

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЕ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

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

Прибор Spectroelph-FRR предназначен для спектрального анализа результатов электрофизического неразрушающего контроля (ЭФК) технологического оборудования, материалов и изделий. Представлены результаты испытаний прибора в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка в ОИЯИ (г. Дубна, Россия), где с его помощью исследовано деформационное упрочнение аустенитной стали 12X18H10T при растяжении на нагрузочной машине LM-29 в интервале напряжений 100...700 МПа методами дифракции тепловых нейтронов и ЭФК.

Ключевые слова: электрофизическая диагностика, физико-механические испытания материалов, методами дифракции тепловых нейтронов, деформационное упрочнение аустенитной стали.

Введение

Электрофизический метод неразрушающего контроля — метод сканирующей контактной потенциометрии (СКП), разработанный в лаборатории ElphysLAB НИЯУ МИФИ, обеспечивает эффективную диагностику технического оборудования, материалов и изделий [1]. Метод СКП относится к пассивной электромагнитной дефектоскопии и основан на измерении контактной разности потенциалов. Реализация метода не требует обязательного пропускания электрического тока или приложения электрического напряжения к объекту контроля. Для изучения структурных неоднородностей в сварных соединениях, материалах и изделиях под нагрузкой разработаны электрофизические дефектоскопы ЭДСС-1 и ЭДСС-1 РД и сканеры поверхности Elph-200/2 и Spectroelph-FRR.

Принцип действия дефектоскопов и сканеров поверхности

В качестве первичных преобразователей в указанных приборах используются измерительные контакты, изготавливаемые из различных металлов или сплавов. Рабочая поверхность преобразователей подвергается механической обработке. При взаимодействии измерительного контакта преобразователя с объектом контроля обеспечивается прохождение электрического тока через поверхность контакта. В отдельных случаях при измерениях используются специальные смазочные материалы. При контакте двух металлов образуются две взаимодействующие поверхности, представляющие собой эффективные барьеры проводимости. Между атомами этих поверхностей возникают силы, приводящие к коррелированным изменениям их электронных оболочек и зависящие от величины зазора между поверхностями.

Применение достижений современных измерительных технологий в конструкциях электрофизических дефектоскопов и сканеров позволяет минимизировать погрешность измерений, связанную с процессами, происходящими на поверхности [2,3]:

- хемосорбции на металлической поверхности или адсорбции газов, паров, вещества из растворов с образованием на поверхности металла химического соединения;

- металлической и биметаллической адгезии;
- когезивного взаимодействия металлов, в результате которого происходит сцепление молекул под действием сил притяжения ковалентной, ионной или металлической природы.

Высокоинформативный электрический сигнал образуется на пятнах контакта преобразователя с объектом контроля, находящегося под нагрузкой. Число пятен контакта преобразователя определяется интенсивностью контактного взаимодействия в зоне контакта и процессами, протекающими в ней, а также существенно зависит от изменения параметров волнистости и шероховатости. Чувствительный элемент — в данном случае это поверхность биметаллического контакта — преобразует внешнее воздействие в электрические сигналы.

Взаимодействие электрофизического преобразователя с поверхностью объекта описывается статистическими законами. В зависимости от шероховатости поверхностей и приложенной нагрузки размер пятен реального контакта составляет диапазон 0,1...40 мкм. На этих пятнах возникают значения давления, достигающие 10...20% от теоретической прочности материала. С увеличением нагрузки рост площади реального контакта происходит в основном за счет увеличения числа пятен при незначительном возрастании их размеров.

Площадь реального контакта составляет 10^{-4} ... 10^{-1} номинальной площади касания и даже при больших нагрузках не превышает 40%. Для пары металлов с различной твердостью площадь фактического контакта определяется свойствами более мягкого металла и геометрией поверхности твердого [4, 5].

Описание экспериментальной установки

Прибор Spectroelph-FRR адаптирован к проведению испытаний материалов на разрывной машине LM-29, входящей в состав экспериментального оборудования нейтронного фурье-стресс-дифрактометра (ФСД) на импульсном реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ (г. Дубна).

В состав прибора электрофизического неразрушающего контроля (ЭФК) входят усилитель низковольтного входного сигнала и микроконтроллер со встроенным АЦП, который соединяется с ПК через интерфейс USB или UART. Для автоматиза-

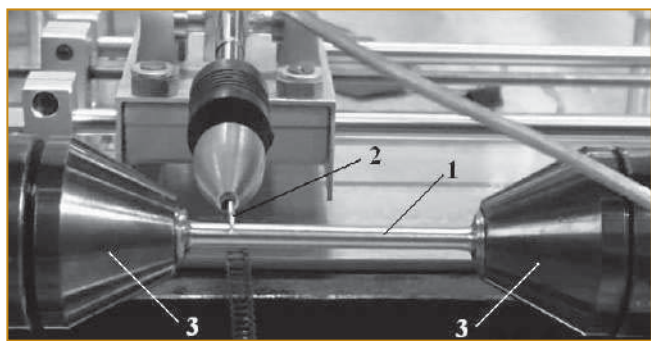


Рис. 1. Сканирование поверхности образца в процессе физико-механических испытаний на реакторе ИБР-2: 1– образец; 2–преобразователь; 3– механические захваты нагрузочной машины LM-29

Основные технические характеристики прибора Spectroelph-FRR

Материал преобразователя игольчатого типа (Ø2..3 мм) сталь У7-У10 (ГОСТ 1435-99)
 Длина измерительной штанги, мм30
 Максимальная/минимальная скорость скольжения преобразователя по поверхности образца, мм/с2,2/0,5
 Чувствительность преобразователя, мкВ0,01
 Сила поджатия преобразователя к образцу, Н....0,1

ции измерений применяются платы Arduino Mega 2560 и Arduino Micro. Плата Arduino Micro представляет собой устройство на основе микроконтроллера ATmega32U4, содержащая кварцевый резонатор на 16 МГц. Семь из 20 цифровых входов/выходов используются в качестве ШИМ-выходов, а остальные — в качестве аналоговых входов. Стабилизированный источник напряжения на 5 В используется для питания микроконтроллера и других компонентов устройства. Это напряжение может поступать как от встроенного стабилизатора напряжения, так и через USB от другого стабилизированного источника питания. Максимальный выходной ток составляет 50 мА. Объем памяти микроконтроллера ATmega32U4 составляет 32 Кб.

Прибор Spectroelph-FRR состоит из механической и измерительной частей и управляется с помощью ПО, установленного на ноутбуке. Для обеспечения линейного перемещения датчика вдоль исследуемой поверхности используется шаговый двигатель.

При испытаниях датчик скользит поступательно в горизонтальном направлении по поверхности образца (рис. 1) с помощью винтового механизма, приводящегося в движение от шагового двигателя. Каретка с датчиком перемещается поступательно по двум цилиндрическим направляющим. По три опоры вращения используются с каждой стороны винтового механизма и направляющих. К измери-

тельной штанге телескопического типа прикреплен игольчатый преобразователь, диаметром 3 мм. Штанга крепится на консоли и поджимается к поверхности образца с помощью груза, закрепленного на винтовой пружине.

Для получения высокого разрешения измерительных сигналов используется прецизионный АЦП с интегрированным в один корпус с ним программируемым предусилителем. При частоте выборки 2,5 SPS (samples per second) используемый 32-разрядный АЦП ADS1262 фирмы Texas Instruments имеет разрешение 23,5 бита без шума (noise free bits), что при величине опорного напряжения 2,5 В и коэффициенте предусиления около 30 позволяет получить предельное разрешение порядка нескольких десятков нановольт. Программируемый коэффициент усиления заметно расширяет диапазон значений входных напряжений. Передача данных осуществляется по протоколу SPI, программное обеспечение выполнено на языке C++. В информационно-измерительной системе используются также мультиметры с базовым классом точности $\geq 0,0015$ и разрешением 6,5 разрядов. Рабочая полоса частот соответствует значениям 3 Гц...300 кГц, а скорость измерений — до 1000 считываний/с. Мультиметры подключаются к ПК через интерфейсы USB, GPIB или LAN.

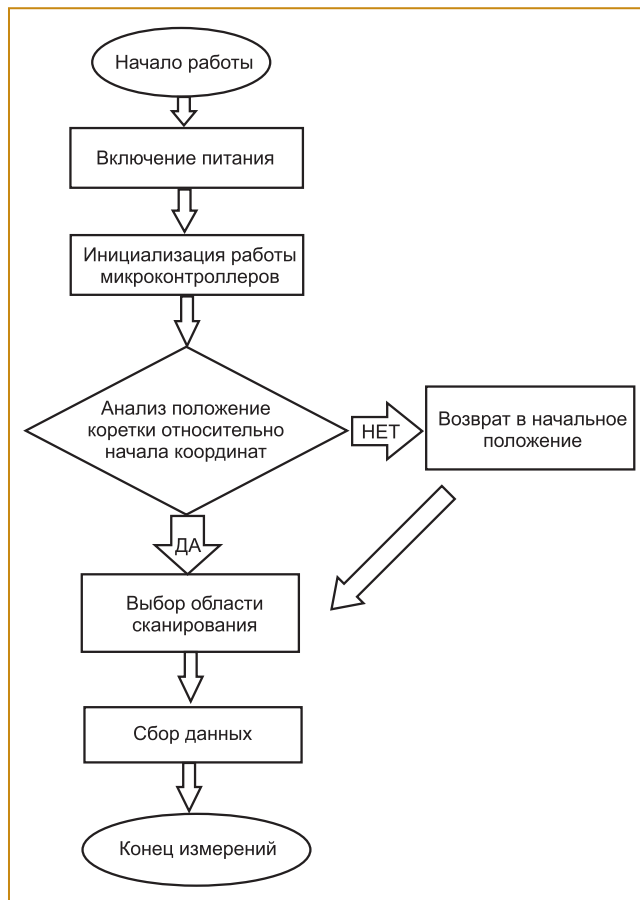


Рис. 2. Блок-схема программы управления прибором Spectroelph-FRR

Прибор Spectroelph-FRR предназначен для локализации структурных неоднородностей как во временной, так и частотной областях.

Алгоритм проведения измерений прибором Spectroelph-FRR представлен на рис. 2.

Проведение эксперимента на растяжение

В Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка в ОИЯИ (г. Дубна, Россия) прошли испытания прибора электрофизического неразрушающего контроля Spectroelph-FRR, при исследовании деформационного упрочнения аустенитной стали 12X18 H10 T на нагрузочной машине LM-29. Образцы для испытаний из стали 12X18 H10 T 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. Распределение потенциалов на поверхности получено относительно потенциала «массы» разрывной машины.

Испытания проводились при нормальных условиях в интервале напряжений 100...700 МПа. На каждой нагрузке образец выдерживался в течение 1...2 ч, при этом производилось до 30 измерительных сетов измерений на скорости сканирования 2,2 мм/с. Протяженность каждого сета по времени изменялась в пределах 23...25 с.

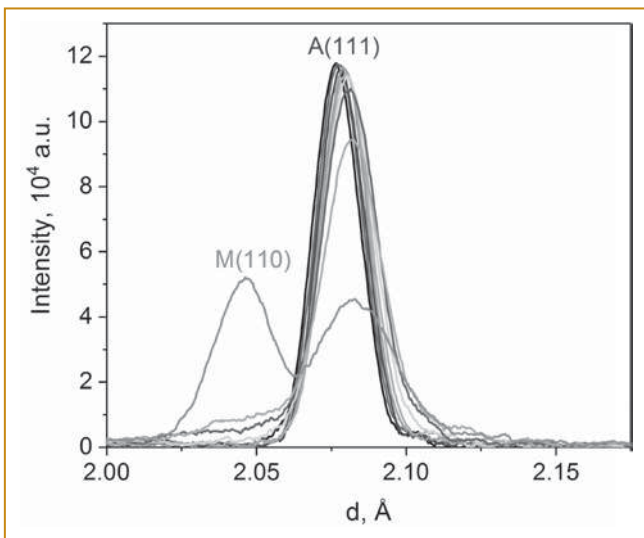


Рис. 4. Участок спектра для образца из нержавеющей стали 12X18H10T в области пиков (111) аустенита и (110) мартенсита

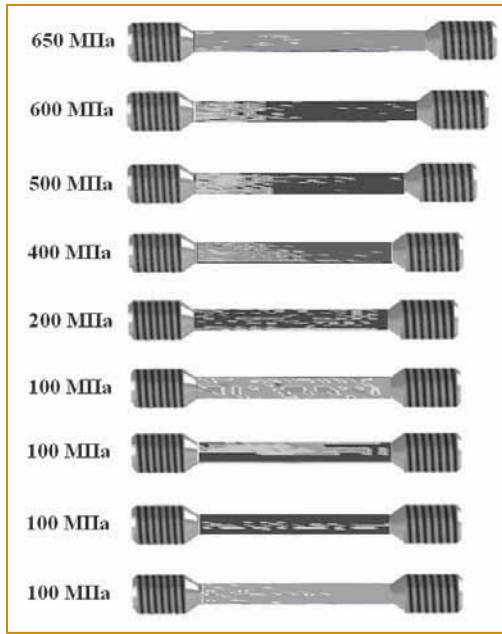


Рис. 3. Проекция потенциограмм на поверхности образца в режимах испытаний при напряжениях 100...650 МПа и значении СУС=4,886. Удлинение образца при разрушении составило 0,4

Результаты испытаний

На рис. 3 показан макет испытанного образца с нанесенными на его поверхности линейно-временными потенциограммами для соответствующих режимов испытаний. Наблюдается существенная неоднородность распределения электрических потенциалов на поверхности образца, связанная с деформационным упрочнением и образованием мартенситной фазы, наличие которой установлено по дифракционным спектрам тепловых нейтронов. На потенциограммах по оси x отложена координата (в мм), а по оси y — число сетов измерений. На представленном рисунке нагрузка к образцу прикладывалась с левой стороны. Потенциограммы построены для одного и того же значения СУС=4,886, где СУС= $|g\Delta\phi$ и

$\Delta\phi$ — регистрируемая разность электрических потенциалов.

Неоднородность распределения электрических потенциалов формируется при напряжении 100 МПа с той стороны образца, где приложена механическая нагрузка. Для данной нагрузки показаны несколько последовательно построенных потенциограмм. По цветовым рефлексам видно, что сначала указанный процесс проявляется в виде образования отдельных разрозненных очагов, которые постепенно распространяются с левой стороны образца к противоположной стороне. Со временем образующиеся пятна объединяются в сплошные полосы, которые занимают значительную часть потенциограммы, а затем полосы дробятся на отдельные крупные фрагменты. При напряжении 200 МПа на макете наблюдается более равномерное распределение полос по поверхности, и отмечаются отдельные участки с относительно высокими значениями разности потенциалов.

При дальнейшем увеличении напряжения участки с высоким значением потенциала концентрируются преимущественно возле левой стороны образца. Цветовой градиент неоднородности потенциалов возрастает и наиболее заметно проявляется при напряжениях 500 и 600 МПа. Далее при напряжении 650 и особенно при 700 МПа сформировавшиеся участки с высоким значением потенциала исчезают с потенциограмм.

Эксперименты по дифракции нейтронов выполнялись на нейтронном ФСД на импульсном реакторе ИБР-2 [6–8] синхронно с работой нагрузочной машины. На рис. 4 представлен участок нейтронно-

го спектра по времени пролета, на котором видны дифракционные пики от фазы аустенита А (111) и от образовавшейся в результате пластической деформации фазы мартенсита М (110). Отметим также, что образец после испытаний становился магнитным, за исключением резбовых концов.

Результаты частотно-временного анализа разности электрических потенциалов с оконной функцией Чои-Вильямса показаны на рис. 5.

На спектрограммах по оси x отложена частота в условных единицах, а по оси y — число сетов измерений. Из рисунка видно, как в первоначальном однородном спектре с течением времени периодически образуются и исчезают частотные неоднородности, локализованные около начала координат. Наиболее заметна их активизация при напряжении 400 МПа. Можно предположить, что при этой нагрузке происходит рост источников внутренних механических напряжений, влияющих на распределение потенциалов на поверхности. Появление локализованных частотных полос на спектрограммах по нагрузкам совпадает с концентрацией высоких значений потенциала с левой стороны образца на потенциограммах, то есть когда прикладываемые напряжения соответственно равны 400, 500 и 600 МПа. С увеличением нагрузки форма частотных полос становятся более полой, то есть имеет менее затухающий профиль по частоте. Также как и в предыдущем случае при напряжении 650 МПа и выше появление частотных полос на спектрограммах не наблюдалось.

Заключение

В Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка в ОИЯИ (г. Дубна, Россия) прошли испытания прибора электрофизического неразрушающего контроля Spectroelph-FRR, разработанного в лаборатории ElphysLAB НИЯУ МИФИ. При исследовании деформа-

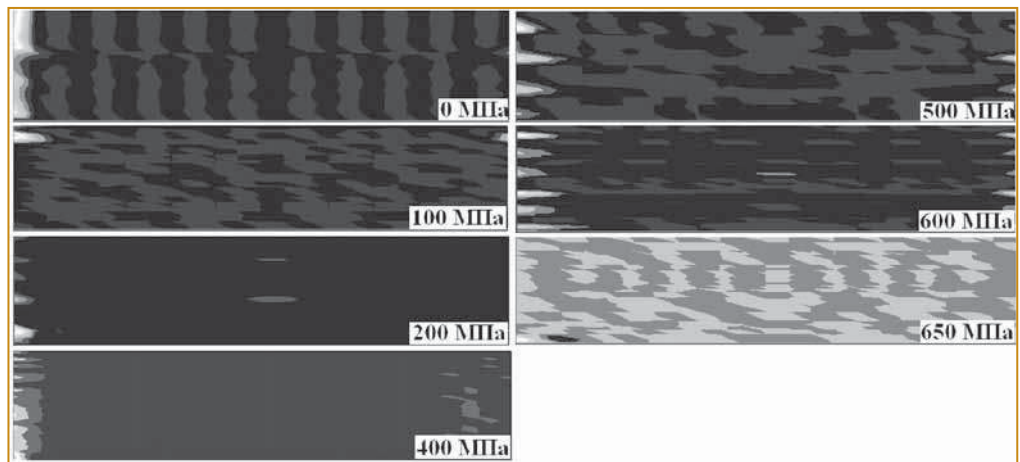


Рис. 5. Спектрограммы, полученные в режимах испытаний стали 12X18H10T при напряжениях 100...650 МПа

ционного упрочнения аустенитной стали 12X18 H10 T на нагрузочной машине LM-29 в интервале напряжений 100...650 МПа методами дифракции тепловых нейтронов и ЭФК установлено образование в образце мартенситной фазы. При этом в интервале напряжений 400...600 МПа на потенциограммах обнаружены локальные экстремумы электрического потенциала, а на спектрограммах — периодически появляющиеся неоднородности в частотной области.

Список литературы

1. Surin V. New potential for potentiometry // Nuclear Engineering International. 2018. 63(765). P. 30-32.
2. Ferrante J., Smith J.R. Theory of bimetallic interface // Physical. Review. B. 1985. Vol.31. pp. 3427-3434.
3. Vinet P., Rose J.H., Ferrante J. and Smith J.R. Universal Features of the Equation of State of Solids // Journal of Physics: Condensed Matter. 1989. 1. 1941-1963.
4. Тейбор Д. Проблемы трения и смазки. 1981. Т.103. №2. С.1-19.
5. Дроздов Ю.Н., Арчегов В.Г., Смирнов В.И. Противозадирная стойкость трущихся тел. М.: Наука, 1981.
6. Boualem Boashash. Time frequency signal analysis and processing. Elsevier. 2003. 744 p.
7. 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 and Processing. 2002. V.74 [Suppl1], pp. s86-s88.
8. Bokuchava G., Neutron Fourier Stress. Diffractometer FSD at the IBR-2 pulsed reactor, Crystals, 2018, Vol. 8, Issue 8:318.

Абу Газал Айман Ахед — канд. техн. наук, ассистент,

Сурин Виталий Иванович — канд. техн. наук, доцент 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

Читайте в следующем номере журнала подборки материалов по темам:

- автоматизация металлургических предприятий;
- адаптивные технологии и промышленная автоматизация;
- современные решения в области промышленной визуализации, индикации, светотехники.