

УДК 620.179.14

СИНТЕЗ СТРУКТУРОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ – АЛЬТЕРНАТИВА «МНОГОПАРАМЕТРОВЫМ» МЕТОДАМ В МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

SYNTHESIS OF STRUCTURE-SENSITIVE MAGNETIC PARAMETERS – AN ALTERNATIVE TO "MULTIPARAMETER" METHODS IN MAGNETIC STRUCTUROSCOPY *S. G. SANDOMIRSKI*

Аннотация

Показано, что «многопараметровые» методы магнитной структуроскопии, основанные на измерении магнитных параметров, точность измерения которых не высока, не могут обеспечить достоверного контроля структуры сталей. В качестве альтернативы предложены параметры, чувствительные к структурным изменениям в сталях, формировать из коэрцитивной силы H_c остаточной намагниченности M_r и намагниченности M_s технического насыщения, измеренных на предельной петле магнитного гистерезиса. Показано, что структурная чувствительность этих параметров выше или не хуже структурной чувствительности H_c , M_r , магнитных проницаемостей и релаксационных магнитных параметров, а измерены они могут быть проще и точнее.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, магнитный структурный анализ, магнитные измерения.

Abstract

It is shown that the "multiparameter" methods of magnetic structuroscopy, based on the measurement of magnetic parameters, the accuracy of which is not high, can not provide reliable control of the structure of steels. Alternatively, parameters that are sensitive to structural changes in steels are proposed, for the formation of which the residual magnetization M_r , the saturation magnetization M_s and the coercive force H_c , measured on the saturation hysteresis loop. It is shown that the structural sensitivity of these parameters is higher or no worse than the structural sensitivity of H_c , M_r , magnetic permeability's and relaxation magnetic parameters, and they can be measured more simply and more accurately.

Key words:

Non-destructive testing, magnetic structural analysis, magnetic measurements.

Магнитными параметрами, чувствительными к структуре сталей, являются коэрцитивная сила H_c и остаточная намагниченность M_r . Магнитным параметром, чувствительным к фазовому составу стали, считают

намагниченность M_s технического насыщения. Относительная погрешность δ их измерения по методикам ГОСТ 8.377-80: H – ± 2 %, M_r и M_s – не более ± 3 %, а отношение $K_{II} = M_{rs}/M_s$ – с $\delta \approx \pm 1$ %.

Многообразие марок сталей и режимов их термических обработок предопределило использование для магнитной структуроскопии и других магнитных характеристик: максимальной μ_m , начальной μ_a и максимальной дифференциальной μ_{dm} магнитных проницаемостей, релаксационных намагниченности M_{Hr} и магнитной восприимчивости χ_r , намагниченности M_{rC} коэрцитивного возврата и др. В практически важных случаях они обладают высокой чувствительностью к изменениям структуры сталей, отличной от чувствительности H и M_r к ее изменениям. Но методики измерения μ_m , μ_a , μ_{dm} , M_{Hr} , M_{rC} и χ_r сложны и часто не регламентированы ГОСТом, а δ измерения больше, чем у H_c , M_r и M_s . Это усложняет методы магнитной структуроскопии и снижает их достоверность.

Некоторые ученые предложили для расчета твердости HRC сталей суммировать с разными весовыми коэффициентами результаты измерения H , M_{Hr} и χ_r , их квадратичные члены и произведение $\chi_r M_{Hr}$. В другой модели суммируют результаты измерения градиентов поля от остаточной намагниченности объекта контроля после ряда намагничиваний импульсным полем разной напряженности и направления. Результат превзошел ожидания: коэффициент R корреляции результатов косвенных магнитных и прямых физических измерений HRC для многих сталей оказался близок к «1» ($0,997 \leq R \leq 0,999$).

Возможно ли такое? Ведь измерения указанных параметров проведены в ограниченных диапазонах изменения аппаратурой, у которой δ измерения составляет $5 \div 18$ %. Каковы ограничения достижимого коэффициента R корреляции между результатами измерения и истинным значением физической величины, определяемые относительной погрешностью ее измерения и диапазоном изменения?

В [1, 2] эти ограничения установлены и показано, что в указанных (и многих других) случаях аномально высокие R при определении твердости изделий и режима их отпуска по результатам измерений комплекса магнитных параметров получены путем подбора корректирующих коэффициентов к конкретным результатам измерения магнитных параметров и твердости сталей без учета реальных погрешностей измерения, набора статистических данных контроля при влиянии мешающих факторов и последующего корреляционного анализа. Реальные погрешности измерения использованных магнитных параметров не позволяют получить такую тесноту связи контролируемых механических свойств и информационных параметров «многопараметровых» методов.

Для формирования магнитных параметров сталей, обладающих высокой чувствительностью к изменениям структуры металла, простотой и точностью измерения, использованы разработанные формулы для расчета



$\mu_m, \mu_a, \mu_d, M_{Hr}$ и χ_r, M_{rC} сталей и изделий из них по H, M_r и M_s , результаты анализа структурной и фазовой чувствительности этих параметров [3, 4].

Анализ позволил, в дополнение к H_c и M_r , сформировать магнитные параметры, чувствительные к изменениям структуры сталей:

$$K_{II} = M_r/M_s; H_0 = H_c/\text{tg}(0,5\pi K_{II}); F_1 = M_r/H_c; F_2 = M_r(1 - K_{II})^2. \quad (1)$$

Как следует из теоретических выкладок [5], параметр K_{II} обладает более высокой структурной чувствительностью, чем M_r . Это подтверждают, например, зависимости M_r и K_{II} стали 40X1HBA от температуры T_0 отпуска [6, табл. 28.2]. При изменении T_0 от 350 до 600 °С параметр M_r изменяется в 1,45 раз, а K_{II} – в 1,48 раз. При этом параметр K_{II} по ГОСТ 3.377–80 может быть измерен в три раза точнее, чем M_r .

Параметр H_0 во многих случаях оказывается более чувствительным к структурным изменениям в сталях и изменениям их физико-механических свойств, происходящих при термических обработках, чем H_c . Например, в табл. 1 представлены изменения H_c, M_r, M_s , параметра H_0 и твердости HRC стали 45 в зависимости от температуры T_0 отпуска.

Статистическая обработка результатов табл. 1 показала, что коэффициент R корреляции между H_c и HRC стали 45 во всем диапазоне изменения T_0 составил 0,846, а между параметром H_0 и HRC – 0,882. В более узких (важных) интервалах изменения T_0 эффективность использования параметра H_0 вместо H_c еще выше. Так, при изменении T_0 стали 45 от 450 до 350 °С параметр H_c увеличивается в 1,24 раза, а H_0 – в 2,3 раза (табл. 1). При этом δ измерения H_c и H_0 практически одинаковы.

Табл. 1. Магнитные свойства и твердость стали 45

$T_0, ^\circ\text{C}$	Результаты измерения в [6, табл.3.1]				$H_0, \text{А/м}$
	$H_c, \text{А/м}$	$M_r, \text{кА/м}$	$M_s, \text{кА/м}$	HRC	
20	3000	910	1557	60	2294
150	2700	919	1566	55	2048
200	2460	932	1574	53	1834
250	1550	1027	1634	50	1023
300	1340	1018	1631	45	898
350	1260	1021	1631	45	839
400	1120	1136	1627	42	575
450	1020	1271	1626	37	364
500	1030	1276	1625	34	361
550	1050	1280	1617	29	357
600	1040	1248	1606	26	380
650	880	1250	1597	20	313

На рис. 1 и 2 сопоставлено влияние температуры T_0 отпуска после закалки сталей 30 и 45 на результаты измерения в [6, табл.1.1 и 3.1] их μ_m и M_{Hr} и расчета параметров F_1 и F_2 этих сталей.



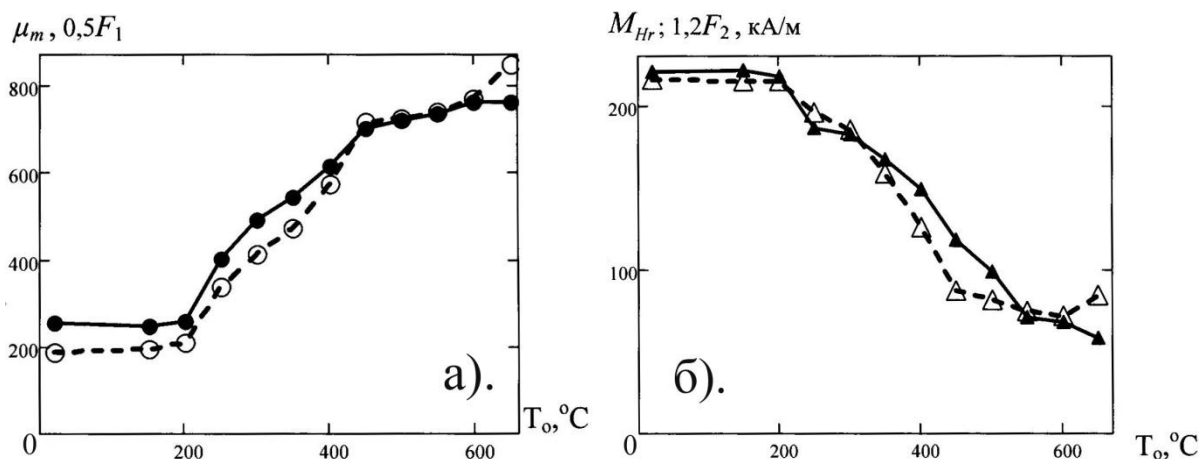


Рис. 1. Влияние температуры T_0 отпуска стали 30 после закалки от 850 °С на результаты измерения ее μ_m (а, ●) и M_{Hr} (б, ▲) и расчета параметров F_1 (а, о) и F_2 (б, Δ) этой стали [7]

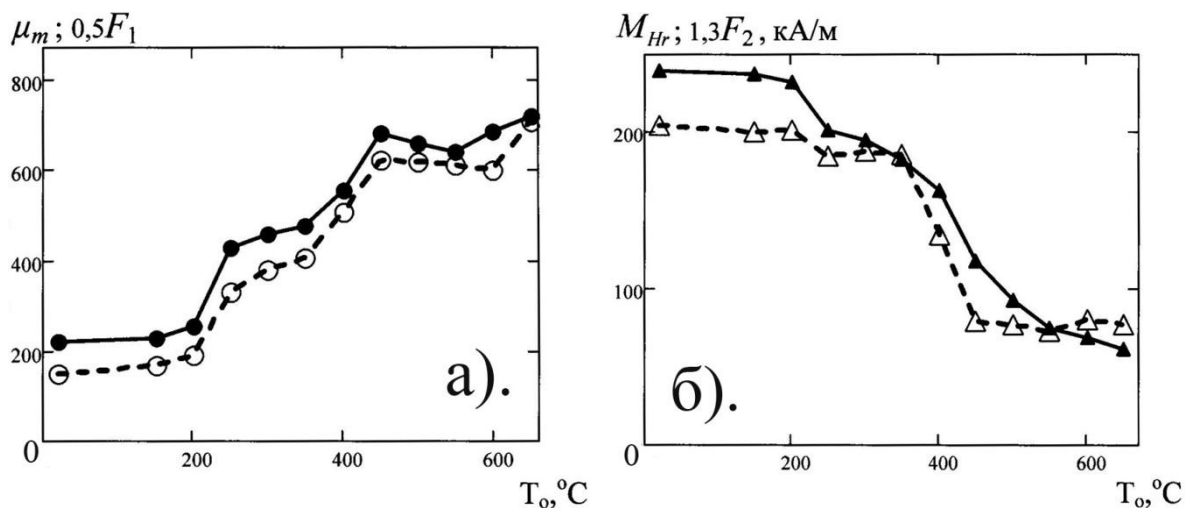


Рис. 2. Влияние T_0 стали 45 после закалки от 850 °С на данные измерения ее μ_m (а, ●) и M_{Hr} (б, ▲) и расчета F_1 (а, о) и F_2 (б, Δ) этой стали [8]

Результаты (рис.1, а и 2, а) показывают, что зависимости $\mu_m(T_0)$ и $0,5F_1(T_0)$ практически совпадают. Погрешности δ измерения μ_m и расчета F_1 равны, но параметр F_1 может быть измерен на порядок проще, чем μ_m .

Зависимости $M_{Hr}(T_0)$ и $1,2F_2(T_0)$ также совпадают с точностью до погрешностей эксперимента (рис.1, б, 2, б). Но δ расчета F_2 по результатам измерения M_r и K_{II} вдвое меньше δ измерения M_{Hr} .

Параметры K_{II} , H_0 , F_1 и F_2 могут быть использованы в комбинациях друг с другом и с H_c и M_r .

Выводы

1. Аномально высокие коэффициенты R корреляции (до $R = 0,999$) при определении твердости изделий и режима их отпуска по результатам измерений комплекса магнитных параметров получены ряде работ путем подбора корректирующих коэффициентов к конкретным результатам измерения магнитных параметров без учета реальных погрешностей измере-

ния, набора статистических данных контроля при влиянии мешающих факторов и последующего корреляционного анализа.

2. Предложено в магнитной структуроскопии использовать параметры (1), синтезированные из H_c , M_r и M_s сталей. Показано, что структурная чувствительность этих параметров выше или не хуже структурной чувствительности H_c , M_r , магнитных проницаемостей и релаксационных магнитных параметров, а измерены они могут быть проще и с более высокой точностью.

3. Полученный результат позволяет при разработке приборов магнитной структуроскопии изделий в замкнутой магнитной цепи сосредоточить внимание на повышении точности измерения H_{cs} , M_{rs} и M_s материала изделий и отказаться от сложных и не точных измерений других магнитных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сандомирский, С. Г.** Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции между ее истинными значениями и результатами измерения / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2014. – № 10. – С. 13–17.

2. **Сандомирский, С. Г.** О коэффициенте корреляции между результатами измерения и расчета твердости сталей при «многопараметровых» методах контроля / С. Г. Сандомирский // XXI Всероссийская конф. по неразрушающему контролю и техн. диагностике : сб. тр., Москва, 28 февр.–2 марта 2017 г. – М. : Спектр, 2017. – С. 231–246.

3. **Сандомирский, С. Г.** Возможности и ограничения использования измерений релаксационных магнитных параметров сталей в магнитном структурном анализе (обзор) / С. Г. Сандомирский // В мире НК. – 2013. – № 4. – С. 5–11.

4. **Sandomirski, S. G.** Analysis of the structural sensitivity of the permeability of steels / S.G. Sandomirski // Reports the 19th WCNDT 2016 in Munich, Germany. Rep. P 41. P. 1–8.

5. **Тикадзуми, С.** Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми. – М. : Мир, 1987. – 419 с.

6. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 218 с.

7. **Сандомирский, С. Г.** Синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей из параметров их предельной петли магнитного гистерезиса / С.Г. Сандомирский // XXI Всерос. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике: сб. тр., Москва, 28 февр.–2 марта 2017 г. – М. : Изд. дом «Спектр», 2017. С. 246–261.

8. **Сандомирский, С. Г.** Формирование структурочувствительных параметров из параметров предельной петли магнитного гистерезиса сталей / С. Г. Сандомирский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 27–28 апр. 2017 / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов. – Могилев, 2017. – С. 358–359.