

С. Г. САНДОМИРСКИЙ, д-р техн. наук, доц.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОЯВЛЕНИЯ В НАУЧНОЙ И СПРАВОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ НЕДОСТОВЕРНЫХ ДАННЫХ ОБ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ И МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТАЛЕЙ

Аннотация. Представлена информация об установленных несоответствиях ряда справочных данных магнитных параметрах сталей действительным значениям, причинах их возникновения и путях предотвращения использования на практике. Показано, почему справочные данные о результатах измерения остаточной индукции, начальной и максимальной магнитных проницаемостей сталей не всегда достоверны. Установлены особенности таких результатов и даны рекомендации, позволяющие предотвратить их использование в магнитном структурном анализе.

Ключевые слова: магнитный структурный анализ, магнитные свойства сталей, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, намагниченность технического насыщения, начальная и максимальная магнитные проницаемости.

Магнитный структурный анализ [1, 2] основан [3] на исследованиях влияния технологических факторов производства металлов на их магнитные свойства (коэрцитивную силу H_c , остаточную намагниченность M_r , намагниченность M_s технического насыщения, максимальную μ_m и начальную μ_a магнитные проницаемости), которые представлены в научной и обобщены в справочной литературе [2, 4–8]. Это определяет важность данных о магнитных свойствах сталей после термических обработок. Исследователи и разработчики вправе рассчитывать на их достоверность. Но это не всегда так.

Цель статьи – информирование о недостоверности ряда справочных данных о магнитных свойствах сталей, причинах их возникновения и путях предотвращения использования в магнитном структурном анализе.

Сложность соблюдения стандартных требований к измерению магнитных свойств материалов предопределила использование рядом исследователей результатов измерения магнитных параметров образцов с малым размагничивающим фактором (коэффициентом размагничивания N) в разомкнутой магнитной цепи. Например, исследования влияния температуры отжига листового проката низко и среднеуглеродистых сталей на их магнитные свойства проведены на образцах в виде пластин длиной 200 мм, шириной 20 мм и толщиной $1 \div 2$ мм в соленоиде баллистической установки БУ-3 [8–15]. Авторы считали, что малый N обеспечит одинаковую зависимость магнитных параметров образцов и их материала от технологических факторов. Типичные результаты таких исследований приведены на рис.1.

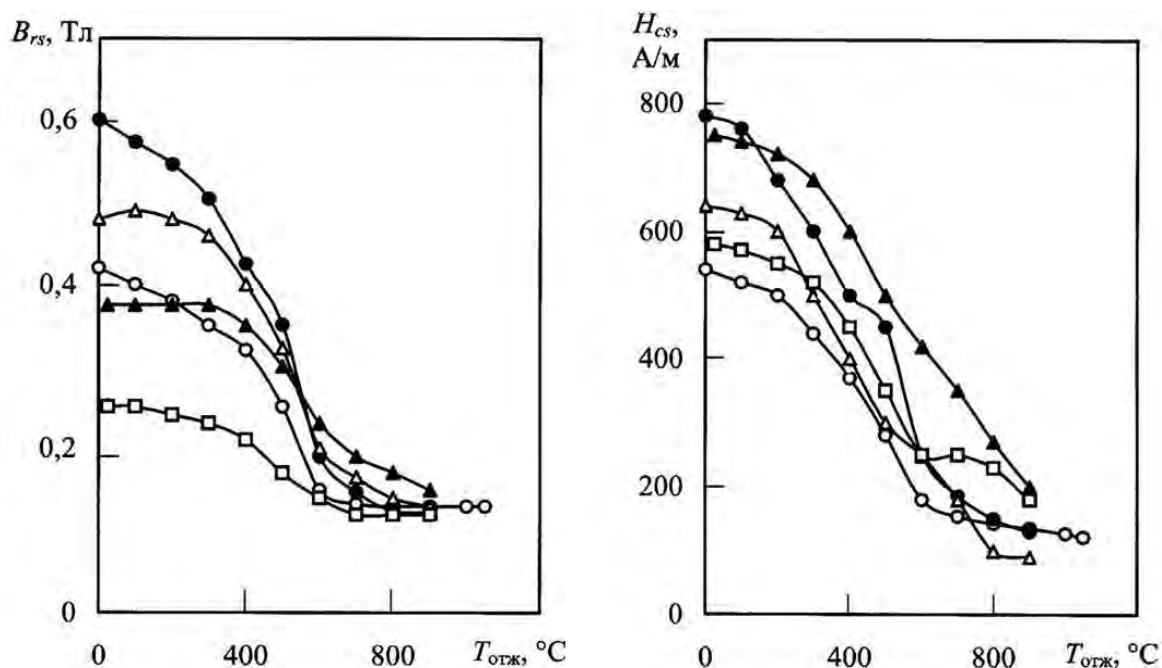


Рис. 1. Влияние температуры $T_{отж}$ отжига сталей 08КП (○), 08Ю (●), 10КП (Δ), 15СП (▲) и 20СП (□) на их B_{rs} и H_{cs} по [16, рис. 2 а, б].

Предпосылкой к этому служила возможность, при соблюдении определенных условий в соответствии с [17, 18], измерения H_c материалов на образцах в разомкнутой магнитной цепи. Хотя обоснованность применения такого подхода при измерении других магнитных параметров не была исследована, полученные результаты измерений были включены в справочные издания как магнитные свойства материалов (например, на рис.12.1 в [7]). На основе их анализа определены оптимальные параметры магнитного контроля качества отжига холоднодеформированных углеродистых сталей.

Но использование такой методики для получения информации о M_r сталей не может привести достоверным результатам по следующей причине. Проведенным в [19] анализом показано, что даже для «протяженных» стальных изделий (например, цилиндров с отношением λ длины к диаметру $\lambda = 20$), чувствительность остаточной намагниченности M_d изделия к изменениям M_r его материала не превышает 0,1, а к изменениям H_c и N – по модулю близка к 1. Поэтому зависимости $B_r(T_{отж})$ повторяют зависимости $H_c(T_{отж})$ в [8–16].

В [20] определены условия, при которых намагниченность насыщения материала может быть измерена с заданной погрешностью на образце конечных размеров в открытой магнитной цепи. В [21] показано, почему остаточная намагниченность ферромагнитного материала не может быть определена по результату измерения остаточной намагниченности образца конечных размеров в открытой магнитной цепи ни при каких условиях.

Проведенный анализ показал, что разница в результатах измерения максимальной магнитной проницаемости μ_m в [20] и [6] с уменьшением H_c сталей 30 и 45, отпущенных при разных температурах, возрастает с 32 до 97%. Это находится за пределами возможных в соответствии с [17, 18] погрешностей $\pm 5\%$ измерения μ_m . Причина этого в том, что экспериментальные исследования

магнитных параметров углеродистых сталей в [22] (как и в [23–25]) проведены «баллистически, путем сбрасывания катушки с образца» в разомкнутой магнитной цепи на образцах размером 64х8х8 мм. Единственным магнитным параметром материала, измерение которого допускается в открытой магнитной цепи, является H_c [17, 18]. При соблюдении определенных условий максимальная намагниченность M_m ферромагнитного тела практически не отличается от M_s материала [26]. Но результаты измерения μ_m образцов такого размера в разомкнутой магнитной цепи не соответствуют μ_m сталей [27]. Более того – расчет μ_m сталей по формулам [19] по результатам измерения μ_m образцов с $N = 0,025$ невозможен при достижимой [16, 17] точности измерения μ_m образцов. Примененная авторами [20–23] методика измерения μ_m («для уменьшения размагничивающего действия концов образца к нему приставлялись надставки из мягкого железа»), не позволила получить достоверные результаты при измерении μ_m углеродистых сталей. Использование «надставок», размеры и магнитные свойства которых не указаны, не позволяет использовать представленные в [20–23] результаты измерения μ_m образцов с «надставками» и для расчета μ_m углеродистых сталей. Тем не менее, полученные в [20–23] результаты измерения μ_m вплоть до настоящего времени представлены в научной, учебной и справочной литературе как магнитные свойства углеродистых сталей (см., например, [4, рис.10–12], [22, рис.12–14], [2, рис.2.5, 2.13а, 2.24а], [7, рис.12.5, 12.13.а, 12.24.а]). Проведенный с их использованием анализ характера и причин изменения магнитных параметров углеродистых сталей при закалке и отпуске не делает эти результаты (как и результаты их анализа) более достоверными. Разные аспекты этой проблемы рассмотрены автором так же в [26–31].

Выводы

1. Известные справочные данные о результатах измерения остаточной намагниченности M_r (остаточной индукции B_r), начальной μ_a и максимальной μ_m магнитных проницаемостей сталей, не всегда достоверны. В ряде установленных случаев в справочниках, монографиях и научных статьях приведены результаты измерения этих параметров на образцах разных размеров в разомкнутой магнитной цепи (иногда – с «надставками» из магнитомягкого материала), которые не соответствуют значениям M_r , μ_a и μ_m материалов. Особенности таких результатов являются:

- одинаковая или близкая функциональная зависимость параметров B_r и H_c от технологического режима получения материала и значения M_r , выходящие за пределы теоретически возможного диапазона их изменения;
- заниженные значения μ_m и относительно не большой диапазон ее изменения при изменении технологических факторов;
- нарушения требований ГОСТа [17] при измерениях μ_a ряда сталей привели к получению аномально высоких значений μ_a , не свойственных материалам с измеренной величиной H_c .

2. Остаточная намагниченность M_r ферромагнитных материалов не может быть рассчитана с необходимой точностью по остаточной намагниченности M_d изделий в открытой магнитной цепи. Причина этого в низкой чувствительности M_d изделий из таких материалов к M_r их материала.

3. Перед использованием справочных данных о результатах измерения магнитных параметров сталей следует выяснить методику и погрешности измерения данных, сопоставить результаты измерения магнитных параметров стали и параметров сталей с близкими химическими свойствами и технологией получения. Необходимо проверить соответствие численного значения магнитного параметра возможному диапазону его изменения для сталей рассматриваемого класса, монотонность (отсутствие резких скачков) изменения свойств сталей при монотонном изменении параметров режимов их получения.

Список литературы

1. Вонсовский, С.В. Магнитный структурный анализ / С.В. Вонсовский, М.Н. Михеев // Заводская лаборатория. – 1957. – № 10. – С. 1221–1226.
2. Михеев, М.Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
3. Сандомирский, С.Г. Современные возможности магнитного контроля структуры изделий (обзор) / С.Г. Сандомирский // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – №1. – С. 40–46.
4. Михеев, М.Н. Магнитные и электрические свойства стали после различных видов термообработки / М.Н. Михеев, В.М. Морозова. – М.: ОНТИ ЦНИИКА. 1964. – 46 с.
5. Магнитные и электрические свойства конструкционных и низколегированных сталей / Белов Н.Я. [и др.] – Л.: Ленинградский дом научно-технической пропаганды. 1969. – 36 с.
6. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида Г.В., А.П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
7. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под ред. В.В. Клюева. Т.6: В 3 кн. Кн.1. Магнитные методы контроля / В.В. Клюев [и др.]. М.: Машиностроение, 2006. – 848 с.
8. Мельгуй, М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М.А. Мельгуй. – Мн.: «Наука и техника», 1980. – 183 с.
9. Мельгуй, М.А., Контроль механических свойств листового проката сталей магнитным методом / М.А. Мельгуй, А.А. Востриков, А.А. Збровский // Дефектоскопия. – 1971. – № 3. – С. 10–15.
10. Исследование возможности магнитного контроля качества отжига холоднокатаных листовых сталей 08Ю и 10 КП / М.А. Мельгуй [и др.] – // В кн. «Неразрушающие методы и средства контроля и их применение в промышленности» (Материалы первой Белорусской респ. научно – технической конференции). – Минск, 12–14 сентября 1973 г. – С. 91–97.
11. Неразрушающий контроль механических свойств сталей для глубокой штамповки / М.А. Мельгуй [и др.] – // Сталь. – 1977. – № 2. – С. 167–170.
12. Неразрушающий магнитный контроль малоуглеродистой холоднокатаной полосы и ленты / М.А. Мельгуй [и др.]. // Заводская лаборатория. – 1977. – № 5. – С. 581–583.
13. Мельгуй, М.А. Неразрушающий контроль качества отжига тонколистовой стали 65Г / М.А. Мельгуй, Э.А. Шидловская // В кн. «Новые физические методы и средства контроля промышленных изделий» (Тез. докл. второй Белорусской респ. научно – технической конференции). – Минск, 27–28 сентября 1978 г. – С. 30–35.
14. Шидловская, Э.А. Контроль отжига холоднодеформированных листовых сталей / Э.А. Шидловская // В кн. «Физические свойства металлов и проблемы неразрушающего контроля». – Мн.: Наука и техника, 1978. – С. 89–93.

15. Мельгуй, М.А. Контроль механических свойств среднеуглеродистых листовых сталей в состоянии поставки / М.А. Мельгуй, Э.А. Шидловская, Т.В. Оленович // Дефектоскопия. – 1980. – № 5. – С. 60–64.
16. Матюк, В.Ф. Влияние технологии производства листового проката низкоуглеродистых качественных сталей на их структурное состояние и взаимосвязь между механическими и магнитными свойствами (обзор) / В.Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и техническая диагностика. – 2011. – № 1. – С. 3–29.
17. ГОСТ 8.377–80 Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Изд. стандартов, 1986. – 21 с.
18. Магнитные измерения / Е.Т. Чернышев – М.: Изд. стандартов, 1969. – 248 с.
19. Сандомирский, С.Г. Чувствительность остаточной намагниченности ферромагнитных изделий к магнитным характеристикам их материалов и геометрическим параметрам / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1990. – № 12. – С. 53–59.
20. Сандомирский, С.Г. Выбор величины намагничивающего поля при магнитоструктурном анализе ферромагнитных изделий / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1991. – № 7. – С. 42–48.
21. Сандомирский, С.Г. Анализ возможностей измерения остаточной намагниченности ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи / С.Г. Сандомирский // Метрология. – 2010. – № 3. – С. 33–41.
22. Морозова, В.М. Магнитные и электрические свойства закаленных и отпущенных углеродистых сталей / В.М. Морозова, М.Н. Михеев // Сб. «Об электромагнитных методах контроля качества изделий». Труды ИФМ АН СССР. – Вып. 24. – 1965. – С. 26–35.
23. Михеев, М.Н. Магнитные и электрические свойства стали после различных видов термообработки / М.Н. Михеев, В.М. Морозова. – М.: ОНТИ ЦНИИКА. 1964. – 46 с.
24. Морозова, В.М. Магнитные и электрические свойства сталей после различных термических обработок / В.М. Морозова, М.Н. Михеев // Сб. «Об электромагнитных методах контроля качества изделий». Труды ИФМ АН СССР. – Вып. 24. – 1965. – С. 3–25.
25. Морозова, В.М. Магнитные и электрические свойства закаленных и отпущенных углеродистых сталей / В.М. Морозова, М.Н. Михеев // Сб. «Об электромагнитных методах контроля качества изделий». Труды ИФМ АН СССР. – Вып. 24. – 1965. – С. 26–35.
26. Сандомирский, С.Г. Анализ погрешности измерения магнитной проницаемости ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи / С.Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2010. – № 9. – С. 57–61.
27. Сандомирский, С.Г. Анализ возможности измерения остаточной намагниченности ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи / С.Г. Сандомирский // Метрология. – 2010. – № 3. – С. 33–41.
28. Сандомирский, С.Г. О необходимости корректировки некоторых справочных данных о магнитных свойствах сталей / С.Г. Сандомирский // Сталь. – 2011. – № 5. – С. 78–82.
29. Сандомирский, С.Г. О результатах исследования влияния температуры отжига на остаточную намагниченность сталей / С.Г. Сандомирский // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 3. – С. 14–37.
30. Клюев, В.В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / Клюев В.В., С.Г. Сандомирский – М.: Изд. дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.
31. Сандомирский, С.Г. О причинах возникновения и предотвращении использования в магнитном структурном анализе неверных данных о магнитных свойствах сталей / С.Г. Сандомирский // Доклад XXXVII Уральской конференции с международным участием «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», 18–19 марта 2026 г., Екатеринбург. Эл. рес.: <https://conf.defectoskopiya.ru/event/6/page/64-7>

Контакты:

sand@oim.by (Сандомирский Сергей Григорьевич)