие значения добротности отмечены у образцов №2 и №6, имевших наибольшие сроки эксплуатации и, по-видимому, вырезанные из стали, находившейся в наиболее нагруженных частях конструкции. Остальные образцы показали промежуточные значения добротности.

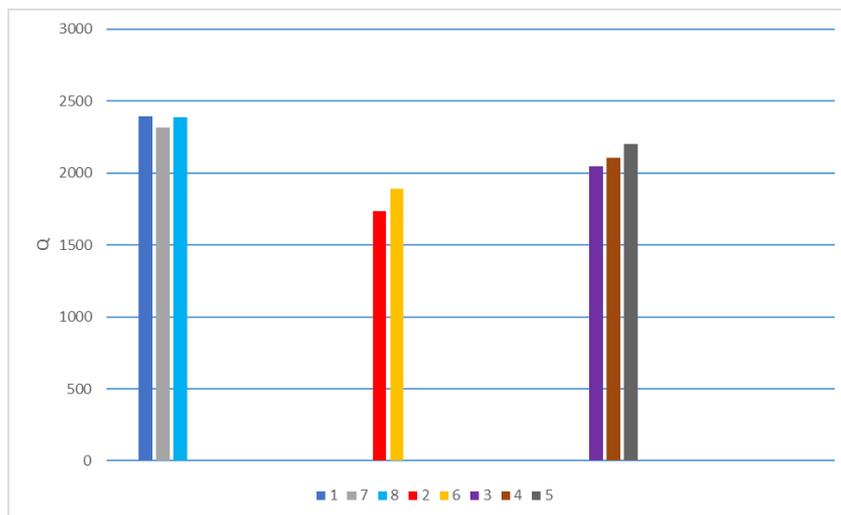


Рис. 5: Распределение средних значений добротности по образцам (номера образцов выделены цветом)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам тестовых измерений можно сделать заключение, что методика и измерительная система определения добротности затухающих колебаний балочных образцов может быть использована как индикатор эксплуатационной поврежденности материала. Намечено продолжить исследования по дистанционному акустическому методу измерения добротности, включая более тщательный выбор объектов исследования, отработку методики обработки и протоколирования ре-

зультатов измерений, разработку методики ускоренного искусственного старения образцов путём их малоцикловых нагружений с принятием полученных значений добротности на каждом образце за первоначальную точку сравнения. На образцах с изменившейся после усталостных испытаний добротностью следует также проводить металлографические исследования, которые позволят конкретизировать связи показателей добротности со структурными факторами материалов, характеризующими изменение их поврежденности.

- [1] Zhang Z. F., Wang Z. G.. Progress in Materials Science. 2008. **53**. P. 1025.  
 [2] Казаков Д. А., Капустин С. А., Коротких Ю. Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1999.  
 [3] Доможиров Л. И., Махутов Н. А. Изв. РАН. МТТ. 1999. № 5. С. 17.  
 [4] Schijve J. Fatigue of structures and materials [Электронный ресурс] / J. Schijve. Springer, 2009. 2nd edition with

- (CD-ROM) ISBN 978-1-4020-6807-2.  
 [5] Stephens R. I., Fatemi A., Stephens R. R., Fuchs H. O. Metal fatigue in engineering. Wiley-Interscience Publication. 2001.  
 [6] Totten G., Howes M. Inoue T. Handbook of residual stress and deformation of steel, ASM International. Materials Park, Ohio, 2002.

## Development of a method for diagnosing the initial stage of material damage by the emitted acoustic field

A. V. Popova

Moscow State University of Civil Engineering. Moscow, 129337, Russia  
 E-mail: anastacia.popova@mail.ru

Dynamic loading of structures of responsible use, such as power plant cases, chemical reactors, tanks, pressure vessels, etc., cause the development of damage to materials and structural elements, the initial stage of which is not detected by traditional means of flaw detection.

As a method supplementing existing methods of defectoscopic control, a contactless remote method for monitoring changes in the spectral characteristics of oscillations of specimens and structural elements through changes in the acoustic field emitted by

them after local shock effects is proposed. It has been experimentally established that the most structurally sensitive among other spectral characteristics is internal friction, the magnitude of which is mainly due to the energy dissipation in the material. Changes in this characteristic allow to control the initial stages of the process of structural damage to metal, while other characteristics retain stable values.

The report presents the results of experimental studies on the effect of the level of fatigue damage of steel beam samples on the characteristics of the quality factor of the emitted acoustic field, operated under the same conditions, but with different terms. The technique and equipment for testing beam samples for the quality factor of free decaying oscillations with spectral analysis of the acoustic field emitted by them are presented.

PACS: 43.58.+z

*Keywords:* beam samples, damped oscillations, sound emission, Q-factor, spectral analysis.

*Received 30 June 2017*

#### **Сведения об авторе**

Попова Анастасия Владимировна — магистр, руководитель секции; тел.: (495) 647-60-07, e-mail: [anastacia.popova@mail.ru](mailto:anastacia.popova@mail.ru).