

УДК 621.921:658.562

МЕТОДЫ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ В ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

И.Е. Федянин, студент гр. ТСа-241, II курс

Научный руководитель Коротков А.Н., доктор технических наук

Кузбасский государственный технический университет

имени Т.Ф. Горбачева г. Кемерово

Аннотация

Работа посвящена исследованию возможностей магнитных способов неразрушающего контроля для определения текущего состояния и прогнозирования срока безопасной службы абразивного инструмента. Анализируется эволюция диагностики от простого поиска внешних повреждений к созданию интеллектуальных систем, которые учитывают ранние признаки усталости материала на уровне микроструктуры. Обосновывается польза объединения магнитной дефектоскопии с изучением микростроения материала, компьютерным моделированием деформаций и алгоритмами искусственного интеллекта. Дается характеристика основных приёмов контроля, описывается парк современного оборудования, оцениваются их достоинства и недостатки. Предлагается архитектура автоматической системы предиктивного обслуживания, которая позволит сократить риски внезапных поломок, повысить безопасность рабочих мест и уменьшить затраты на внеплановые остановки производства. Особый акцент сделан на создании виртуальной модели («цифрового двойника») инструмента, объединяющей данные из разных источников.

Введение

Абразивный инструмент — это один из самых быстроизнашиваемых компонентов в технологических линиях машиностроительных, авиационных, металлургических и энергетических предприятий. Шлифовальные круги, сегментные блоки и головки постоянно работают в условиях высоких скоростей, температуры и вибрации. Постепенно в их структуре накапливаются микротрещины, ослабляется связь между зёрнами и связкой, деформируется металлическая основа. Неожиданное разрушение инструмента во время вращения несёт прямую угрозу здоровью оператора, может повредить шпиндель станка, направляющие или рабочий стол и вызвать многодневный простой оборудования с серьёзными финансовыми потерями.

Обычные методы проверки — простой осмотр невооружённым глазом, измерение биения или контроль внешних размеров — показывают лишь уже заметные проблемы. Они не позволяют точно ответить, сколько ещё часов или циклов инструмент сможет работать без риска. Работа «до поломки» в

сегодняшних условиях не соответствует требованиям безопасности и экономической эффективности.

Поэтому предприятия переходят от обслуживания по факту поломки к предиктивному подходу, когда замена планируется по реальным показателям износа. Для этого нужно улавливать самые первые, скрытые изменения внутри материала ещё до появления видимых трещин. Магнитные методы неразрушающего контроля идеально подходят для этой задачи, поскольку они очень чувствительны к любым сдвигам в доменной структуре, скоплению дислокаций и внутренним напряжениям ферромагнитных частей инструмента [7].

Цель статьи — подробно разобрать физические принципы этих методов, описать доступное оборудование и предложить целостную концепцию системы оценки ресурса, которая соответствует задачам цифрового производства.

1. Основные физические принципы магнитных методов контроля

Чтобы надёжно предсказывать остаточный ресурс, недостаточно просто найти трещину. Нужно понимать, как она появилась, как быстро растёт под нагрузкой и как влияет на прочность всего изделия. Магнитные методы используют то, что любые внутренние дефекты или напряжения меняют поведение магнитного поля в материале. Ниже рассмотрены три главных подхода, которые наиболее эффективны для абразивного инструмента [7].

1.1. Магнитопорошковая дефектоскопия

Способ строится на обнаружении локальных полей утечки магнитного потока над местами разрыва сплошности. Когда ферромагнитную основу или армирующие элементы намагничивают, силовые линии «обходят» дефект (трещину, пору или слабую зону связки). В результате часть потока выходит на поверхность. Если нанести на поверхность мелкий ферромагнитный порошок или жидкую суспензию, частицы собираются именно в этих местах и образуют хорошо видимый рисунок дефекта [2], [3], [6].

Весь процесс состоит из чёткой последовательности операций:

- полная очистка поверхности от масла, СОЖ и грязи;
- создание магнитного поля нужной силы;
- нанесение индикатора;
- осмотр и запись результатов (можно с камерами);
- обязательное размагничивание, чтобы инструмент не притягивал стружку потом [1].

Плюсы: очень наглядно, хорошо видно и поверхностные, и чуть глубже лежащие дефекты (до 2–3 мм), можно понять направление трещины относительно сил резания.

Минусы: результат зависит от опыта контролёра, поверхность должна быть идеально чистой, а после контроля её нужно обязательно размагничивать.

1.2. Магнитоиндукционный контроль

Здесь измеряют реальные изменения магнитной проницаемости материала с помощью чувствительных катушек. Датчик движется по поверхности, регистрирует колебания потока и превращает их в удобные графики или таблицы. Метод полностью объективен и легко переводится в цифровой формат [5].

Плюсы: данные можно сохранять, сравнивать во времени, легко автоматизировать, работает даже под слоем абразива. Минусы: боится внешних электромагнитных помех, требует точной настройки по специальным образцам с искусственными дефектами.

1.3. Магниторезистивная диагностика

Самый современный вариант. Используются специальные датчики, сопротивление которых резко меняется от малейших магнитных полей (эффект GMR или TMR). Они улавливают самые первые микроскопические изменения ещё до образования видимой трещины [7].

Плюсы: высочайшая чувствительность, отличное разрешение, датчики можно делать очень маленькими для сложных форм инструмента. Минусы: дорогая техника, чувствительна к вибрации и температуре, сложнее использовать прямо в цехе.

2. Современное оборудование для магнитного контроля

Результаты контроля сильно зависят от того, насколько совершенна аппаратура — от простых переносных приборов до полностью автоматических линий [4], [5].

Переносные дефектоскопы типа «ПМД-70», «МД-50П» или зарубежные аналоги (Magnaflux, Karl Deutsch) позволяют быстро проверить большой инструмент прямо у станка. Они удобны, но требуют ручной работы.

Автоматические комплексы на основе «МИК-02Р» оснащены роботами, которые сами наносят суспензию, создают поле, фотографируют рисунок и заносят все данные в базу. Получается полная цифровая история каждого круга.

Для индукционного и магниторезистивного контроля используют стационарные сканеры с точным перемещением датчиков и мощным программным обеспечением для обработки сигналов. Лабораторные установки с МР-сенсорами часто объединяют с компьютерным зрением и применяют для особо важного инструмента, например алмазного на металлической связке.

3. Регламентирующая документация

Регламентация проведения магнитной диагностики осуществляется государственными органами и международными организациями, разрабатывающими специальные нормативные акты. Среди отечественных актов ключевыми являются:

- ГОСТ 24450-80 — термины и определения магнитного контроля.
- ГОСТ 21105-87 — правила проведения магнитопорошкового контроля.
- ГОСТ Р 56512-2015 — современная редакция правил магнитопорошкового контроля.

Международные нормы охватывают такие документы, как EN ISO 9934-1 и EN ISO 9934-2, касающиеся общего регулирования магнитопорошкового контроля.

Соблюдение указанных норм и рекомендаций является обязательным условием успешной сертификации производства и выпуска качественной продукции.

4. Концепция комплексной оценки остаточного ресурса

Точный прогноз возможен только если смотреть на весь жизненный цикл деградации материала. Магнитные методы дают ранние сигналы, но их нужно дополнять другими данными.

Металлографическое исследование микрошлифов помогает понять, является ли дефект усталостным (от работы) или производственным браком, а также проверить, насколько хорошо держатся абразивные зёрна.

Во время эксплуатации в материале растёт число дислокаций, появляются напряжения второго рода, меняется структура связки при нагреве выше 600 °С. Эти процессы сразу отражаются на магнитных характеристиках: коэрцитивная сила H_c увеличивается при росте напряжений, остаточная индукция B_r реагирует на фазовые изменения. Исследования показывают сильную связь (R^2 выше 0,85) между изменением коэрцитивной силы и глубиной износа [7]. Это позволяет оценивать выработку инструмента прямо на станке, без демон- тажа.

Самое перспективное решение — создание «цифрового двойника». В одну систему собираются:

- карты дефектов и цифры магнитных параметров;
- фотографии микрошлифов;
- результаты расчётов напряжений методом конечных элементов;
- выводы нейронных сетей, которые классифицируют риски и считают оставшееся время работы.

Такая модель сама формирует рекомендации: когда инструмент можно оставить, а когда пора менять.

Заключение

Применение магнитных методов в комплексе с другими технологиями открывает путь к настоящему предиктивному обслуживанию абразивного инструмента. Вместо реактивного подхода предприятия получают инструмент, который работает по фактическому состоянию. Это снижает количество аварий, защищает людей, экономит деньги на ремонте и простоях, а также полностью вписывается в концепцию Индустрии 4.0. Предлагаемая система может стать стандартом для современных машиностроительных производств и значительно повысить их конкурентоспособность [6], [7], [8].

Список литературы

1. ГОСТ 24450-80. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. — Введ. 1981-07-01. — Москва: Издательство стандартов, 1980. — III, 7 с.

2. ГОСТ 21105–87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. — Введ. 1988-07-01. — Москва: Издательство стандартов, 1987. — IV, 13 с.
3. ГОСТ Р 56512–2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод: типовые технологические процессы. — Введ. 2016-06-01. — Москва: Стандартинформ, 2015. — 24 с.
4. ГОСТ 8.283–78. Дефектоскопы электромагнитные. Методы и средства поверки. — Введ. 1979-07-01. — Москва: Издательство стандартов, 1978. — 36 с.
5. ГОСТ 26697–85. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы магнитные и вихретоковые: общие технические требования. — Введ. 1986-07-01. — Москва: Издательство стандартов, 1985. — 16 с.
6. EN ISO 9934–1:2010. Неразрушающий контроль — Контроль магнитопорошковый — Часть 1: Общие принципы = Non-destructive testing — Magnetic particle testing — Part 1: General principles; EN ISO 9934–2:2010. Неразрушающий контроль — Контроль магнитопорошковый — Часть 2: Индикаторные материалы = Non-destructive testing — Magnetic particle testing — Part 2: Detection media / International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. — [Geneva]: ISO; [Brussels]: CEN, 2010.
7. Толмачёв И. И. Магнитные методы контроля и диагностики: учебное пособие / И. И. Толмачёв; Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2008. — 216 с.
8. Прохоров В. М. Методы магнитного контроля и оценки остаточного ресурса элементов металлоконструкций подъёмных сооружений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2010. — Вып. 3. — С. 123–130.