

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЁРДОСТИ ТЕРМООБРАБОТАННЫХ СТАЛЕЙ ПО СТАТИЧЕСКИМ МАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

© 2025 г. Андрей Александрович Беспрозванный^{1,2}, Д.Г. Ксенофонтов¹,
О.Н. Василенко¹

¹ – ИФМ УрО РАН, 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18

² – Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620075 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

* - ksenofontov@imp.uran.ru

Для «мягких» магнитных материалов, таких как электротехнические стали, и «твердых» магнитных материалов, таких как постоянные магниты, большой интерес представляют сами магнитные характеристики. Эти свойства определяют эксплуатационные характеристики изделия: трансформатора, магнита, электродвигателя, генератора и т.д. Для «полутвердых» магнитных материалов, таких как конструкционные стали, магнитные характеристики не определяют свойства изделия, но могут быть использованы для оценки этих свойств. Магнитный структурный анализ основан на корреляции между магнитными и механическими характеристиками ферромагнитных материалов. Существует большое разнообразие методик магнитного структурного анализа. Для прогнозирования свойств можно использовать несколько подходов: от простой линейной регрессии и множественной линейной регрессии до сложных регрессионных алгоритмов и нейронных сетей. Определение структуры и весов модели называется машинным обучением, для которого требуется набор данных определенного размера.

Машинное обучение применительно к магнитному структурному анализу применяется уже давно [1]. В связи с ростом вычислительных мощностей широкое распространение получили нейронные сети. Существует несколько работ, посвященных применению нейронных сетей для анализа структур электромагнитными методами [2, 3]. Однако существующие исследования ограничены наборами измеряемых характеристик, характерных для определенного подхода. Во многих исследованиях, посвященных магнитному структурному анализу, используется от нескольких до пары десятков образцов. Такие небольшие наборы данных сложны в использовании.

В данной работе рассматривается применение машинного обучения различных моделей, основанных на статических магнитных характеристиках, таких как коэрцитивная сила по индукции, остаточная магнитная индукция и максимальная магнитная проницаемость. Цель работы: повышение точности прогнозирования механических свойств изделий с помощью магнитной структуроскопии путем применения современных алгоритмов машинного обучения. В частности, рассматривается задача по

неразрушающему контролю твёрдости сталей после их термической обработки. Задачи работы: обучение различных моделей на небольших наборах данных, сравнение производительности после обучения, оценка необходимого набора измеряемых параметров.

Статические магнитные характеристики измерялись на установке Remagraph C-500 в соответствии с МЭК 60404-4 [4]. Обучающий набор данных был сформирован по результатам измерений статических магнитных характеристик сталей 20Н2М и 7Х3, имеющих различные температуры закалки и отпуска. Размеры образцов составляли 10×10×65 мм. Общее количество образцов – 18 для 20Н2М и 20 для 7Х3. Такой размер обучающего набора данных характерен для исследований по магнитной структуроскопии.

В результате работы были получены различные математические модели для предсказания твёрдости по статическим магнитным характеристикам, измеренным в замкнутой магнитной цепи. Полученные модели были сравнены между собой по величине скорректированного значения коэффициента детерминации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1. *Клюев В.В., Мужичкий В.Ф., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е.* Магнитные методы контроля. Кн. 2. *Филинов В.Н., Кеткович А.А., Филинов М.В.* Оптический контроль. Кн. 3. *Матвеев В.И.* Радиоволновой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 848 с.
2. *Wolter B., Gabi Y., Conrad C.* Nondestructive Testing with 3MA—An Overview of Principles and Applications // *Applied Sciences*. 2019. V. 9. No. 6. P. 1068.
3. *Tomas I., Gabor V.* Magnetic Adaptive Testing. *Nondestructive Testing Methods and New Applications*. London: InTech Open Publ., 2012. 266 p.
4. IEC 60404-4:1995/AMD2-2008 Amendment 2 – Magnetic materials – Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials.