

ОБЩИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ

О. М. КАРПАШ, И. А. МОЛОДЕЦКИЙ, М. О. КАРПАШ

Рассмотрены состояние и перспективы развития современных методов оценки физико-механических характеристик металлов. Предложен новый комплексный подход для построения интеллектуальных систем оценки фактического технического состояния материалов и изделий.

The state of art and development perspectives of modern methods of evaluating of physical and mechanical characteristics of metals. New complex approach was proposed for development of intelligent systems for evaluation of actual technical condition of products and materials.

Известно, что физические и механические свойства материалов в значительной степени определяют работоспособность изготовленных из этих материалов объектов. Фактическое техническое состояние любого объекта с точки зрения его технического диагностирования определяется соответствием его физико-механических и геометрических характеристик их нормативным значениям и отсутствием дефектов типа нарушения сплошности материала. Последние два параметра можно оценить средствами и методами толщинометрии и дефектоскопии соответственно. А вот определение физико-механических характеристик (ФМХ) является не настолько легко решаемой задачей. И вдобавок, для большого количества бездефектных объектов именно ФМХ определяют их фактическое техническое состояние.

В свою очередь, вопрос оценки фактического технического состояния объектов разного назначения становится особенно актуальным в современных условиях, когда появилась острая необходимость продления срока эксплуатации объектов, отработавших свой нормативный ресурс. Все это усложняется неудовлетворительным финансовым положением подавляющего большинства предприятий, которые эксплуатируют большую часть металлоконструкций, выработавших свой нормативный ресурс.

В тоже время, улучшение экономического положения в Украине едва ли решит поставленную проблему — современные требования относительно энерго- и материалосбережения, а наоборот, заостряют ее. Существует также мировая тенденция, на основании которой при выводе объектов или их отдельных узлов (агрегатов) из эксплуатации учитывают не только нормативный срок эксплуатации, но и их фактическое техническое (физическое) состояние.

Рассмотрим два типа определения физико-механических параметров (ФМП):

1) непосредственные механические исследования, которые сопровождаются разрушениями образцов (или их частей);

2) косвенные методы определения физических и механических характеристик через измерение

других параметров (электрических, магнитных и т. д.), которые часто не сопровождаются разрушением объектов, и потому эти методы носят общее название неразрушающих.

Понятно, что для объектов, которые находятся в эксплуатации, применение первого типа методов недопустимо; тем более, что их реализация в эксплуатационных условиях может оказаться довольно затруднительной. Для таких задач необходимо использовать неразрушающие методы исследования материалов и изделий.

Нужно отметить, что в теории и практике неразрушающего контроля и технической диагностики сделан значительный шаг в направлении более точного и достоверного определения ФМП материалов, в частности, металлов. Концентрация исследовательских усилий на металлах объясняется прежде всего широким их использованием при изготовлении и сооружении разнообразнейших объектов.

В данной работе авторы пытаются обобщить и подытожить наиболее общие направления в теории и практике определения ФМХ металлов неразрушающими методами.

Объект исследований. Необходимо отметить, что ФМХ одного и того же металла могут существенно отличаться благодаря влиянию условий эксплуатации и других факторов: температурного режима в ходе эксплуатации, наличия или отсутствия агрессивных сред, наличия перегрузок, возможных дефектов типа нарушения сплошности (их размеры, расположение и тип) и т.д.

Для того, чтобы судить о методах определения ФМХ металлов, нужно коротко ознакомиться с перечнем тех величин, которые входят во множество исследуемых:

1) механические: модуль упругости; модуль сдвига; коэффициент Пуассона; предел прочности; предел текучести; прочность при разрыве и прочее;

2) физические: физическая плотность; анизотропия материала; кристалличность и размеры кристаллов; удельное электрическое сопротивление; диэлектрическая проницаемость; магнитная проницаемость и др.

Очевидно, что для оценки фактического технического состояния объектов (металлоконструк-



ций) наиболее важными являются прочностные характеристики и параметры структуры материала, поскольку они являются наиболее обобщенными и в достаточно полной мере дают возможность судить о фактическом физическом состоянии этих объектов.

Прочность — это способность материала оказывать сопротивление разрушению. Типичные кривые «напряжение — деформация» при исследованиях на разрыв имеют прямо пропорциональный характер только в зоне действия закона Гука, а дальше они имеют более сложный характер. Максимальное значение напряжения определяет величину так называемого временного сопротивления, которое принимают за меру прочности. На практике же для оценки максимального уровня рабочих нагрузок часто пользуются понятием предела текучести, который связан с пределом прочности.

Большое влияние на ФМХ металлов и сплавов имеет режим их термообработки при изготовлении. Например, твердость стали Ст30 по ГОСТ-5657–69 зависит от прокаливаемости (режима термообработки); эта зависимость подается в специальных полосах прокаливаемости [1].

Неразрушающие методы определения ФМХ.

В теории неразрушающего контроля (НК) и исследования материалов различают следующие основные методы определения ФМХ металлов: акустические, электромагнитные (вихретоковые), радиационные, магнитные, электрические.

Принцип действия любого из этих методов базируется на измерении той или иной величины (акустической, магнитной или электрической), связанной с нужными ФМХ через теоретически или экспериментально установленные зависимости.

Хотя в большинстве случаев эти зависимости носят сугубо эмпирический характер и были получены при соблюдении большого количества условий и допусков, они могут быть успешно применены только для решения конкретных задач и редко имеют серьезное теоретическое обоснование.

Примером этому может послужить контроль прочностных характеристик акустическим методом [2].

Акустические колебания в металлах имеют небольшую амплитуду, т. е. они соответствуют как раз начальному участку кривой «напряжение-деформация». Прогнозировать по параметрам акустических волн поведение кривой при больших напряжениях и деформациях аналитически невозможно [2], поэтому ищут корреляционные зависимости акустических параметров от прочности материала.

Наиболее информативными акустическими параметрами для оценки прочности материала считают скорость распространения волн [3] и степень затухания ультразвука в металлах.

Скорость распространения ультразвука аналитически связана с упругими константами, которые описывают начальный участок кривой «напряжение — деформация». Для ряда материалов и условий эксплуатации изделий из них измерение скорости УЗ колебаний вполне достаточно для оценки их прочности. Но, например, для ферромагнетиков существует тенденция к росту скорости рас-

пространения УЗ колебаний при росте магнитной индукции и этот рост может достигать 1 %.

В случае, если для определения ФМХ осуществляется измерение степени затухания ультразвука в металлах, то известно, что в металлах и сплавах затухание неоднозначно зависит от кристаллической структуры [4]. Уже на частотах в мегагерцовом диапазоне основная часть затухания ультразвука вызывается потерями энергии за счет рассеяния волны на отдельных кристаллах. При этом раздельное влияние первичного и вторичного зерна на распространение акустических волн пока недостаточно изучено и к тому же рассеяние сильно зависит от размеров зерна.

На примере акустического контроля ФМХ видим, как они сложно и часто не до конца понятно зависят от измеренных параметров. И это при том, что акустический контроль довольно хорошо теоретически проработан и реализован в большом количестве технических средств.

Рассмотри последние разработки отечественных ученых в направлении магнитного метода контроля усталостного состояния и ресурса металлопродукции, представленный в работе [4]. Описанный метод, как и сам подход к задаче, интересны, хотя и не являются абсолютно новыми (метод магнитной памяти металла [5]). Метод базируется на том, что в каждом типе конструкций есть характерные места усталостного преддефектного состояния материала и эти места могут быть выявлены с помощью измерения коэрцитивной силы вдоль объекта контроля.

Однако этот подход имеет ряд очевидных недостатков:

1) в нормативных документах на стали магнитные характеристики не нормируются (согласно ГОСТ на производство) — это объясняется и явлением остаточной и спонтанной намагниченности, гистерезисом, нелинейностью связей между ними, сложностью проведения измерений и т.д.;

2) характерные места пластической деформации — это только места наиболее вероятной локальной пластической деформации (и возможного разрушения как следствие), но они совсем не определяют в действительности места всех преддефектных участков и участков с существенным отклонением ФМХ;

3) коэрцитивная сила — магнитная характеристика материала, которая является анизотропной величиной и зависит от многих других характеристик: в [6] указывается на наличие зависимости коэрцитивной силы стали 65Г от температуры отпуска, которую косвенно можно определить по значениям твердости поверхностного слоя стали;

4) существует реальная возможность оценивать остаточный ресурс металлопродукции только определенного типа, изготовленной из конкретных марок сталей.

Радиационные методы в основном используются для структурного анализа (рентгеноструктурный анализ), а для определения ФМХ могут служить только в качестве вспомогательных.

Исследовательские приемы, основанные на применении электрических характеристик, огра-



ничены областью применения самого метода контроля. Хотя с их помощью можно измерять удельное электрическое сопротивление (проводимость), диэлектрическую проницаемость диэлектрических материалов, коэффициент диэлектрических потерь и на их основании можно оценивать состав материалов и их структуру. Но для металлов и сплавов использование этих методов, скорее всего, не является перспективным по крайней мере на данном этапе.

Существует также ряд технических средств для контроля ФМХ отдельных типов изделий (например, прибор типа СИГМА-Т10.1 для контроля труб нефтяного сортамента), принцип действия которых — вихретоковый. Они хорошо себя зарекомендовали при определении предела текучести, хотя он часто не является определяющим параметром при оценке фактического технического состояния того ли иного вида металлопродукции [7].

Возможные пути решения задачи. Проанализировав сказанное выше, можно утверждать, что состояние развития НК в мире не соответствует всевозрастающим проблемам при определении ФМХ металлопродукции. Наблюдается ситуация, когда повышается уровень технического оснащения, улучшается финансирование служб НК, повышается квалификация персонала, а общей или специальной методики определения ФМХ хотя бы для металлов нет. Исследования в этом направлении являются очень узкоспециализированными, а разрабатываемые устройства пригодны к использованию только при соблюдении многих условий и для определенных типов материалов и изделий.

Авторы видят два пути решения данной задачи, которые в дальнейшем могут объединиться в один:

1) комплексное измерение многих параметров разными методами при условии, что минимальное количество измерений даст максимум диагностической информации, которая будет использоваться при оценке работоспособности того ли иного объекта;

2) осуществление измерений дополнительных параметров согласно физическим законам, которые не принимались во внимание в НК до настоящего времени.

Реализация первого пути может быть осуществлена с помощью современных способов решения многопараметрических задач [8]. Здесь целесообразно было бы использовать подход на базе нейронных сетей. Использование нейросетей даст возможность получить зависимости между входным комплексом параметров и исходными параметрами (ФМХ). Также возможно осуществлять отбор наиболее информативных входных параметров.

Относительно дополнительных параметров можно сказать, что здесь ситуация более неопределенная. Приведем некоторые возможные направления.

1) Использование эмпирического закона Видемана–Франца (1853 г.), гласящего, что отношение теплопроводности к электропроводности для большинства металлов пропорционально температуре, причем коэффициент пропорциональности одинаков практически для всех металлов [9]. Очевидно, что аналогичная зависимость должна

существовать и для сплавов металлов (стали) и, скорее всего, ее можно использовать для определения тех или иных еще не известных ФМХ сталей.

2) Известно, что при низких температурах все тела (кроме гелия) становятся твердыми. Вместе с тем для того, чтобы тело было твердым, его температура должна быть меньшей, чем энергия взаимодействия атомов. Отсюда, если уровень энергии взаимодействия атомов под действием тех или иных факторов падает, то тело постепенно перестает быть твердым. Сама же энергия взаимодействия атомов имеет много составляющих, и одной из основных есть сила взаимодействия электронов (как свободных, так и связанных), дырок в металле. Оценить концентрацию электронов на поверхности можно с помощью эффекта Холла. Постоянная Холла указывает на концентрацию зарядов и на их знак (электроны это или дыры) [9].

3) Твердость довольно часто не учитывают при оценке фактического технического состояния, поскольку ее измерения справедливы только для поверхностного слоя металла. Но в этом и кроется «скрытый» плюс: твердость, как и глубина упроченного слоя металла, дает возможность довольно точно определить количественные и качественные показатели термообработки металла, которые в свою очередь в значительной мере определяют его ФМХ.

4) Представляет интерес использование закона Грюнайзена, который гласит, что отношение коэффициента температурного расширения к теплоемкости твердого тела не зависит от его температуры [9]. Т. е., очевидно, что при комплексной оценке многих параметров металлов нужно учесть влияние этих обоих параметров как независимых.

5) Если речь идет об измерении скорости распространения ультразвука, анализ изменений отношения скоростей продольной и поперечной волны: $C_1 > 1,1547C_t$ [10] может указывать на структурные изменения в материале — поперечные волны характерны только для твердых тел, и их изменение в меньшую сторону может свидетельствовать о разрушении кристаллической структуры металла.

Приведем некоторые практические результаты, которые могут послужить обоснованием для проведения комплексного контроля ФМХ по многим параметрам.

Авторами использовались справочные данные для ряда сталей иностранных марок (grades): 301, 440, 904L, 410, 630, 431, UR52N+, 420, 2205, 416, 409, 3CR12, 304, 310, 321, 347, 430, 430F, S30815.

Для данных марок сталей согласно системе нормативных документов серии ASTM нормируются такие величины: предел прочности, предел текучести, твердость, физическая плотность, коэффициенты теплового расширения в разных температурных диапазонах: от 0 до 100 °С, от 0 до 315 °С, от 0 до 538 °С, теплопроводность в диапазонах: от 0 до 100 °С и от 0 до 500 °С, удельная теплоемкость и электропроводность.



Указанные графические зависимости (рис. 1) имеют сложный характер, и предшествующая практика авторов работы с алгоритмами нейронных сетей [11] указывает на возможность контроля прочности стали по таким физическим характеристикам. Поэтому по числовым данным для указанных марок сталей были проведены исследования с помощью нейронных сетей для установления наличия корреляционной связи между прочностными параметрами (пределом текучести и пределом прочности) и остальными характеристиками сталей.

Учебное множество состояло из параметров всех имеющихся марок сталей, кроме двух (420 и 310), которые потом использовали в качестве тестовых. Нейронные сети должны были по определенным входным наборам параметров сталей определять значения предела прочности — задача аппроксимации функции.

В процессе исследований обнаружена стойкая корреляционная зависимость между пределом прочности и такими параметрами, как: твердость, коэффициент теплового расширения в диапазонах от 0 до 100 °С и от 0 до 315 °С, теплопроводность в диапазоне от 0 до 100 °С и, в меньшей мере, электропроводностью.

Результаты исследований. Целевые значения предела прочности — постоянные 420 и 310 — (655; 515) МПа.

1) Сеть: вход — твердость и коэффициент теплового расширения в диапазоне температур от 0 до 100 °С; выход — предел прочности.

Выход сети при подаче тестовых значений — (604,6; 515,5).

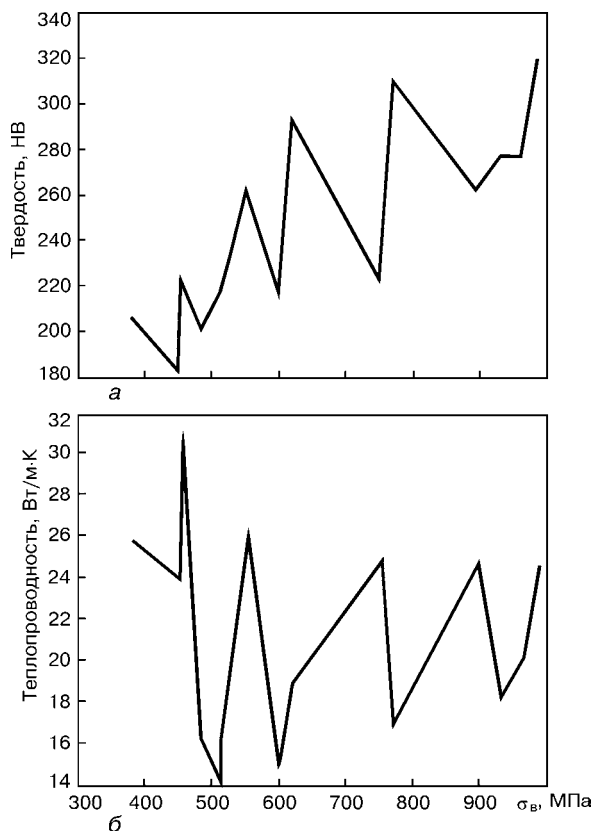


Рис. 1. Зависимость твердости (а) и теплопроводности (б) от значений предела прочности

2) Сеть: вход — твердость, коэффициенты теплового расширения в диапазонах температур от 0 до 100 °С и от 0 до 315 °С; выход — предел прочности.

Выход сети при подаче тестовых значений — (648,6; 516,4)

3) Сеть: вход — твердость, коэффициенты теплового расширения в диапазонах температур от 0 до 100 °С и от 0 до 315 °С, коэффициент теплопроводности; выход — предел прочности.

Выход сети при подаче тестовых значений — (632,9; 533,9).

4) Сеть: вход — твердость, коэффициенты теплового расширения в диапазонах температур от 0 до 100 °С и от 0 до 315 °С, коэффициент теплопроводности и электропроводность; выход — предел прочности.

Выход сети при подаче тестовых значений — (627,8; 547,9).

Средняя относительная погрешность определения предела прочности по всем результатам составляет 7,1 %.

В ходе работы с параметрами указанных выше марок сталей было отмечено две интересных тенденции.

Вначале (при проверке закона Грюнайзена) были получены отношения коэффициента температурного расширения к теплоемкости. При этом значения этого отношения в условных единицах разделились на два класса: значения в окрестности числа 0,03 и около 0,02. Затем, при вычислении отношения теплопроводности к электропроводности (закон Видемана–Франца) ситуация стала похожей, значения разделились на близкие к 0,022 и к 0,04. Причем, в обоих случаях марки сталей в любой из групп при проверке обоих законов: те стали, которые в первом случае имели отношения, более близкие к 0,03, во втором — более близкие к 0,022, и также с другой группой марок сталей.

Такая классификация марок сталей была довольно странной, и направление ее было тяжело объяснить. Но при более детальном анализе оказалось, что группа сталей, у которой первое отношение было близко к 0,022, а второе — к 0,03, — являются аустенитными сталями, а другая

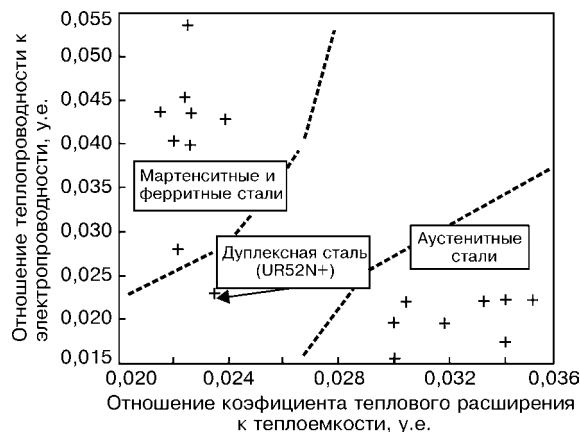


Рис. 2. Классификация сталей по трем классам на основании отношения коэффициента теплового расширения к теплоемкости и теплопроводности к электропроводности



группа состояла из мартенситных и ферритных сталей (рис. 2).

Отсюда очевидно, что классификацию сталей в первом приближении относительно их структуры можно оценивать по одному или обоим отношениям.

Тем более, благодаря тому, что измерения теплопроводности и электропроводности носят локальный характер, появляется возможность получения топографической картины структурных изменений на поверхности материала.

Выводы

Современное состояние в области неразрушающего определения ФМХ металлов и сплавов является неудовлетворительным и требует разработки универсальных подходов.

Предлагается осуществлять комплексное измерение параметров (удельной электропроводности, теплопроводности, твердости) НК и применение методов нейронных сетей для построения систем интеллектуальной оценки фактического технического состояния.

Дополнить теоретическую базу новыми принципами и законами из теории физики твердого тела: законом Видемана-Франца, Грюнайзена и т.д.

1. *Марочник* сталей и сплавов / Под общ. ред. В. Г. Сорокина и др. / М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
2. *Неразрушающий контроль* / В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие под ред. В. В. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1991. — 283 с.
3. *Бражников Н. И.* Ультразвуковые методы (физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества) / Под общ. ред. Н.Н. Шумиловского. — М.-Л.: Энергия. — 1965. — 248 с.
4. *Безлюдько Г. Я.* Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным коэрцитиметрическим методом // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 2. — С. 20–26.
5. *Дубов А. А.* Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 420 с.
6. *Структура і фізичні властивості твердого тіла: Лабораторний практикум: Навч. посібник* / За ред. Л.С. Палатенка. — Київ: Вища шк., 1992. — 311 с.
7. *Крипичный П. Я., Молодецкий И. А.* Прилад для контролю фізико-механічних характеристик труб нафтогазового сортаменту СИГМА-5Т // Методи і прилади контролю якості. — 1998. — № 2. — С. 9–10.
8. *Уоссермен Ф.* Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. — М.: Мир, 1992. — 348 с.
9. *Ашкрофт Н., Мермин Н.* Физика твердого тела / В 2 т. Том 1. — М.: Мир, 1979. — 420 с.
10. *Ландау Л. Д., Лифшиц Э. М.* Механика сплошных сред / В 10 т. Том 7. Теория упругости. — М.: Наука, 1986. — 248 с.
11. *Райтер П. М., Карнаш М. О.* Нейронні мережі для вимірювання багатofазних потоків // Мат. конф. «Фізичні методи і засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — ЛЕОТЕСТ-2003», Львов, 15–18 лютого 2003.

Науч.-произв. фирма «Зонд»,
Ивано-Франковск

Поступила в редакцию
15.09.2003

Встреча профессионалов

ДЕФЕКТО СКОПИЯ — 2004

V МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА ПРИБОРОВ И
ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

14–16 СЕНТЯБРЯ

Санкт-Петербург,
Михайловский манеж,
Манежная пл. 2

Справки по участию ВО РЕСТЭК
Тел: (812) 320-8092, 235-0497 sci&ind@restec.ru www.restec.ru

Информация ЖУРНАЛ В МИРЕ НК
Тел: (812) 324 0668 expo@ndtworld.com www.ndtworld.com

