

ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ:
ОТ ПРЯМОЙ К ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ

В.Л. ВЕНГРИНОВИЧ
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Диагностика материалов (ДМ) методами неразрушающего контроля требует проведения прямых измерений физических величин, коррелирующих с изучаемыми свойствами материала. Примеры таких измерений приведены в табл. 1.

Табл. 1. Косвенные измерения при диагностике материалов

Что мы измеряем?	Что мы изучаем?
Мнимую и действительную части электрической проводимости	Химический состав Механические свойства Свойства упрочненных слоев
Магнитные характеристики: H_c, B, B_m, μ	Твердость стали Механические свойства стали Величину внутренних напряжений Содержание шаровидного графита в чугуне
Шум Баркгаузена (микромагнитные характеристики)	Твердость стали Содержание остаточного аустенита Величину внутренних напряжений в стали Степень усталостной деградации Степень упрочнения ППД
Изменение угла Брэгговского отражения	Содержание остаточного аустенита Величину внутренних напряжений Текстуру
Скорость акустической волны	Величину внутренних напряжений Содержание шаровидного графита в чугуне Плотность дефектов
Эмиссию фотонов при электрон-позитронной аннигиляции	Степень упрочнения ППД Плотность материала
Степень поглощения рентгеновского излучения	Плотность материала Атомный номер материала
Частоту ларморовской прецессии (ЯМР)	Содержание водорода

Существует глубокая аналогия подобных косвенных измерений с работой органов чувств живых существ. Характерные примеры приведены в табл. 2.

Табл. 2. Аналогия с 5-ю органами чувств

Какой сигнал мы воспринимаем?	Как мы интерпретируем сигнал?
Возбуждение колбочек и палочек сетчатки, которые воспринимаются как цвет и свет соответственно (глаз)	Воспринимается как визуальное изображение объекта
Акустическая вибрация (возбуждение) мембранных перепонки в диапазоне частот от 16Гц до 28 КГц (ухо)	Воспринимается как звуковое изображение источника
Многочисленное напряжение (тактильные центры)	Воспринимается как контуры поверхности, края объекта, температура, вибрации, шероховатость, боль и др.
Возбуждение четырех основных вкусовых сосочков языка, реагирующих на соленость, сладость, горечь и кислотность, а также аминокислотных центров: (язык)	Воспринимается как вкусовой образ объекта
Возбуждение слизистой оболочки, имеющей рецепторы запаха, подключенные к обонятельному нерву (нос)	Воспринимается как обонятельный образ объекта

С математической точки зрения такие задачи относятся к классу некорректных обратных задач, теория которых хорошо разработана в математике и широко применяется на практике. В этом смысле и ДМ, и восприятие образов объектов относятся к косвенным методам измерения: стремясь изучить определенные характеристики материала, мы измеряем совершенно другие физические величины. Для распознавания объектов живому существу необходимы лишь две субстанции: данные о возбуждении определенных центров (рецепторов) и предыдущий опыт, или математически: данные эксперимента и априорная информация. Недостаток одной из них должен компенсироваться избытком другой.

Формализация этого подхода обеспечивается решением т.н. операторного уравнения вида:

$$\vec{p}(y) = O\vec{\mu}(x) + \vec{\eta}, \quad (1)$$

где $\vec{\mu}(x)$ – вектор изучаемой характеристики материала в области (или пространстве) x ; O – оператор преобразования $\vec{\mu}(x)$ в измеряемую величину $\vec{p}(y)$; варьируемую в пространстве y ; $\vec{\eta}$ – шум, сопровождающий измерение.

Оптимальное решение этого уравнения дает теорема Байеса об условной вероятности:

$$P(\mu|p) = \frac{P(p|\mu)P(\mu)}{P(p)}, \quad (2)$$

где $P(\mu|p)$ – апостериорная вероятность измеряемой величины; $P(p|\mu)$ – функция достоверности измерений; $|P(\mu)$ – априорная вероятность изучаемой характеристики материала; $P(p)$ – глобальная нормировочная характеристика.

Решением операторного уравнения (1) является следующая функция:

$$\bar{\mu} = \inf \left\{ \left\| \mathbf{O}\bar{\mu}(x) + \bar{\eta} - \bar{p}(y) \right\|^2 + \alpha B(\bar{\mu}) : \bar{\mu}(x) \in R^n \right\}, \quad (3)$$

где $B(\bar{\mu})$ – априорный функционал; α – коэффициент регуляризации.

Таким образом, задача определения изучаемой характеристики $\bar{\mu}(x)$ по данным измерений физического параметра $\bar{p}(y)$ сводится к восстановлению образа искомой функции путем решения обратной задачи, причем, достоверность ответа зависит от качества задаваемого вопроса. Следует отметить, что данное решение обеспечивает наивысшую из всех возможных достоверность ответа при наличии определенных данных измерения и заданной априорной информации. Решение (3) задачи выполняется итерационно. Алгоритм решения может быть представлен с помощью следующей схемы (рис. 1)

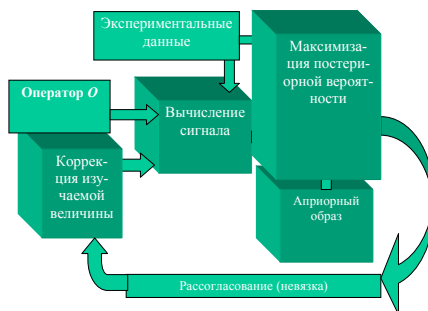


Рис. 1. Алгоритм решения

В докладе приводятся два примера применения технологии восстановления свойств материала по результатам косвенных измерений. Первый из них связан с восстановлением компонент тензора напряжений при двухосном напряженно-деформированном состоянии, которое характерно для листовых конструкций. Применение этого подхода впервые позволяет перейти от оценки напряженного состояния к измерению напряжений. Другой пример относится к области компьютерной томографии. Разрабатываемые в ИПФ итерационные методы томографии позволяют сделать эту область, с успехом применяемой в медицине, доступной для широкого практического использования в промышленности.