



### АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ МАТЕРИАЛОВ

А.А. Абу Газал, В.И. Сурин, Е.А. Шеф (НИЯУ МИФИ),  
Г.Д. Бокучава, И.В. Папушкин (ЛНФ ОИЯИ)

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 12Х18Н10Т в лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Россия) использовали также метод дифракции тепловых нейтронов.

Ключевые слова: электрофизическая диагностика, физико-механические испытания материалов, метод дифракции тепловых нейтронов, метод сканирующей контактной потенциометрии.

#### 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 поверх-

ность 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.

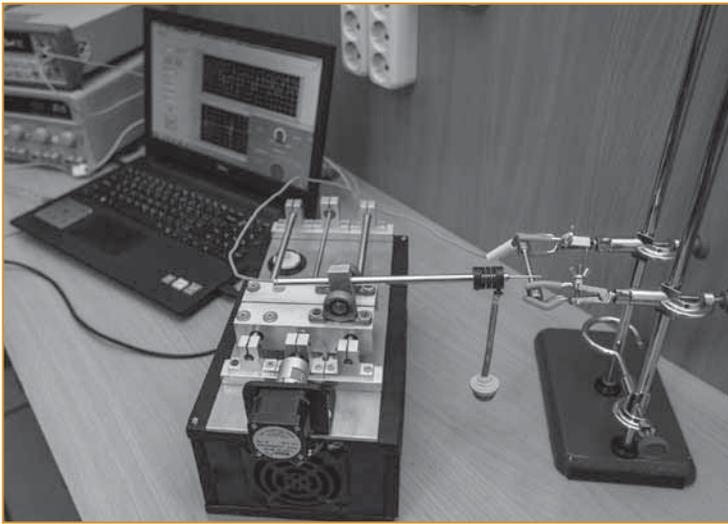


Рис. 1 Прибор для спектрального анализа сигналов электрофизической диагностики Spectroelph-FRR и информационно-измерительная система функциональной электрофизической диагностики материалов и изделий

**Основные технические характеристики прибора Spectroelph-FRR**

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

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 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. Узкополосный фильтр позволяет настраивать дискриминатор по амплитуде, начиная с уровня десятых микровольт, с шагом 0,1 мкВ, широкополосный — от единиц и до десятков милливольт. Измерительная система управляется ОС Windows, частота дискретизации измерений составляет 1 Гц.

Для потенциометрических измерений применялись 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 Ra, изменяющейся в пределах 0,55...0,70 мкм.

Механическое перемещение датчика по поверхности образца осуществлялось автоматически с помощью прибора Spectroelph-FRR в процессе растяжения образца на нагрузочной машине LM-29 [2, 3]. На каждой нагрузке образец выдерживался в течение 2 часов, при этом производилось до 20 измерительных циклов при линейной скорости сканирования 2,2 мм/с.

В ходе испытаний 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. Внешний вид информационно-измерительной системы с прибором Spectroelph-FRR показан на рис. 1.

Измерительная система электрофизической диагностики и неразрушающего контроля состоит из усилителя низковольтного входного сигнала, микроконтроллера со встроенным АЦП. Прецизионный АЦП интегрирован в один корпус с программируемым предусилителем. Для проведения эксперимента 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 предусиления около 30 дает предельное разрешение ~7 нВ. Программируемый коэффициент усиления позволяет значительно расширить диапазон входных напряжений. Передача данных осуществляется по протоколу SPI.

**Результаты эксперимента по методу сканирующей контактной потенциометрии**

Регистрация разности электрических потенциалов на поверхности образца и анализ диагностической информации производились с помощью программно-аппаратного комплекса *ElphysLAB-ИДС*. Программная составляющая комплекса позволяет дистанционно обеспечивать обработку поступающей информации, формировать базу данных и производить необходимые расчеты для визуализации получа-

емых результатов и постановки диагнозов.

В ходе эксперимента увеличение нагрузки отражалось на потенциограмме изменениями цветовой картины поверхностного потенциала (рис. 2), вызванными влиянием механических напряжений и формированием динамической шероховатости. Особенно заметно это проявлялось при нагрузках, превышающих предел текучести. Для анализа результатов измерений использовался программируемый амплитудный дискриминатор с широкими функциональными возможностями.

На верхнем фрагменте рис. 2 при 400 МПа виден процесс концентрации внутренних напряжений на трех участках образца (участки 1, 2, 3). 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 400 МПа. При более высокой нагрузке начинается образование местного сужения или шейки.

**Метод дифракции тепловых нейтронов**

В Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядер-

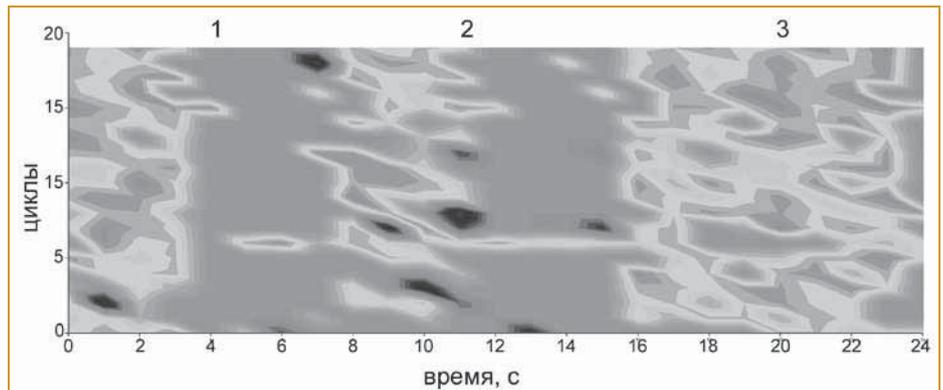


Рис. 2. Потенциограмма поверхности образца из 12X18H10, испытанного предварительно при нагрузке 400 МПа. Слева на вертикальной шкале показано число циклов измерений, справа — приложенное напряжение и значение структурного уровня сигнала

ных исследований (г. Дубна) на источнике нейтронов с длинным импульсом — импульсном реакторе ИБР-2 — создан и функционирует специализированный нейтронный фурье-стресс-дифрактометр, предназначенный для исследования внутренних напряжений в объемных 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 фурье-стресс-дифрактометре дифракционные спектры с необходимым 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.

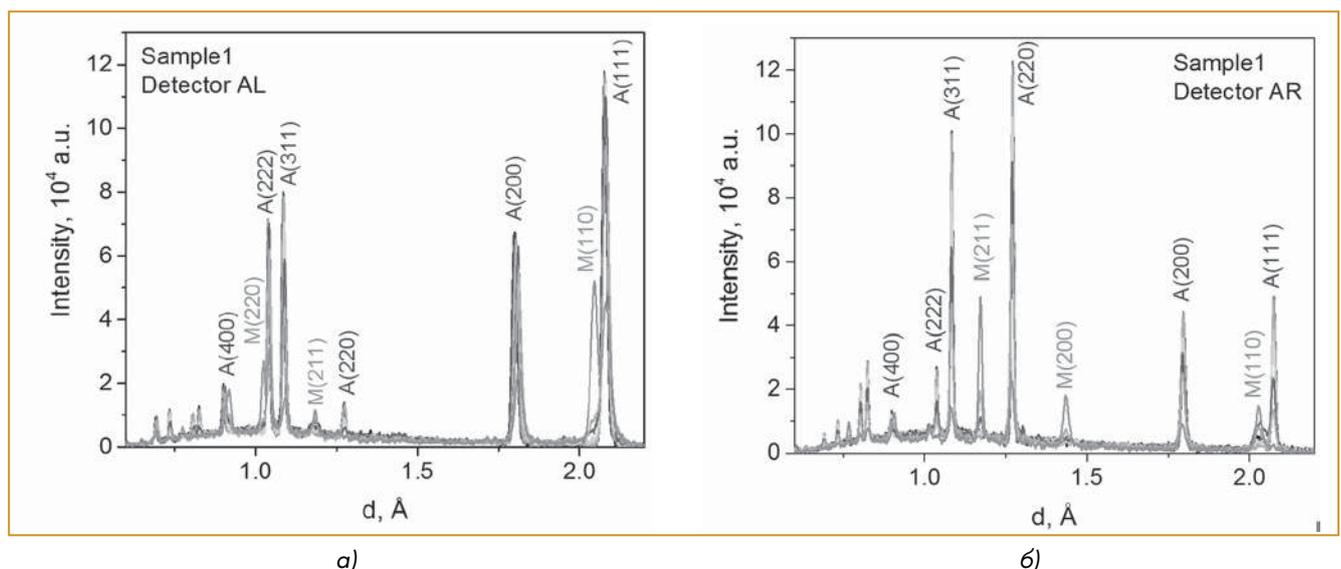


Рис. 3. Измеренные дифракционные спектры по времени пролета от образца № 1 для левого AL (a) и правого AR (б) детекторов. Указаны индексы Миллера для основных пиков аустенита и образовавшегося в результате пластической деформации мартенсита

*Современные ученые не требуют чудес:  
они требуют экспериментов.*

Лев Карсавин

#### Результаты эксперимента по методу дифракции тепловых нейтронов

Эксперименты по дифракции нейтронов выполнены на фурье-стресс-дифрактометре на импульсном реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ (г. Дубна). В ходе эксперимента исследуемые образцы из стали 12Х18Н10Т 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 100...700 МПа до образования заметной шейки. 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. 3).

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 3 m*). С увеличением степени пластической деформации материала при нагрузках свыше 650 МПа в аустенитной матрице обнаружено образование фазы  $\alpha'$ -мартенсита, при этом в нейтронных спектрах наблюдалось появление дифракционных пиков, характерных для кубической мартенситной ОЦК-решетки (пр. гр. *Im 3 m*). Анализ интенсивностей

дифракционных пиков в спектрах показал наличие заметной текстуры в исходном образце аустенитной стали, также сильная текстура наблюдается и в образце, подвергнутом мартенситу.

#### Заключение

1. Метод сканирующей контактной потенциометрии позволяет при испытаниях на растяжение образцов из стали 12Х18Н10Т обнаруживать места пластической деформации.

2. Использование при обработке результатов метода амплитудной дискриминации сигнала позволяет уже в области упругой деформации на всей длине образца выделить тот участок, на котором впоследствии образовалась шейка (то есть пластическая деформация).

3. При испытаниях на растяжение образцов из стали 12Х18Н10Т в местах пластической деформации методом дифракции тепловых нейтронов обнаружено изменение структуры металла (аустенит/мартенсит).

#### Список литературы

1. Surin V.I., Abu Ghazal A.A., Voloshin E.V., Telnov E.Y., Titovets D.O. 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. Bokuchava G.D., Aksenov V.L., Balagurov A.M. and et. 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. Balagurov A.M., Bokuchava G.D., Kuzmin E.S., Tamonov A.V., Zhuk V.V. 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. Bokuchava G.D. 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](http://www.nipne.ro/rjp/2016_61_5-6/0903_0925.pdf).

*Абу Газал Айман Ахед — канд. техн. наук, ассистент, Сурин Виталий Иванович — канд. техн. наук, доцент,  
Шеф Екатерина Александровна — студентка НИЯУ МИФИ,  
Бокучава Гизо Дазмирович — канд. физ.-мат. наук, начальник сектора,  
Папушкин Игорь Викторович — инженер ЛНФ ОИЯИ.  
E-mail: gazal.ayman@yandex.ru, visconst@rambler.ru, piv@nf.jinr.ru, gizo@nf.jinr.ru, liakatia@mail.ru*

#### "ВИСТ Групп" внедрила тестовую версию автоматизированной системы управления подземными горными работами на опытном участке месторождения "Лунное"

Компания "ВИСТ Групп" (входит в ГК "Цифра"), один из российских лидеров в области цифровизации крупных горнодобывающих предприятий, запустила в опытно-промышленную эксплуатацию автоматизированную систему управления подземными горными работами на участке месторождения "Лунное" в Магаданской области. Специалисты компании успешно запустили пилотный проект, включающий в себя разработку новых технических решений и нового функционала программного обеспечения.

Заказчиком выступило АО "Серебро Магадана", «дочка» "Полиметалла" - крупная горнорудная компания, занимающаяся добычей драгоценных металлов. Разработка месторождений - это сложный процесс, который требует привлечения специальной техники, оборудования и высококвалифицированных кадров. Инновационные автоматизированные решения - надежный и современный способ сделать работу значительно эффективнее.

Созданное для опытного участка программное обеспечение позволило автоматизировать формирование единой производственной отчетности на

производственных участках «Серебра Магадана» с учетом всех имеющихся особенностей подземной отработки. Разработанная система проходит испытания сложными горными работами под землей, суровыми колымскими морозами и резкими перепадами температур: от теплой шахты до сильного холода на открытом воздухе.

В рамках реализации проекта для обеспечения необходимой функциональности были применены новые технические решения. Для этого специалисты "ВИСТ Групп" провели ряд исследований и экспериментов. Для отработки решений в систему были подключены два подземных автосамосвала и погрузочно-доставочная машина, работающие в общем цикле.

Специалисты «Серебра Магадана» в настоящее время накапливают опыт работы с новой системой, оценивают возможности, которые дает новый инструмент в управлении подземными горными работами и анализируют результаты. Тестовый режим продлится не меньше двух месяцев.

[Http://www.vistgroup.ru](http://www.vistgroup.ru)