

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИТНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ

Виталий Власовец, Артем Науменко, Валерия Заец

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка

Проспект Московский 45, Харьков, Украина. E-mail: zaietsvaleria@mail.ru

Vitaliy Vlasovets, Artem Naymenko, Valeria Zaiets

Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko

St. Artem 44, Kharkiv, Ukraina. E-mail: zaietsvaleria@mail.ru

Аннотация. Обобщены существующие теоретические модели устанавливающие взаимосвязь между закономерностями изменения структурного состояния и свойств железоуглеродистых сплавов на основе изменения магнитного параметра – коэрцитивной силы.

Но случае изучения реальных сталей и чугунов, с гетерогенной структурой, теория существенно усложняется. Коэрцитивная сила будет зависеть от ряда факторов: намагниченности каждой из фаз, проницаемости, относительного объема отдельных фаз и степени магнитного взаимодействия между ними. Теоретически эта задача не решена, поэтому для выявления закономерных связей между коэрцитивной силой и структурным состоянием огромную роль имеют экспериментальные исследования, а для моделирования процессов необходимо использовать системный подход. Это и изучение неметаллических включений, их влияние на напряженно-деформированное состояние, также изучение и улучшение технологического процесса, термообработки, и модифицирования и легирования стали и чугунов. А поскольку железоуглеродистые сплавы имеют концентрационную неоднородность, то существует различие и связь в физико-механических и магнитных свойствах. Поэтому для определения как непосредственно коэрцитивной силы, так и оцениваемых свойств необходимо предварительно выявить корреляционные зависимости между выходными параметрами прибора и искомой характеристикой.

Ключевые слова: орудия сельскохозяйственного производства, магнитный контроль качества, коэрцитивная сила, механические свойства.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Комплексная модернизация производства с внедрением современных достижений отечественной и мировой науки для обеспечения конкурентоспособности продукции за счет повышения ее качества – одно из главных стратегических направлений развития орудий сельскохозяйственного производства. Её реализация обусловлена, с одной стороны необходимостью повышения механических свойств изделий, изготовленных преимущественно из традиционных железоуглеродистых сплавов – сталей и

чугунов, а с другой - обеспечением их стабильности путем формирования заданного структурного состояния и фазового состава материалов, при производстве и эксплуатации.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Использование традиционных разрушающих методов контроля [1, 2] не позволяет отследить отклонения от оптимального уровня в структурном составе и фазовых свойствах каждого изделия [3]. Поэтому важным является разработка основ для применения неразрушающего магнитного метода контроля – по коэрцитивной силе [4, 5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На основании обобщения существующих теоретических моделей установить возможность оценки закономерностей изменения структурного состояния и свойств железоуглеродистых сплавов на основе изменения магнитных параметров.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

На сегодняшний день предпринято большое количество попыток теоретически описать закономерности изменения структурного состояния и свойств железоуглеродистых сплавов на основе изменения магнитных параметров [1-5] Причины изменения магнитных свойств при структурно-фазовых превращениях в железоуглеродистых сплавах связывают, с одной стороны [5-7] с задержкой роста обратной магнитной фазы вследствие увеличения поверхностной энергии граничного слоя, отделяющего зародыш от основного домена. С другой стороны [8, 9] с необратимыми смещениями доменных границ в результате их взаимодействия с неоднородностями сплава и различного рода дефектами кристаллического строения.

Причинами легкого образования зародышей (локального неоднородного вращения вектора намагниченности) могут быть сильные размагничивающие поля, возникающие вблизи пор, трещин, немагнитных включений, границ зерен [10-13]. На этом предположении построены теоретические модели Гудинафа [14-17], Магера [2, 18, 19] табл.1.1.

Таблица 1. Теоретические модели связи коэрцитивной силы (H_c) и структурного состояния железоуглеродистых сплавов**Table 1.** Theoretical model of dependance of the (H_c) coercive force and structural state of iron-carbon alloys

Фактор	Особенности модели	Зависимость	Автор
1	2	3	4
Диаметр зерен	Границы зерен являются возможными источниками зародышей перемagnичивания, размеры которых определяются размером зерна	$H_c = \frac{15}{16} \frac{\pi \gamma}{\mu_0 M_s} \frac{1}{d_3}, \quad (1.1)$ <p>где γ – энергия доменной границы, отделяющая зародыш от остальной части кристалла; d_3 – средний диаметр зерна. Экспериментально подтверждено для железа высокой степени чистоты и электролитического $H_c = A/d_3 + B$ ($A=0,0018-0,0032$ А/см; $B=0-0,32$ А/см).</p>	Гудинаф, Магер
Напряжения	H_c максимальна при условии, если “дисперсность внутренних напряжений” близка к единице, т.е. $l \approx \delta$	$H_c \approx \rho_0 \frac{\lambda_s \Delta \bar{\sigma}_i}{\mu_0 M_s}, \quad (1.2)$ <p>где $\Delta \bar{\sigma}_i$ – среднее значение амплитуды внутренних напряжений; ρ_0 – “дисперсность внутренних напряжений”, определяемая отношением ширины доменной стенки к средней длине “волны напряжений” l, δ – ширина доменной стенки, λ_s – магнитострикция насыщения</p> $H_c \approx \frac{\delta \lambda_s \Delta \bar{\sigma}_i}{l \mu_0 M_s} \text{ при } l \gg \delta; \quad H_c \approx \frac{1}{\delta} \frac{\lambda_s \Delta \bar{\sigma}_i}{\mu_0 M_s} \text{ при } l \ll \delta$	Керстен
Обобщенная модель	Учен вклад дислокационных напряжений (первый член в фигурных скобках) и включений (второй и третий члены)	$H_c = \frac{(\ln L_3 / 2\delta)^{1/2}}{\sqrt{2} \mu_0 M_s (L_1 L_2)^{1/2} \cos \varphi} \left\{ \left[\frac{\rho_v}{3l} \delta (3Eb \lambda l ^2) \right]^{1/2} + \dots \right\} \quad (1.3)$ <p>(напряжения)</p> $\left\{ \dots + \left[\frac{4\pi^2 \rho_{EF} d_{EF}^6 \gamma^2}{9\delta^3} + \rho_{ES} \delta \left(\frac{2\pi^4}{3} \left(\frac{1}{18} - \frac{1}{48} \right) \mu_0 M_s^2 d_{ES}^5 \right)^{1/2} \right] \right\}, \quad (1.4)$ <p>(включения)</p> <p>где L_1, L_2 – линейные размеры доменов в плоскости, перпендикулярной вектору H; L_3 – третий линейный размер доменов; δ – ширина доменной границы; φ – угол между векторами M и H; ρ_v – поверхностная плотность дислокаций; l – проекция длины дислокационной линии на плоскость параллельную междоменной границе; E – модуль упругости; ρ_{EF} и ρ_{ES} – объемная плотность включений, размер которых соответствует $d_{EF} \ll \delta/2$ и $d_{ES} \gg \delta/2$</p>	Тройбле

В основе данных моделей лежит предположение, что границы зерен являются возможными источниками зародышей перемagnичивания, размеры которых определяются величиной зерна. Однако данными моделями не учитывается то, что возможным местом легкого образования зародышей перемagnичивания могут быть также участки неоднородностей (ликвационные зоны), обогащенные примесями, легирующими компонентами [20–22] или имеющие значительные локальные градиенты микронапряжений, дислокаций, что в данных теоретических моделях не учитывалось.

Связав изменение граничной энергии с изменением – магнитоупругой Керстен [23], предложил модель, учитывающую амплитуду и дисперсность внутренних микронапряжений в железоуглеродистом сплаве (табл.1.1). В данной модели не учитывались источники напряжений, в частности дислока-

ции, число которых может существенно увеличиваться при термической обработке сплава [24]. Вичена [25] предложил модель, учитывающую размеры доменной структуры и плотность дислокаций в сплаве, которая затем была уточнена Малекком [26]. Она учитывала размеры напряженных участков.

Несмотря на различные факторы, определяющие уровень коэрцитивной силы (H_c), все выявленные исследования [46–53], учитывающие микронапряжения, рекомендуют её оценку по плотности дислокаций, что в ряде случаев подтверждено экспериментально [27].

Однако ни одна из рассмотренных теорий не учитывает расположение дислокаций на границах зерен, малоугловых границах, блоках мозаики и т.д. Это приводит к завышенным оценкам H_c , так как часть дислокаций, находящихся на близких расстояниях и имеющих различные знаки, будут оказывать

меньшее воздействие на доменную стенку по сравнению с единичной [28].

Для сталей с концентрацией углерода до 2%, который находится в связанном состоянии в форме Me_3C и играет роль “включений” Керстеном [25], [41] была предложена модель, где H_c пропорциональна объему включений в степени $2/3$.

Однако для относительно крупных включений ($d > \delta$) и значительной объемной концентрации ($v > 0,01$) такая модель непригодна. Кондорский [29], Дийкстр [30], Верт [31] предложили учитывать дисперсность включений, так как от размера существенно зависит изменение магнитостатической энергии и поверхностного натяжения при прохождении доменной стенки через включение. Данная модель не учитывает намагниченность насыщения карбидной фазы (для Me_3C) и отклонение от сферической формы включений. Известно [32], что незначительное изменение формы (соотношение осей более 4%) приводит к изменению H_c при прочих равных условиях. При расчете H_c по различным моделям “включений” для случая крупных не учитывалась магнотриксционная энергия вторичных доменов, а также влияние действующих напряжений. Учет этих факторов [64] при размерах включений, больших m , может дать дополнительный (около 10%) вклад в повышение величины H_c .

Поскольку железоуглеродистые сплавы имеют концентрационную неоднородность [33], то существует локальное различие и в константах магнитной анизотропии, магнотрикции насыщения и точек Кюри. Считая, что в сплаве существует некоторый усредненный “период” неоднородностей концентрации предложена модель [34], учитывающая влияние этого фактора.

Все рассмотренные выше модели учитывали, как правило, взаимодействие одного типа дефекта с доменной структурой. Тройбле обобщил результаты теоретических работ, касающихся использования H_c для оценки свойств материалов (см. табл. 1.1).

Анализ рассмотренных теоретических моделей показывает, что H_c является структурно-чувствительной характеристикой, реагирующей на различные изменения структурного состояния вещества, что подтверждается экспериментально. Однако использование H_c для точного количественного расчета процессов структурообразования сталей и чугунов, применяемых для изготовления орудий сельскохозяйственного производства, сталкивается с существенными трудностями, поскольку на эту характеристику влияет значительное количество факторов. Для её применения требуется анализ степени влияния всех изменяющихся факторов для вполне конкретных материалов и способов упрочнения. Попытки определения H_c с учетом изменения эффективной константы анизотропии дают очень большую величину, поскольку многие исходные данные взяты без учета реальной структуры или использованы параметры чистого железа. Даже учет влияния большого количества факторов (степени тетрагональности мартенситной решетки, величины внутренних напряжений; объема, формы и в некотором приближении распределения в матрице включений)

позволяет лишь приблизительно вычислить значение H_c закаленных и отпущенных железоуглеродистых сплавов.

ВЫВОДЫ

Рассмотренные теоретические модели устанавливающие взаимосвязь между закономерностями изменения структурного состояния и свойств железоуглеродистых сплавов, используемых для изготовления орудий сельскохозяйственного производства, на основе изменения магнитного параметра – коэрцитивной силы можно использовать только для качественного описания процессов при изменении структурного состояния и фазового состава. Кроме того, во всех приведенных теоретических моделях рассмотрены однофазные системы, имеющие ферромагнитные включения. В случае изучения реальных сталей и чугунов, с гетерогенной структурой, теория существенно усложняется. Результирующая H_c , в этом случае, будет зависеть от ряда факторов: проницаемости, намагниченности каждой из фаз, относительного объема отдельных фаз и степени магнитного взаимодействия между ними. Теоретически эта задача не решена, поэтому для выявления закономерных связей между H_c и структурным состоянием огромную роль имеют экспериментальные исследования, а для моделирования процессов необходимо использовать системный подход.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Михеев М. Н. 1993.** Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов – М.: Наука, – 249.
2. **Cullity B.D. 2008.** Introduction to Magnetic Materials. / Cullity B.D., Graham C.D. – Indianapolis: Wiley-IEEE. 544.
3. **Goldman A. 2006.** Modern ferrite technology. / Goldman A. – Hardcover: Springer Science & Business. – 438.
4. **Bakshi A.V 2008** Electromagnetic Theory. / Bakshi A.V., Bakshi U.A. – Pune: Technical Publications. – 544.
5. **Martinez-de-Guerenu A. 2006.** Nondestructive characterization of recovery and recrystallization in cold rolled low carbon steel by magnetic hysteresis loops. / Martinez-de-Guerenu A., Gurruchaga K. // Third Joint European Magnetic Symposia. № 1. – 14–17.
6. **Sidorkin A.S. 2006.** Domain Structure in Ferroelectrics and Related Materials. / Sidorkin A.S. – Cambridge: Cambridge Int Science Publishing. – 234.
7. **Jungk T. 2009.** Contrast mechanisms for the detection of ferroelectric domains with scanning force microscopy. / T. Jungk, A. Hoffman // New Journal of Physics. – №11. – 62–75.

8. **Медведь А.В. 2005.** Прямое измерение коэрцитивности и обменного смещения полей переманичивания магнитных пленок наноразмерной толщины с использованием анизотропного магниторезистивного эффекта. / А.В. Медведь, Р.Г. Крыштал, А.И. Крикунов, С.И. Касаткин // Письма в ЖТФ. Т. 31. – №20. – 44–49.
9. **Вонсовский С.В. 1971.** Магнетизм. / С.В. Вонсовский – М.: Наука, – 132.
10. **Мужицкий В.Ф. 2007.** Магнитостатическое поле поверхностного дефекта конечной протяженности. / В.Ф. Мужицкий, А.Е. Щубочкин // Контроль. Диагностика. №12. – 23–28.
11. **Newnham R. 2005.** Properties of materials. / A. Aharoni. – Oxford: Oxford University Press, – 378.
12. **Billinge S. 1998.** Lokal structure from diffraction. / S. Billinge, M. Thorpe. – Kluwer Academic Publishers: Springer, 399.
13. **Lalita U. 2005.** Electromagnetic nondestructive evaluation. / U. Lalita, N. Bowler. – Amsterdam: IOS Press, 254.
14. **Hubert A. 1998.** Magnetic Domains. The Analysis of Magnetic Microstructures. / A. Hubert, R. Schafer. – Berkeley: Springer, 720.
15. **Lannie K. 2007.** New Research on Superconductivity and Magnetism. / K. Lannie. – Hauppauge: Nova Publishers, 215.
16. **Goodenough J. 1963.** Magnetism and the chemical bond. / J. Goodenough. – New York: Interscience–Wiley, 342.
17. **Takahashi S. 2006.** Relationship between mechanical and magnetic properties in cold rolled low carbon steel. / S. Takahashi, S. Kobayashi, H. Kikuchi // J.Appl.Phys. – Vol.100. – №11. – 1048–1063.
18. **J. Stratton. 2007.** Electromagnetic theory. / Stratton J. – Indianapolis: Wiley–IEEE, 615.
19. **Зайкова В.А. 1992.** Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей. / В.А. Зайкова, И.Е. Старцева, Б.Н. Филиппов. – М: Наука, – 270.
20. **Сандомирский С.Г. 2006.** Возможности и ограничения магнитного контроля структуры чугуновых отливок (обзор) / С.Г. Сандомирский // Литье и металлургия. – №2. – 118–123.
21. **Бетень Г.Ф., Анискович Г.И. 2013.** MOTROL. Модификация структуры и механических свойств стали пониженной прокаливаемости при импульсном закалочном охлаждении жидкостью, 15 №7, 80–86.
22. **Когут Н., Гуменюк Р. 2014.** MOTROL. Влияние технологических факторов на изменение трещиностойкости термонапряженной арматуры, 16 №4, 189–192.
23. **Schlenker M. 2005.** Magnetism: Fundamentals. / Étienne Du Trémolet de Lacheisserie, Damien Gignoux, Michel Schlenker. – Berkeley: Springer – 507.
24. **Дяченко С.С. 2003.** Физические основы прочности и пластичности металлов. / С.С. Дяченко. – Харьков: ХНАДУ – 226.
25. **Visintin A. 1993.** Models of Hysteresis. / A.Visintin. – Danvers: CRC Press – 221.
26. **Paul D.I. 1975.** New Theory of Coercive Force of Ferromagnetic Materials. / D.I. Paul, R. Friedberg // Phys.Rev. – Vol.34. – №22. – 1415–1425.
27. **Михеев М.Н. 1985.** Магнитные методы неразрушающего контроля структурного состояния и прочностных характеристик термически обработанных сталей. / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов // Дефектоскопия. – №3. 3–21.
28. **Ekhard K. 1993.** Phase transitions in ferroelastic and co-elastic crystals. / K. Ekhard, H. Salije. – Cambridge: Cambridge University Press, – 296.
29. **Новгородцев А.Б. 2001.** Теория электромагнитного поля. / А.Б. Новгородцев. – СПб: СПбГТУ, – 248 с.
30. **Stefanita C.G. 2008.** From Bulk to Nano / C.G. Ted. Stefanita. – Berkeley: Springer – 171.
31. **Paul D.I. 1982.** General theory of the coercive force due to domain wall pinning. / D.I. Paul // J. Appl.Phys. – Vol.53. – №3. 1063–1069.
32. **Malek J. 1998.** Binder mean-free-path determination in cemented carbide by coercive force and material composition. / J. Malek, R. Porat // Materials Science and Engineering: A. – Vol. 105–106 – №11. 289–292.
33. **Майборода В.П. 2002.** Структурные аспекты теории плавления и затвердевания. / В.П. Майборода, А.П. Шпак, И.Т. Куницкий – К: Академперіодика – 124.
34. **Щербинин В.Е. 1996.** Магнитный контроль качества металлов. / В. Е. Щербинин, Э. С. Горкунов – Екатеринбург: УрО РАН – 263.
35. **Argon A.S. 2007.** Strengthening Mechanisms in Crystal Plasticity. / A.S. Argon. – Oxford: Oxford University Press – 404.

THE THEORETICAL GROUNDING OF USING OF THE MAGNETIC STRUCTURAL ANALYSIS TO EVALUATE THE PROPERTIES OF DETAILS

Summary. The existing theoretical models of the relationship between dependences of changes the structural state and properties of iron-based alloys on the base of changes of magnetic parameter – coercive force are summarized. In the case of study of real steel and cast iron with a heterogeneous structure the theory is greatly complicated. The coercive force will depend on several factors: the magnetization of each of the phases, carrying-permittivity, the relative volume of the individual phases and the extent of the magnetic interaction between them.

Theoretically this problem is not solved, so to find the appropriate connections between the coercive force and the structural state the experimental studies has a huge role, and for the simulation of processes the system approach is necessary to use. This is a study of non-metallic inclusions, its impact on the stress-strain state, as well study and improvement of technological process, heat treatment, and modification and alloying of steel and cast iron. Because the iron-carbon alloys are concentration heterogeneity there is difference and connection in the mechanical and magnetic properties.

Therefore, to determine the coercive force, and evaluating properties one had to find previously the correlations between the output parameters of the device and the desired characteristics.

Key words: agricultural equipment, magnetic control of quality, coercive force, mechanical properties.