

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПОРИСТЫХ СВС-МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ И АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В.В.Поляков, А.В.Егоров

*На примере пористых металлов и псевдосплавов рассмотрены экспериментальные данные по измерению ультразвуковых характеристик и информативных параметров акустической эмиссии при нагружении. Проанализировано влияние структуры материалов на параметры, которые могут быть использованы при диагностике материалов и изделий.*

### Введение

Создание новых конструкционных материалов, подвергающихся при эксплуатации внешним механическим воздействиям, требует разработки адекватных методов диагностики и контроля. Особую актуальность имеет создание таких методов для материалов с резко неоднородным строением, примером которых являются изделия, полученные с помощью СВС-технологий. В этом случае в силу сложности строения интерпретация получаемых при диагностике информативных параметров весьма сложна, поэтому имеющиеся методы [1] не дают необходимой точности и надежности, а зачастую вообще не применимы.

В настоящей работе рассматриваются возможности измерений ультразвуковых характеристик (скоростей продольных и поперечных упругих волн, динамических модулей упругости) и метода акустической эмиссии (с такими информативными параметрами, как суммарный счет и скорость счета) для задач диагностики пористых металлических материалов

### Измерение ультразвуковых характеристик

В качестве объектов для экспериментального исследования, представляющих многокомпонентные пористые материалы, использовались спеченные порошковые материалы на основе железа и меди. В случае псевдосплавов особенности строения учитывались путем введения объемных концентраций компонентов  $C_i$ :

$$C_i = \frac{V_i}{V},$$

где индекс  $i$  - порядковый номер компонента, входящего в состав псевдосплава;  $V_i$  -

объем, занимаемый соответствующей компонентой;  $V$  - общий объем материала, а также интегральной пористости

$$P = 1 - \frac{\rho}{\rho_k},$$

где  $\rho$  и  $\rho_k$  - плотности пористого и компактного материалов соответственно. В случае псевдосплава Fe - Cu концентрации металлических компонентов  $C_{Fe}$  и  $C_{Cu}$  и пористость  $P$  были связаны между собой соотношением

$$C_{Fe} + C_{Cu} + P = 1.$$

Концентрации железа и меди изменялись в интервале от 0 до 80-90% (в зависимости от интегральной пористости). Это обеспечивало образование как изолированных, так и «бесконечных» кластеров металлических компонентов. Пористость материалов задавалась в широком интервале от 3-5% до 30-40%. Изменение пористости в интервале вплоть до высокопористого состояния позволяло выявить роль качественных изменений в структуре порового кластера.

Образцы для испытаний были изготовлены путем однократного прессования металлических порошков промышленных марок на установке ZD-10/90 до требуемой степени пористости и последующего спекания в вакуумной печи при температуре, обеспечивающей образование химической связи между частицами. Измерение параметров структуры порошков и спеченных металлов проводилось методами оптической металлографии с использованием микроскопа НЕОРНОТ-32. Анализ металлографических шлифов свидетельствовал, что при малой пористости ( $P < 0,1$ ) поры образуют систему изолированных кластеров, располагающихся по межзеренным границам и внутри зерен. При повышении пористости возникает система сообщающихся пор, расположенных преимуще-

ственно по межзеренным границам с сохранением части изолированных пор.

В качестве экспериментальных характеристик, использовавшихся для анализа механических свойств, выступали скорости ультразвуковых волн. Измерения скоростей проводились с помощью фазово-интерференционного метода на автоматизированном испытательном комплексе, частота измерений составляла 2,5 МГц. При измерении скоростей ультразвука использовались образцы, имевшие вид цилиндров диаметром 15 мм и высотой 4-6 мм. Модули Юнга  $E$  определялись через измеренные значения скоростей продольной  $C_l$  и поперечной  $C_t$  ультразвуковых волн по формуле

$$E = \frac{3C_l^2 - 4C_t^2}{C_l^2 - C_t^2} C_t^2 \rho,$$

где  $\rho$  - плотность материала.

Результаты измерений упругих модулей представлены на рис. 1 и рис. 2 в виде экспериментальных точек. Большой разброс этих точек обусловлен крайней неоднородностью структуры образцов, вызывающей значительное изменение в значениях модуля упругости. Отчетливо наблюдается сильное влияние на величину упругих характеристик как степени пористости, повышение которой приводит к быстрому уменьшению модуля Юнга в связи с разупрочнением материала. Повышение модуля упругости с ростом концентрации железного компонента отражает более высокие значения  $E$  в компактном железе по сравнению с компактной медью. Теоретические кривые изображены до значений  $C_{Fe}$ , соответствующих концентрациям  $1-P$  (каркас из железа).

Для иллюстрации влияния особенностей строения на поведение упругих модулей на рис. 1 и рис. 2 приведены также теоретические кривые, вычисленные для различных геометрических моделей структуры [2, 3]. Именно, кривые на рис. 1 отвечают случаю отдельных изолированных пор, а на рис. 2 – случаю связанного порового кластера, возникающего при значениях  $P$ , превышающих порог перколяции. Верхние кривые соответствуют передаче упругих напряжений только по номинальному сечению твердого каркаса, а нижние – распределению этих напряжений по всему каркасу.

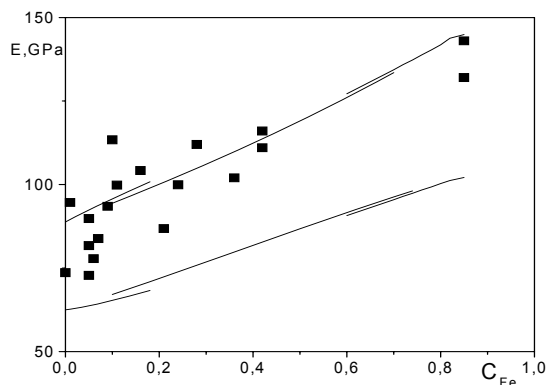


Рис. 2. Модули упругости пористого псевдосплава Fe - Cu при  $P = 15\%$

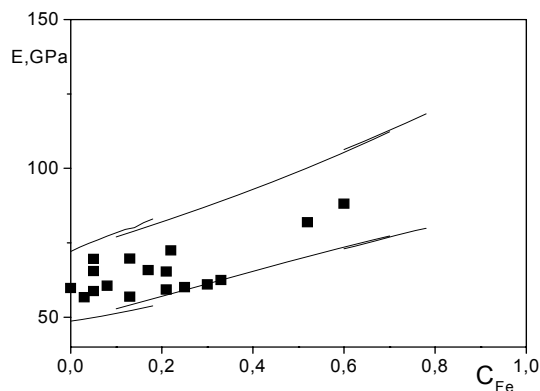


Рис. 3. Модули упругости пористого псевдосплава Fe - Cu при  $P = 25\%$

### Измерение акустической эмиссии при нагружении

Акустическая эмиссия – процесс излучения механических волн, вызванных локальной динамической перестройкой внутренней структуры материала. Под действием внешнего воздействия в объекте испытаний начинают работать источники акустической эмиссии, порождающие акустическое поле, которое содержит информацию о происходящих в материале процессах [4, 5]. Несмотря на то, что сигнал акустической эмиссии относится к механическим колебаниям, на практике оперируют электрическими сигналами, полученными на выходе датчика, т.к. именно они регистрируются электронной аппаратурой. В качестве регистрируемых параметров обычно

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПОРИСТЫХ СВС-МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ И АКУСТИКО- ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

используют суммарную акустическую эмиссию, интенсивность, скорость счета актов, амплитуды сигналов и их средний уровень и другие параметры.

В настоящей работе изучение акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении проводилось на экспериментальной установке [6, 7], позволявшей проводить механические испытания на растяжение и регистрировать основные информативные параметры акустической эмиссии. В данной установке использовалась бесшумная система водяного нагружения, что позволяло свести к минимуму механические шумы, возникающие практически на всех серийных испытательных машинах и подавляющие полезный сигнал. Деформация образца проводилась на испытательной машине, обеспечивавшей постоянную скорость нагружения. Обработка сигналов проводилась в ЭВМ совместно с данными, полученными от датчиков механического напряжения и деформации. Это позволяло одновременно с измерением характеристик акустической эмиссии определять кривые деформационного упрочнения "напряжение  $\sigma$  - истинная деформация  $\varepsilon$ ". Основные испытания проводили на модельных образцах, изготовленных из порошкового железа указанным выше способом.

Акустическая эмиссия представляет собой случайный нестационарный процесс, статистические характеристики которого изменяются со временем. При нагружении исследуемого материала повышается напряжение, действующее внутри него. Когда оно достигает критического значения, приводящего к перестройке структуры локального объема, возникает волна напряжений, стимулирующая действие других источников акустической эмиссии. Происходит накопление энергии в волне за счет действия когерентно действующих источников, в этот момент интенсивность акустической эмиссии имеет «всплеск», и так до момента срабатывания других источников.

Для исследования влияния структуры на параметры акустической эмиссии при деформации и разрушении была проведена серия испытаний для образцов с различной пористостью. Типичные результаты измерений приведены на рис.3 для пористостей  $P = 0$  (компактное армо-железо), 5%, 10%, 15%, 30%. Там же для сопоставления приведены кривые деформационного упрочнения  $\sigma - \sqrt{\varepsilon}$ .

Из рис. 3а видно, что зависимость интенсивности акустической эмиссии  $\dot{N}_a$  от деформации имела немонотонный вид с ярко выраженным максимумом в области малых деформаций, характерным для пластичных металлов. В области значений  $\varepsilon$  от 4 до 9% ( $\sqrt{\varepsilon}$  от 0,2 до 0,3) интенсивность была минимальна. При больших значениях деформации, предшествующих разрушению, наблюдалось ее небольшое повышение. Наблюдается корреляция между изменением параметра  $\dot{N}_a$  и тремя стадиями деформационного упрочнения (отмеченными на кривой  $\sigma - \sqrt{\varepsilon}$  прямыми линиями). Это обусловлено сменой действующих механизмов и источников акустического излучения на разных стадиях пластического течения, предразрушения и разрушения.

Результаты исследования акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении пористого металла отражают существенное влияние пористости на закономерности акустического излучения. При пористости  $P = 5\%$  (рис.3б) наблюдается зависимость, имеющая максимум в области малых деформаций, последующий спад интенсивности и ее увеличение на третьей стадии деформации. При этом вклад в общее число актов акустической эмиссии на стадии, предшествующей разрушению, возрастает, а первый максимум несколько уменьшается.

При пористости  $P = 10\%$  (рис.3в) максимум при малых деформациях практически исчезал и  $\dot{N}_a$  монотонно возрастала с увеличением  $\varepsilon$ . Такое поведение акустической эмиссии характерно для хрупкого разрушения с интенсивным трещинообразованием. Переход к хрупкому разрушению связан с тем, что изолированные поры являются мощными концентраторами локальных напряжений и разрушение пористого металла происходит за счет развития трещин от одной поры к другой. Этот вывод, свидетельствующий о смене доминирующих механизмов пластической деформации и разрушения, подтверждается данными анализа структуры шлифов, проводившегося с помощью оптической микроскопии (рис.4а).

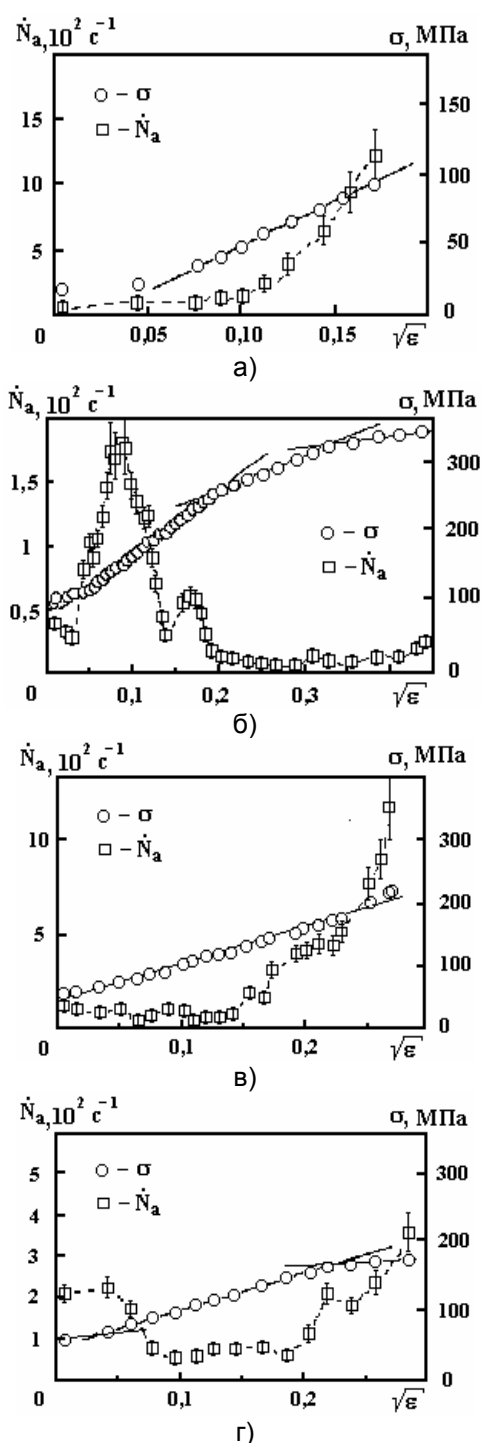


Рис. 3. Зависимость интенсивности акустической эмиссии от деформации для в пористого железа: а -  $P = 0$ , б -  $P = 5\%$ , в -  $P = 10\%$ , г -  $P = 15\%$ , д -  $P = 30\%$

Дальнейшее увеличение пористости ( $P = 15\%$ ), как видно из рис.3г, вновь привело к немонотонной зависимости  $\dot{N}_a(\epsilon)$ , с максимумом при малых  $\epsilon$ . При этой пористо-

сти трехстадийная кривая деформационного упрочнения сменялась двухстадийной. Проведенный металлографический анализ показал, что при  $P \sim 15\%$  наблюдалось раннее зарождение микротрещин на границах зерен при незначительной пластической деформации зерен. Это позволило интерпретировать первый пик как обусловленный образованием сетки микротрещин. При этом наблюдалось торможение микротрещин на границах порового пространства, затруднявшее формирование магистральных трещин, что приводило к существенной пластической деформации компактных участков материала (рис.4б).

Увеличение пористости до  $P = 30\%$  (рис.3д) приводило к тому, что максимум на зависимости  $\dot{N}_a(\epsilon)$  вновь исчезал. Интенсивность акустической эмиссии монотонно возрастала с увеличением деформации. Анализ микроструктуры показал (рис.4в), что развитие магистральных трещин начиналось практически без пластической деформации. Из рис.3д видно, что высокопористому материалу с подобными свойствами отвечает формирование одностадийной кривой деформационного упрочнения.

Таким образом, измерения информативных параметров акустической эмиссии позволяют получать важную информацию о деформационных процессах в пористом металлическом материале.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х книгах /Под ред. Клюева В.В. -2-е изд., перер. и доп. - М.: Машиностроение, 1986. - 352 с.
2. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. - 248 с.
3. Поляков В.В. Моделирование структуры и физико-механических свойств неоднородных конденсированных сред. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2000. - 93 с.
4. Трипалин А.С., Буйло С.И. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты. - Ростовский университет, 1986. - 160 с.
5. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. - М: Изд-во стандартов, 1976. - 272 с.
6. Поляков В.В., Егоров А.В., Свистун И.Н. Акустическая эмиссия при деформации пористого железа. // Письма в ЖТФ. 2001, Т.27. Вып.22. - С.14-18.
7. Егоров А.В., Гумиров Е.А., Поляков В.В. Устройство регистрации сигналов акустической эмиссии. Патент РФ № 2251688 от 10.05.2005