

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В СПЛАВЕ ВП-30 ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ И ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Черняева Е. В., Мерсон Д. Л.*, Мещеряков Д. Е.*

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти
lena@smel.math.spbu.ru*

Введение

В настоящее время в практике неразрушающего контроля потенциально опасного оборудования метод акустической эмиссии (АЭ) находит все более широкое применение [1]. В [2, 3] была показана перспективность применения спектрального анализа сигналов АЭ для выявления охрупченного состояния (в частности, в результате проявления явления необратимой отпускной хрупкости) трубных сталей. Было показано, что предложенная в [2] для стали 35Г2 классификация сигналов АЭ по форме кривой спектральной плотности и критерий оценки состояния материала (согласно которому, материал имеет склонность к хрупкому разрушению, если более 40% от общего числа зарегистрированных составляют «двугорбые» сигналы типа Ia), пригодны и для ряда других трубных сталей [3]. Однако вопрос об их применимости для других типов сталей остался открытым.

В настоящей работе исследуется спектральный состав сигналов АЭ в промышленном сплаве ВП-30 (30ХСНВФА). Кроме того, оценивается возможность применения метода кинетического индентирования, совмещенного с методом АЭ, в качестве альтернативы методу одноосного растяжения для оценки состояния материала.

Методика экспериментов

Разрывные образцы из сплава ВП-30 (С – 0,3%; Si – 0,84%; Cr – 1,3%; Mn – 0,45%; Ni – 1,38%; V – 0, 17%; W – 0,75%) с размерами рабочей части 4×8×30 мм подвергали закалке от температуры 870 °С в воду с последующим отпуском в течение 1 часа в диапазоне температур 250 – 450 °С с интервалом 50 °С.

Закаленный образец и образцы после отпуска индентировали со скоростью внедрения конического твердосплавного индентора 0,4 мм/мин с записью сигналов АЭ. В качестве силового привода в оригинальной установке для индентирования использовалась разрывная машина H50K-T (производства Tinius Olsen Ltd). На этой же машине образцы испытывали на одноосное растяжение со скоростью деформирования 1,2 мм/мин. С помощью сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP проводили исследование изломов разрушенных образцов. Кроме того, с поверхности излома методом рентгеноспектрального микроанализа на блоке рентгеновского энергетического спектрометра модели INCA Energy-300 снимали карты распределения химических элементов.

Для преобразования механических сигналов АЭ в электрические использовали датчик AE-900S-WB. Регистрацию АЭ проводили в полосе частот 50–1500 кГц при полном коэффициенте усиления системы 5000. Методика обработки и сортировки сигналов АЭ на группы по форме кривой спектральной плотности подробно описана в работе [4]. Считается, что природа сигналов АЭ внутри каждой группы одина и различна для разных групп.

Одной из наиболее удобных для графического представления характеристик спектра является медианная частота [5], делящая площадь под кривой спектральной плотности в выделенной полосе частот на две равные части. Она позволяет оценить вклад

низко- и высокочастотных составляющих спектра АЭ без детального изучения формы спектра, что, в ряде случаев, может оказаться полезным для экспресс-оценки состояния материала деталей или конструкций, подверженных действию различных нагрузок. Поэтому именно медианная частота и форма кривой спектральной плотности использовались в данной работе для изучения АЭ.

Результаты и обсуждение

В [2] была предложена классификация сигналов по форме кривой спектральной плотности (рис. 1) для стали 35Г2. Для наглядности на графиках изображены только кривые математического ожидания для всех групп. В правом верхнем углу каждого спектра приведено графическое обозначение, используемое в дальнейшем тексте.

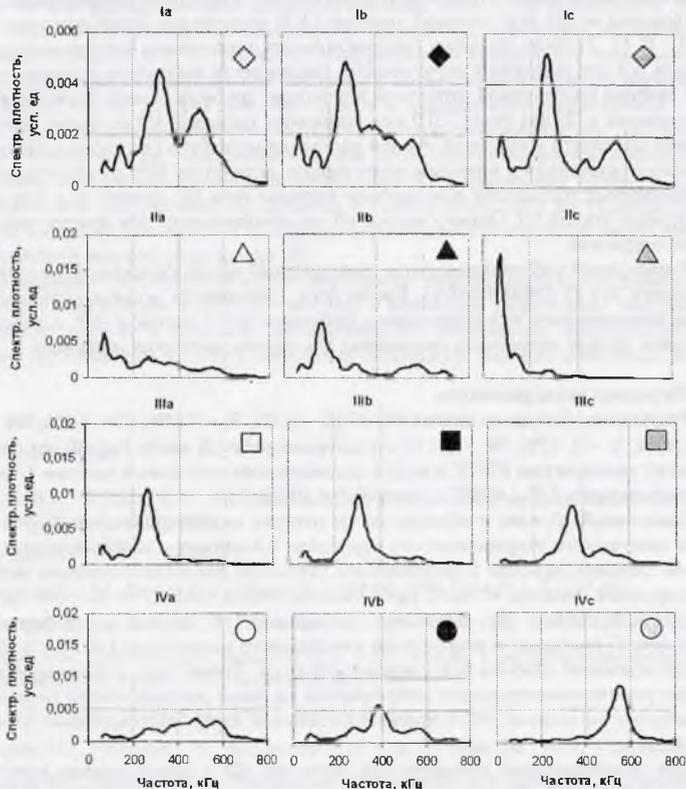


Рис.1. Основные группы сигналов АЭ в стали 35Г2 [2].

В процессе одноосного растяжения закаленного образца сплава ВП-30 было зарегистрировано около 8000 сигналов АЭ, которые были рассортированы по виду кривой спектральной плотности [4] на 9 групп (рис. 2). Сопоставление полученных данных с результатами исследования АЭ в стали 35Г2 позволило отнести все сигналы к нескольким типам, похожим на типы, приведенные на рис. 1. Поэтому в дальнейшем будем использовать те же обозначения.

Спектральный состав АЭ был весьма однороден. Наиболее многочисленную (95%) группу составляли сигналы типа Па, которые регистрировались во всем диапазоне приложенных напряжений (рис. 3). Вторую и третью по численности (примерно по 2%) группы составили сигналы, очень похожие на «двугорбые» сигналы типа I для стали 35Г2 (рис.1), характерные для охрупченного состояния этой стали. Они появлялись уже на начальной стадии нагружения, и при достаточно больших деформациях исчезали (рис.3). Т.е. поведение этих типов сигналов было таким же, как у аналогичных типов для стали 35Г2 [2] и трубных сталей, изученных в [3]. Остальные сигналы составляли менее 1% от общего числа зарегистрированных.

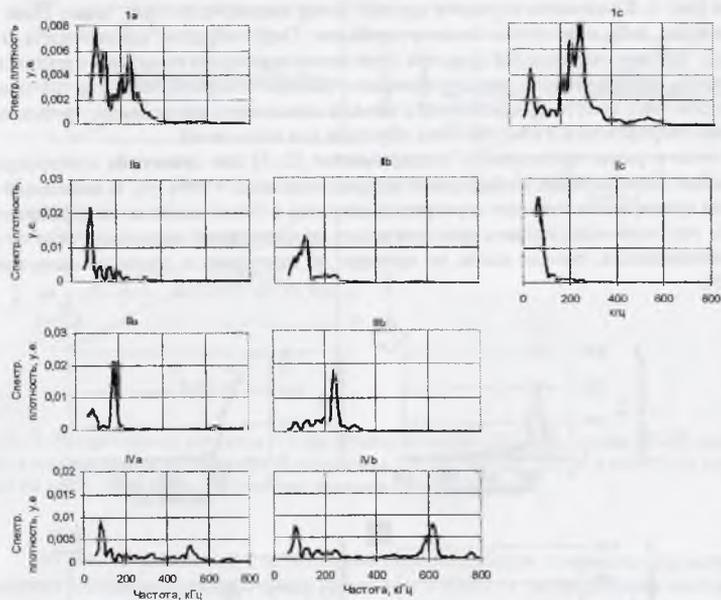


Рис.2. Основные группы сигналов АЭ, зарегистрированные при одноосном растяжении закаленного образца сплава ВП-30

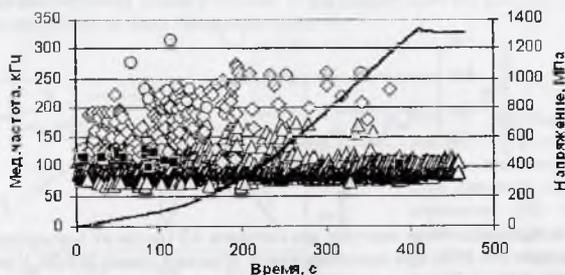


Рис. 3. Механическая диаграмма закаленного образца сплава ВП-30 и привязанные к ней по времени значения медианных частот сигналов АЭ соответствующих типов (обозначения типов сигналов как на рис. 1)

С точки зрения разработанного в [2] критерия, малое количество характерных «двугорбых» сигналов свидетельствует о достаточно вязком состоянии материала после закалки.

Вторая часть работы была посвящена изучению АЭ при индентировании закаленного образца и образцов после закалки и отпуска 1 час при температурах 250, 300, 350 и 400 °С. Количество сигналов АЭ составляло от 10–40 в закаленном образце до 400–500 – в образце после отпуска 350 °С (в каждый образец производили от трех до шести уколов индентором). АЭ по спектральному составу была практически такой же, как АЭ при растяжении. До 97% составляли низкочастотные сигналы типов Па и Пс по классификации рис. 1. Количество сигналов других, более высокочастотных, типов было довольно малым, либо они полностью отсутствовали. Таким образом, идентичность спектрального состава сигналов АЭ при этих двух видах испытания позволяет надеяться на возможность использования неразрушающего метода контроля качества материала (индентирование) вместо традиционного метода одноосного растяжения, требующего остановки оборудования и изготовления образцов для испытаний.

В этом и ранее проведенных экспериментах [2, 3] для сравнения спектрограмм традиционно использовали коэффициент аппроксимации $R = 30\%$ [4]. В настоящей работе была предпринята попытка сортировки сигналов с более высоким коэффициентом $R = 85\%$, что позволило выявить дополнительно до пяти групп низкочастотных сигналов, различающихся, прежде всего, по времени их появления в процессе нагружения (рис. 4, 5).

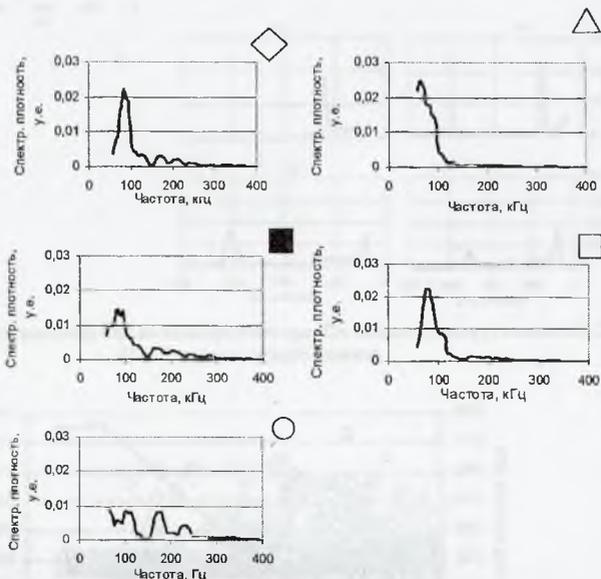


Рис. 4. Основные типы спектров для сигналов АЭ (после их сортировки с коэффициентом аппроксимации $R = 85\%$) при индентировании образцов сплава ВП-30. Условно самые низкочастотные сигналы обозначены треугольником, самые высокочастотные – кружком, сигналы промежуточной частоты – квадратом, по аналогии с ранее использованной классификацией.

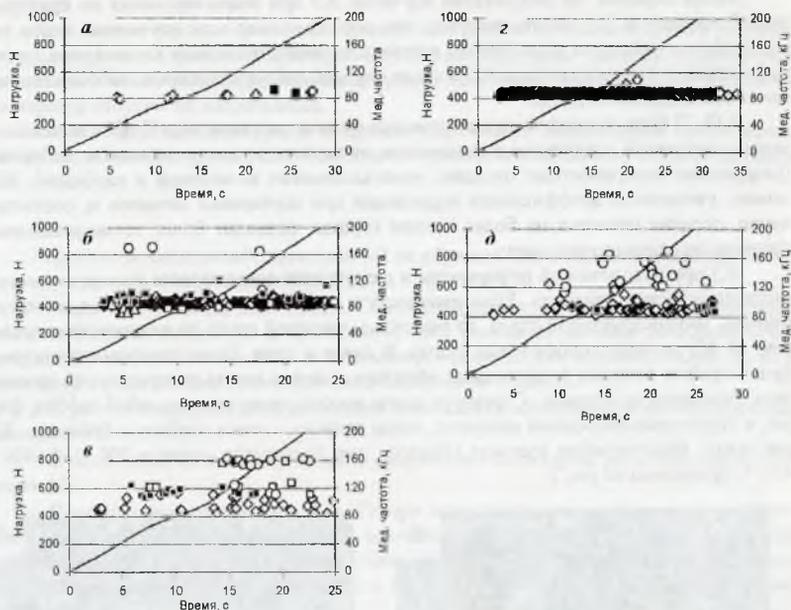


Рис. 5. Распределение сигналов АЭ при индентировании образцов сплава ВП-30 после закалки (а) и последующего отпуска при температурах 250 (б), 300 (в), 350 (г) и 450 °С (д). Обозначения как на рис. 4. Диаграмма нагружения показана сплошной линией.

Из рис. 5. видно, что с изменением термообработки изменяется характер распределения сигналов разного типа во времени и в области распределения значений медианных частот. Наиболее однородны сигналы АЭ в образцах после закалки и закалки с последующим отпуском при 350 °С, однако если в закаленном образце зафиксировано сравнительно мало сигналов, то после отпуска их количество резко увеличивается, достигая максимального значения после отпуска 350 °С. При этом же отпуске зафиксирована повышенная твердость в этом материале (рис. 6).

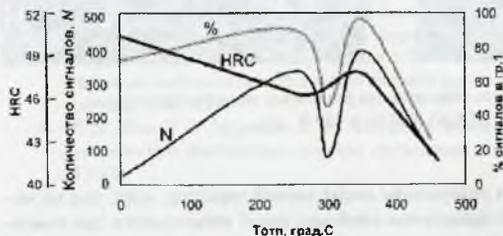


Рис. 6. Зависимость твердости (HRC), среднего (по трем уголкам индентором) количества сигналов АЭ (N) и содержания (%) сигналов в наиболее представительной группе от температуры отпуска образцов сплава ВП-30.

Таким образом, по результатам изучения АЭ при индентировании по критерию, разработанному в [2], можно говорить, что образцы после всех изученных видов термообработки находятся в достаточно вязком состоянии, поскольку характерные для охрупченного состояния сигналы АЭ во всех случаях либо отсутствуют, либо составляют ничтожно малое количество.

В [3, 7] было высказано предположение о связи сигналов типа II–IV с процессами микроразрушений структурных элементов, присутствующих в исходном материале (разрушение поверхностных оксидов, неметаллических включений и карбидов). Возможно, увеличение коэффициента корреляции при сортировке сигналов и, соответственно, деление сигналов на более мелкие группы, позволит более точно установить природу сигналов каждого вида.

АЭ при пластической деформации и разрушении основывается на структурных и металлургических факторах. Если прочность и пластичность определяются, в первую очередь, микроструктурой стали, то вязкость – чистой стали по включениям, примесям. И АЭ должна отражать эти факты. В связи с этим, были изучены структура и фрактографии изломов разрушенных образцов и сняты карты распределения химических элементов на изломах. Структура после закалки представляла собой сорбит, феррит и структурно-свободный цементит, после отпуска – смесь сорбита и бейнита. Характерные фрактографии изломов образцов для температур отпуска 300, 350, 400 и 450 °С приведены на рис. 7.

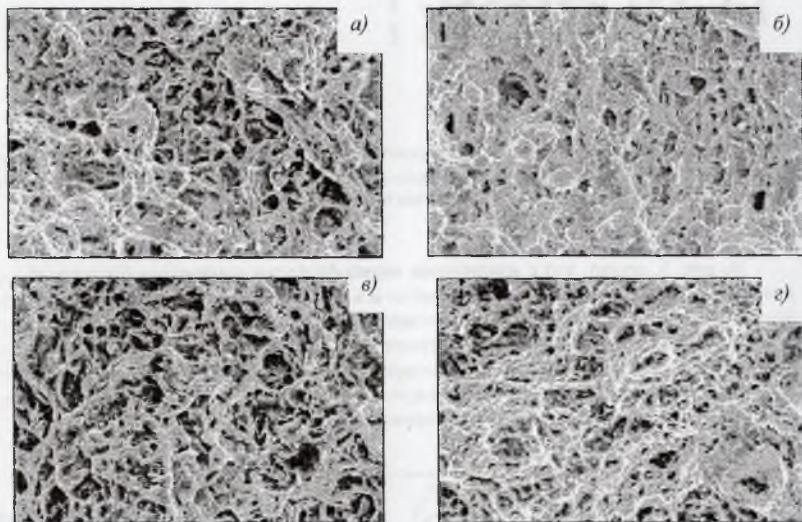


Рис. 7. Фрактографии изломов образцов для различных температур отпуска: 300 (а), 350 (б), 400 (в) и 450 °С (г)

Для всех температур отпуска разрушение носит вязкий характер, хотя, тем не менее, наиболее вязкий вид излома (характерные глубокие ямки) наблюдается при температурах отпуска 300 (а) и 450 °С (г), а наименее вязкий – для температуры 350 °С (ямки более мелкие, а их края более округлые, рис. 7,б).

При снятии карт распределения химических элементов анализируемая площадь была одинакова и составляла примерно 20×15 мкм. При этом заметной разницы распределения элементов (серы, марганца, хрома) на изломах в исследуемом диапазоне температур отпуска не наблюдалось.

Таким образом, структурные и фрактографические исследования подтвердили оценку состояния материала, сделанную на основании спектрального анализа сигналов АЭ.

Выводы

Комплекс исследований, проведенный на образцах промышленного сплава ВП-30, позволяет сделать следующие выводы:

– Разработанная в [2] для стали 35Г2 классификация сигналов АЭ по форме кривой спектральной плотности и критерий оценки состояния металла на основе спектрального анализа АЭ могут быть использованы не только для трубных сталей [3], но и для сталей с существенно отличающимися свойствами (ВП-30).

– С ростом твердости образцов стали повышается однородность регистрируемых сигналов АЭ.

– Отпуск после закалки приводит к увеличению количества регистрируемых сигналов АЭ.

– Спектральный состав сигналов АЭ при индентировании и одноосном растяжении идентичных образцов качественно одинаков, что позволяет говорить о высокой перспективности нового эффективного метода неразрушающего контроля состояния материала на основе совмещения методов кинетического индентирования и акустической эмиссии.

Авторы выражают искреннюю благодарность И.С. Ясникову за выполнение структурных и фрактографических исследований.

Список литературы

1. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. РД 03-131-97. Госгортехнадзор России. 1997 г.
2. Мерсон Д.Л., Черняева Е.В. Спектральные характеристики акустической эмиссии трубной стали в зависимости от температуры отпуска. // Деформация и разрушение материалов, 2005. № 5. С. 24-27.
3. Д.Л. Мерсон, Е. В. Черняева. Применение метода акустической эмиссии для оценки механических свойств трубных сталей. - М:ИТОМ.- 2007.- №5. – С.60-64
4. Д.Л.Мерсон, А.А.Разуваев, А.Ю.Виноградов. Применение методики анализа спектральных образов сигналов акустической эмиссии для исследования повреждаемости покрытий TiN на стальной подложке. // Дефектоскопия, 2002. № 7. С. 37-46)
5. Муравин Г.Б., Симкин Я.В., Мерман А.И. Идентификация механизмов разрушения материалов методами спектрального анализа сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия, 1989. № 4. С. 8-15
6. В.В. Шид, Г.Б. Муравин, В.Ф. Чабуркин. Вопросы применения метода акустической эмиссии при диагностике сварных трубопроводов // Дефектоскопия.- 1993. - № 8. - С. 17-23.