

УДК 620.179.14

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 30ХГСА ПО СТАНДАРТНЫМ МАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Зикеев К. А.¹, Бурак В. А.^{1,2}

¹Белорусский национальный технический университет

²Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрены магнитные характеристики конструкционной стали 30ХГСА при различных режимах термообработки. Проведен анализ зависимостей магнитной проницаемости, коэрцитивной силы и магнитной индукции от температуры отжига. Показано, что коэрцитивная сила является наиболее информативным параметром для оценки структурных изменений, однако ее использование в высокотемпературной области ограничено нелинейностью зависимости. Для повышения точности предложено применение регрессионных моделей, учитывающих совокупность магнитных характеристик, что обеспечивает более надежную диагностику и расширяет возможности магнитной структуроскопии.

Ключевые слова: конструкционная легированная сталь; магнитная проницаемость; коэрцитивная сила; максимальная магнитная индукция; магнитная структуроскопия.

QUALITY CONTROL OF HEAT TREATMENT OF STRUCTURAL STEEL 30HGSA BY STANDARD MAGNETIC CHARACTERISTICS

Zikeev K.¹, Burak V.^{1,2}

¹Belarusian National Technical University

²Institute of applied physics the NAS of Belarus
Minsk, Belarus

Abstract. The paper investigates the magnetic characteristics of structural steel 30HGSA under different heat treatment conditions. The dependence of magnetic permeability, coercive force, and magnetic induction on annealing temperature was analyzed. It was shown that coercive force is the most informative parameter for assessing structural changes, but its applicability is limited at high temperatures due to nonlinear behavior. To improve diagnostic accuracy, regression models incorporating multiple magnetic parameters are proposed, which provide more reliable evaluation and enhance the capabilities of magnetic structuroscopy.

Keywords: structural alloy steel; magnetic permeability; coercive force; maximum magnetic induction; magnetic structuroscopy

Адрес для переписки: Зикеев К. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kziikeev@yandex.by

Контроль структуры и качества термообработки изделий, изготовленных из конструкционных марок сталей, является важной и актуальной задачей машиностроения. Неразрушающие методы структуроскопии являются одним из оптимальных направлений решения этой задачи на практике, одним из перспективных является магнитный метод контроля ферромагнитных материалов и изделий из них [1]. Большинство методов магнитного неразрушающего контроля использует стандартные магнитные характеристики. Однако основной сложностью при выборе метода является необходимость поиска информативных параметров, имеющих однозначную связь с механическими характеристиками или температурой термообработки, так как для большинства широко применяемых сталей характерна неоднозначная зависимость магнитных характеристик от температуры термообработки.

Конструкционная легированная среднеуглеродистая сталь 30ХГСА относится к тем маркам сталей, для которых стандартные магнитные характеристики неоднозначно зависят от температуры термообработки. Прокат из стали 30ХГСА согласно нормативным документам, подвергается

улучшению, то есть закалке с последующим отпусканием, или рекристаллизационному отжигу, который снимает внутренние напряжения.

Исследования проводились на образцах холоднокатаной стали 30ХГСА, имеющей форму пластин и подвергнутых отжигу при разных температурах в течение 2 часов. Образцы имели размеры $200 \times 17 \times 1,5$ мм³ и отжигались при температурах 200, 400, 500, 530, 560, 600, 650, 700, 730, 760, 800 и 900 °С.

Были измерены следующие магнитные характеристики: магнитная проницаемость (μ), коэрцитивная сила (H_c), максимальная магнитная индукция (B_r). Для них была изучена возможность однопараметрового контроля, полученный результат подтвердил вышесказанное, а для величины коэрцитивной силы зависимость от температуры отжига представлена на рисунке 1. Для этого параметра коэффициент корреляции с температурой составил: $R = 0,91$ и был самым высоким из рассматриваемых магнитных параметров.

В интервале 200–700 °С зависимость монотонная и устойчивая, что делает коэрцитивную силу надежным параметром для контроля, структуры

стали. В области высоких температур (730–900 °C) чувствительность метода снижается из-за нелинейных колебаний, что может затруднять точную диагностику.

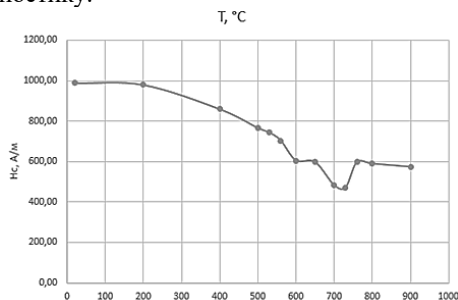


Рисунок 1 – Зависимость коэрцитивной силы образца стали 30ХГСА от температуры отжига

Из этого можно сделать вывод, что структуроскопии коэрцитивная сила используется как один из основных, но не единственный параметр: ее дополняют измерениями магнитной проницаемости, максимальной индукции или комплексными регрессионными моделями, которые учитывают несколько характеристик одновременно.

Для повышения точности контроля был использован статистический подход. По трем магнитным характеристикам было рассчитано уравнение линейной регрессии. Оно имеет следующий вид:

$$T = 778.963 + 0.7711 \cdot H_c + 5.63 \cdot 10^6 \cdot \mu - 675.077 \cdot B_r \quad (1)$$

Для рассчитанных по уравнению (1) значений, коэффициент корреляции составляет $R = 0,957$, а сама зависимость представлена на рисунке 2.

Из графика видно, что точки плотно располагаются вдоль диагонали, что подтверждает высокую точность модели. Незначительные отклонения проявляются в области высоких температур (760–900 °C), где модель слегка сглаживает нелинейные изменения свойств.

Поэтому можно сделать следующий вывод: модель адекватна и надежна для описания температурной зависимости в диапазоне 200–700 °C. В области высоких температур (760–900 °C) модель теряет чувствительность:

- фактические значения «скачут» из-за сложных фазовых изменений;
- это необходимо учитывать при практическом использовании: для диагностики в области высоких температур лучше применять нелинейные модели

или дополнительно использовать параметры, чувствительные к фазовым превращениям.

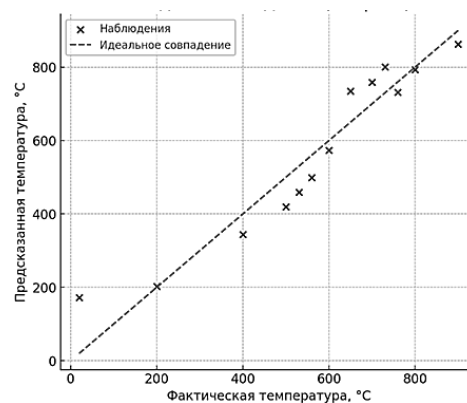


Рисунок 2 – Линейная регрессия для температуры как функции трех характеристик (H_c , μ , B_r)

Сравнивая полученные данные от обоих методов, можно сделать следующий вывод:

Корреляционный анализ (по одной характеристике): удобен для быстрой оценки, особенно с коэрцитивной силой (она наиболее информативна и легко измеряется).

Линейная регрессия: интегрирует информацию сразу из всех характеристик, обеспечивает более высокое качество прогноза температуры и лучше отражает комплексное влияние структуры материала.

Для повышенной точности и диагностики целесообразно использовать комбинированную регрессионную модель, где учитываются сразу три параметра. Это дает более надежный прогноз и позволяет минимизировать влияние случайных колебаний отдельных характеристик в диапазоне средних температур. Однако для задач структуроскопии, где критически важен контроль высокотемпературных структурных превращений, целесообразно использовать нелинейные модели обеспечивающие более высокую чувствительность к фазовым превращениям в верхнем температурном интервале или выбирать магнитные информативные параметры, которые обладают необходимой чувствительностью в области высоких температур.

Литература

1. Мельгуй, М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М. А. Мельгуй. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.

УДК 681

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КЛЕЙКИХ ЛЕНТ Иоффе К. В., Монич С. Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Одним из важнейших эксплуатационных показателей гибких клеящих материалов является усилие отслаивания от жесткой подложки. В данной работе было исследовано усилие отслаивания различных видов клейких лент от жесткой пластины с саморегулируемым поддержанием угла отслаивания, рав-