

Разработка и применение прибора электрофизической диагностики при физико-механических испытаниях материалов

А.А. Абу Газал,
асп., gazal.ayman@yandex.ru,
В.И. Сурин,
доц., к.т.н., visconst@rambler.ru,
Е.А. Шеф,
студ.-дипл., 1iakatia@mail.ru,
НИЯУ МИФИ, г. Москва,
Г.Д. Бокучава,
к. ф.-м.н., gizo@nf.jinr.ru,
И.В. Папушкин,
инж., piv@nf.jinr.ru,
ЛНФ ОИЯИ, г. Дубна

Приводятся результаты применения прибора настольного размещения для спектрального анализа сигналов функциональной электрофизической диагностики *Spectroelph-FRR*. Прибор предназначен для работы с разрывными испытательными машинами с горизонтальным способом закрепления образцов. При испытаниях материалов сканирующий преобразователь скользит поступательно в горизонтальном направлении вдоль поверхности образца. Информативный электрический сигнал образуется на пятнах контакта преобразователя с объектом контроля, находящегося под нагрузкой, при этом поверхность механического контакта представляет собой чувствительный элемент электрофизического преобразователя. Число пятен контакта преобразователя определяется интенсивностью контактного взаимодействия в зоне контакта и процессами, протекающими в этой зоне, а также существенно зависит от изменения параметров волнистости и шероховатости. Для исследования внутренних напряжений, возникающих в объеме образца из стали 12X18H10T в лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Россия) использовали также метод дифракции тепловых нейтронов.

The results of application of the desktop placement device for spectral analysis of signals of functional electro-physical diagnostics *Spectroelph-FRR* are presented. The device is designed to work with discontinuous testing machines with a horizontal method of fixing the samples. When testing materials, the scanning transducer slides translationally in the horizontal direction along the surface of the sample. An informative electrical signal is formed on the contact spots of the converter with the object of control under load, while the mechanical contact surface is a sensitive element of the electro-physical converter. The number of contact spots of the transducer is determined by the intensity of the contact interaction in the contact zone and the processes occurring in this zone, and also depends significantly on the variation of the parameters of ripple and roughness. For the investigation of internal stresses arising in the sample made of 12X18H10T steel in the Neutron Physics Laboratory in the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia) also used the method of thermal neutron diffraction.

1. Метод сканирующей контактной потенциометрии

Диагностика материалов при физико-механических испытаниях связана с решением ряда сложных задач по выявлению и идентификации дефектов структуры на разных стадиях испытаний с целью определения прочностных свойств материала и предсказания его поведения. Сигналы электрофизической диагностики содержат значительный объем полезной информации о физических процессах, изменениях структуры материала, кинетики разрушения и т.д. Процесс накопления деформации развивается стадийно, причем каждая стадия контролируется определенными механизмами и дает свой вклад в общий процесс. Работа по созданию средств и методов обработки сигналов электрофизической диагностики преследует цель достижения надежных результатов идентификации стадий накопления деформационных повреждений материалов, приводящих к разрушению для более ясного понимания происходящих процессов и возможности внешнего влияния на их развитие.

Использование метода сканирующей контактной потенциометрии (СКП) открывает широкие возможности для исследования распределения на поверхности напряжений и деформаций, механизмов пластической деформации, стадий развития внутренних дефектов вплоть до разрушения материала, и других физических процессов в режиме реального времени. Информативный электрический сигнал образуется на пятнах контакта преобразователя с объектом контроля, находящегося под нагрузкой, при этом поверхность механического контакта представляет собой чувствительный элемент электрофизического преобразователя. Число пятен контакта преобразователя определяется интенсивностью контактного взаимодействия в зоне контакта и процессами, протекающими в этой зоне, а также существенно зависит от изменения параметров волнистости и шероховатости.

Датчики контактной потенциометрии обладают рядом преимуществ по сравнению с измерительными устройствами других методов неразрушающего контроля. Основными из этих преимуществ являются: малая масса и габариты чувствительных элементов, обусловленные малыми линейными размерами пятен образующихся микроконтактов; высокая надежность и воспроизводимость результатов измерений; высокая помехоустойчивость и низкий уровень собственных шумов. В конструкциях датчиков отсутствуют сильноточные цепи и нагреваемые области, поэтому измерительные системы характеризуются высокой пожаробезопасностью. Также следует отметить низкий по мощности уровень полезного сигнала и отсутствие, в связи с этим, искрения в механических контактах. Метод СКП обеспечивает возможность проведения многоточечных и распределенных измерений, в том числе с использованием частотно-временного мультиплексирования чувствительных элементов, расположенных на

различных участках объекта контроля. Для обработки потока поступающей информации используются программные коды временного и спектрального анализа.

Потенциометрические измерения выполнены с помощью настольного прибора *Spectroelph-FRR*, предназначенного для спектрального анализа электрических сигналов [1]. Прибор работает совместно с программно-аппаратным комплексом мобильной диагностической системы, размещенной на ноутбуке *Asus X554L*. Для проведения измерений в режиме автоматизированного детектирования был разработан программируемый амплитудный дискриминатор (ПАД) измерительных сигналов с регулируемой шкалой амплитудной дискриминации в диапазоне 40 дБ. Дискриминатор отсекает значения амплитуды сигнала, превышающие заданный уровень, что позволяет исследовать распределение поверхностного электрического потенциала на разных структурных уровнях сигнала (СУС). Узкополосный фильтр позволяет настраивать ПАД по амплитуде, начиная с уровня десятых микровольт, с шагом 0,1 мкВ, широкополосный – от единиц и до десятков милливольт. Измерительная система управляется *OS Windows*, частота дискретизации измерений составляет 1 Гц.

Для потенциометрических измерений применяли датчики с электрофизическими преобразователями из стали У10. Распределение потенциалов на поверхности было получено относительно потенциала «массы» разрывной машины.

Цилиндрические образцы из стали 12Х18Н10Т длиной 85 и диаметром 5 мм были изготовлены фрезерованием из проката с последующей полировкой рабочей поверхности до шероховатости R_a , изменяющейся в пределах 0,55-0,70 мкм.

Механическое перемещение датчика по поверхности образца осуществляли автоматически с помощью прибора *Spectroelph-FRR* в процессе растяжения образца на нагрузочной машине LM-29 [2,3]. На каждой нагрузке образец выдерживался в течение двух часов, при этом производилось до двадцати измерительных циклов при линейной скорости сканирования 2,2 мм/с.

При испытаниях сканирующий преобразователь скользит поступательно в горизонтальном направлении вдоль поверхности образца. Для этого используется винтовой механизм и механический привод от шагового двигателя. Каретка с электрофизическим датчиком перемещается поступательно по двум цилиндрическим направляющим. По три опоры вращения используются с каждой стороны винтового механизма и направляющих. Измерительная штанга телескопического типа с игольчатым преобразователем установлена на консоли и поджимается к поверхности образца с помощью груза, закрепленного на винтовой пружине. Основные технические характеристики прибора *Spectroelph-FRR* приведены в таблице, внешний вид информационно-измерительной системы с прибором показан на рисунке 1.

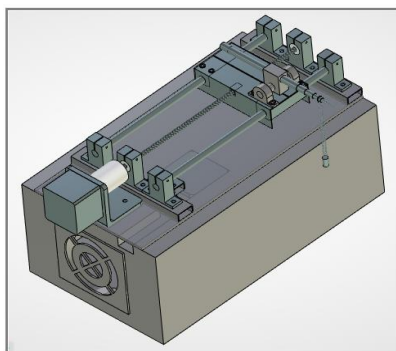


рис. 1 Прибор для спектрального анализа сигналов электрофизической диагностики *Spectroelph-FRR* и информационно-измерительная система функциональной электрофизической диагностики материалов и изделий

Таблица

Основные технические характеристики прибора *Spectroelph-FRR*

Материал преобразователя игольчатого типа (Ø2..3 мм)	Инструментальная нелегированная сталь У7-У10 (ГОСТ 1435-99)
Длина измерительной штанги, мм	30
Максимальная скорость скольжения преобразователя по поверхности образца, мм/с	2,2
Минимальная скорость скольжения преобразователя по поверхности образца, мм/с	0,5
Чувствительность преобразователя, мкВ	0,01

В качестве встраиваемой измерительной системы для разрабатываемых приборов функциональной электрофизической диагностики и неразрушающего контроля рассмотрен вариант измерительной системы, состоящей из усилителя низковольтного входного сигнала, микроконтроллера со встроенным АЦП, соединенным с ПК посредством последовательного интерфейса USB или UART. Для получения высокого разрешения принимаемых сигналов использовали прецизионный АЦП с интегрированным в один корпус с ним программируемым предусилителем. Выбран 32-разрядный АЦП ADS1262 фирмы Texas Instruments. При частоте выборки 2,5 SPS АЦП имеет разрешение 23,5 бита без шума («noise free bits»), что при величине опорного напряжения 2,5 В и коэффициенте предусилителя около 30-ти дает предельное разрешение ~ 7 нВ. Программируемый коэффициент усиления позволяет значительно расширить диапазон входных напряжений. Передача данных осуществляется по протоколу SPI, программное обеспечение выполнено на языке C++.

В Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Россия) на источнике нейтронов с длинным импульсом – импульсном реакторе ИБР-2 – создан и функционирует специализированный нейтронный фурье-стресс-дифрактометр ФСД, предназначенный для исследования

внутренних напряжений в объёмных промышленных образцах изделий и изучения термо-механических свойств конструкционных материалов.

Уникальная методика нейтронной корреляционной дифрактометрии по времени пролета [3,4] – использование быстрого фурье-прерывателя для модуляции интенсивности первичного нейтронного пучка и RTOF-метода для накопления данных – позволяет получать на ФСД дифракционные спектры с необходимым высоким разрешением ($\Delta d/d \approx 2 \times 10^{-3}$ при угле рассеяния $2\theta = 140^\circ$ и $\Delta d/d \approx 4 \times 10^{-3}$ при углах рассеяния $2\theta = \pm 90^\circ$) в широком диапазоне межплоскостных расстояний, что обеспечивает необходимую точность регистрации небольших смещений дифракционных пиков и их уширений.

2. Результаты, полученные с помощью прибора Spectroelph-FRR

Регистрацию разности электрических потенциалов на поверхности образца и анализ диагностической информации производили на программно-аппаратном комплексе «ElphysLAB-ИДС». Разработанный программный комплекс, входящий в расчетно-программный модуль ИДС, позволяет дистанционно обеспечивать обработку поступающей информации, формировать базу данных и производить необходимые расчеты для визуализации получаемых результатов и постановки диагнозов. В процессе увеличения нагрузки на потенциограмме наблюдали цветовую картину изменения поверхностного потенциала (рис.2), вызванную влиянием механических напряжений и формированием динамической шероховатости. Особенно заметно это проявлялось при нагрузках превышающих предел текучести. Для анализа результатов измерений использовали ПАД с широкими функциональными возможностями.

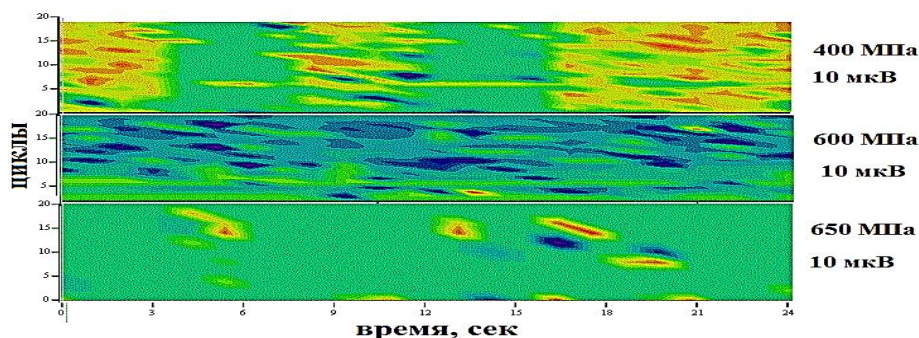


рис. 2. Потенциограмма поверхности образца из 12X18H10, испытанного предварительно, при нагрузках 400, 600 и 650 МПа. Слева на вертикальной шкале показано число циклов измерений, справа – приложенное напряжение и значение структурного уровня сигнала (СУС)

На верхнем рисунке (рис.2) при 400 МПа виден процесс концентрации внутренних напряжений на трех участках образца (красно-желтые тона). С левой и правой стороны образца концентрация напряжений связана с формой образца, а именно, с галтелью в месте перехода от диаметра рабочей части образца к диаметру резьбовой части, в центре – с наибольшими, возникающими при растяжении, эффективными напряжениями. В процессе пластического течения формируются зоны локализации деформации, что отчетливо видно при напряжении 600 и особенно при 650 МПа. В этих зонах, при этой и более высокой нагрузке, начинается образование местного сужения или шейки.

3. Результаты, полученные методом дифракции тепловых нейтронов

Эксперименты по дифракции нейтронов выполнены на фурье-стресс-дифрактометре ФСД на импульсном реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ (г. Дубна). В ходе эксперимента исследуемые образцы из стали 12X18H10T подвергались внешней одноосной нагрузке растяжения *in situ* в нейтронном пучке с помощью нагрузочной машины LM-29. При этом, во время нейтронного эксперимента одновременно с дифракционными спектрами независимо регистрировались данные сканирующей контактной потенциометрии. Образец подвергался нагрузке в диапазоне от 100 до 700 МПа до образования заметной шейки в образце. Последнее измерение проведено при уменьшенной до 650 МПа нагрузке во избежание разрушения образца.

Дифракционные спектры регистрировались детекторами при углах рассеяния $2\theta = \pm 90^\circ$ при каждом значении нагрузки на образце (рис. 33).

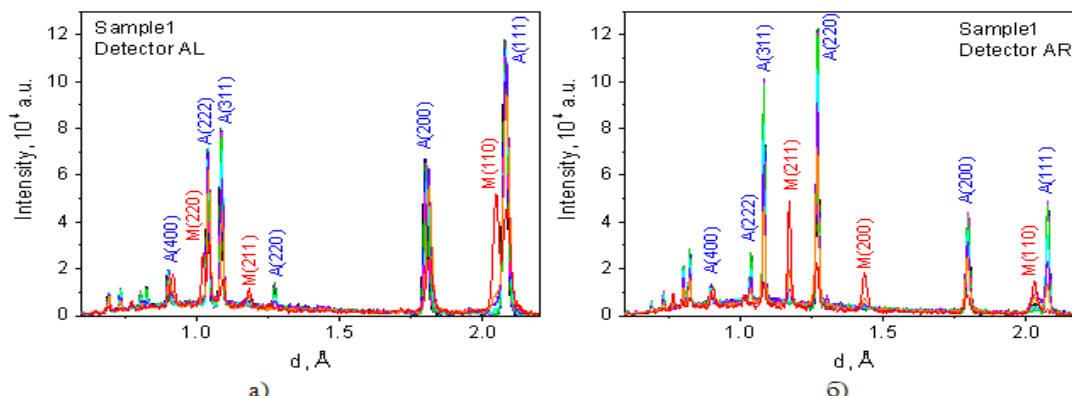


рис. 3. Измеренные дифракционные спектры по времени пролета от образца № 1 для левого AL (а) и правого AR (б) детекторов. Указаны индексы Миллера для основных пиков аустенита и образовавшегося в результате пластической деформации мартенсита

Измеренные спектры были обработаны методом профильного анализа по методу Ритвельда, в результате чего были получены значения параметров кристаллической решетки материала и параметры уширения дифракционных пиков.

Дифракционные пики от исходной аустенитной стали соответствовали кубической ГЦК-решетке (пр. гр. $Fm\bar{3}m$). С увеличением степени пластической деформации материала при нагрузках свыше 650 МПа в аустенитной матрице обнаружено образование фазы α' -мартенсита, при этом в нейтронных спектрах наблюдалось появление дифракционных пиков, характерных для кубической мартенситной ОЦК-решетки (пр. гр. $Im\bar{3}m$). Анализ интенсивностей дифракционных пиков в спектрах показал наличие заметной текстуры в исходном образце аустенитной стали, также сильная текстура наблюдается и в образовавшемся мартенсите.

Выводы

1. При испытаниях на растяжение стали 12X18H10T при нагрузках 600-650 МПа методом сканирующей контактной потенциометрии обнаружено резкое снижение детерминированной компоненты диагностического сигнала (тренда) в результате локализации пластической деформации и образования шейки в сечении сужения.
2. Использование при обработке результатов метода амплитудной дискриминации сигнала (на структурном уровне 20 мкВ) позволило уже в области упругой деформации при напряжении 300 МПа на всей длине образца выделить тот участок, на котором впоследствии образовалась шейка.
3. При зонной локации поверхности образца на структурных уровнях сигнала от 10 до 20 мкВ обнаружены участки с относительно высоким значением амплитуды сигнала, что связано с процессами образования второй фазы, наличие которой подтверждается результатами метода дифракции тепловых нейтронов.

Литература

1. V.I. Surin, A.A. Abu Ghazal, E.V. Voloshin, E.Y. Telnov, D.O. Titovets, «Device's for measuring contact surface stress»// Journal of Advanced Research in Technical Science, -North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace.– 2017.– Issue 6. pp. 48-54.
2. G.D. Bokuchava, V.L. Aksenov, A.M. Balagurov, V.V. Zhuravlev, E.S. Kuzmin, A.P. Bulkin, V.A. Kudryashev, V.A. Trounov, "Neutron Fourier diffractometer FSD for internal stress analysis: first results", Applied Physics A: Materials Science & Processing, v.74 [Suppl1], 2002, pp s86-s88. <http://dx.doi.org/10.1007/s003390201750>
3. A.M. Balagurov, G.D. Bokuchava, E.S. Kuzmin, A.V. Tamonov, V.V. Zhuk, "Neutron RTOF diffractometer FSD for residual stress investigation", Zeitschrift für Kristallographie, Supplement Issue No. 23, 2006, pp. 217-222. <http://dx.doi.org/10.1524/9783486992526-038>
4. G.D. Bokuchava, "Materials microstructure characterization using high resolution time-of-flight neutron diffraction", Romanian Journal of Physics, 2016, Vol. 61, No. 5-6, pp. 903-925. http://www.nipne.ro/rjp/2016_61_5-6/0903_0925.pdf