

УДК 538.2; 620.179.14

## НОВЫЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА СТАЛЕЙ В ПРИБОРАХ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

Сандомирский С.Г.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Чувствительными к фазовому составу и структурному состоянию сталей являются их намагниченность  $M_s$  технического насыщения, остаточная намагниченность  $M_r$  и коэрцитивная сила  $H_c$  предельной петли магнитного гистерезиса. Относительная погрешность  $\delta$  измерения по методикам ГОСТа:  $H_c - \pm 2\%$ ,  $M_r$  и  $M_s - \pm 3\%$ , а отношения  $K_{II} = M_r/M_s$  при измерении  $M_r$  и  $M_s$  на одной аппаратуре  $- \pm 1\%$ .

Но установилось мнение, что результатов измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  не достаточно для решения ряда задач магнитной структуроскопии. Одной из таких задач считают контроль качества высокотемпературного отпуска среднеуглеродистых легированных сталей. Многообразие сталей и режимов их обработок предопределило использование для структуроскопии максимальной  $\mu_m$  и начальной  $\mu_a$  магнитных проницаемостей, релаксационных намагниченности  $M_{Hr}$  и восприимчивости  $\chi_r$ , намагниченности  $M_{rc}$  коэрцитивного возврата и др. Часто их чувствительности к изменениям структуры сталей высоки и отличны от чувствительности к ее изменениям параметров  $H_c$  и  $M_r$ . Некоторые ученые выразили сомнения в целесообразности использования  $M_r$  сталей для их магнитной структуроскопии.

Но методики измерения  $\mu_m$ ,  $\mu_a$ ,  $M_{Hr}$ ,  $M_{rc}$  и  $\chi_r$  сложны и не всегда регламентированы ГОСТом, а  $\delta$  измерения больше, чем у  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$ . Это усложняет и снижает достоверность магнитной структуроскопии сталей.

Для формирования магнитных параметров, обладающих высокой чувствительностью к изменениям структуры стали, простотой и точностью измерения, из  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  его предельной петли гистерезиса воспользуемся разработанными формулами для расчета  $\mu_m$ ,  $\mu_a$ ,  $M_{Hr}$ ,  $M_{rc}$  и  $\chi_r$  по результатам измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  [1 – 3], которые обобщены в [4]:

$$\mu_m \approx [0,5 + 0,00006H_c - (0,000068H_c)^2] \frac{M_r}{H_c},$$

$$\mu_a \approx \frac{[0,5 + 0,067H_c - (0,0687H_c)^2] M_r}{(2,9 + 35e^{-1,75H_c}) H_c},$$

$$M_{Hr} \approx 4M_r(1 - K_{II})^2/3, \quad M_{rc} \approx 1,23M_r(1 - K_{II})^2,$$

$$\chi_r \approx M_r(1 - K_{II})^{1,82}/H_c. \quad (1)$$

Формулы (1) описывают результаты измерения  $\mu_m$ ,  $\mu_a$ ,  $M_{Hr}$ ,  $M_{rc}$  и  $\chi_r$  с погрешностью, не более суммы  $\delta$  измерения входящих в (1) параметров. Анализ зависимостей (1) позволил, в дополнение к  $H_c$  и  $M_r$ , сформировать из параметров предельной петли гистерезиса параметры, чувствительные к изменениям структуры сталей:

$$F_1 = M_r/H_c \quad \text{и} \quad F_1 = M_r(1 - K_{II})^2. \quad (2)$$

На рисунках, как пример, сопоставлено влияние температур  $T_3$  закалки (рис.1) и  $T_0$  отпуска (рис.2) стали 38ХНМ на измеренные в [5, табл.21.1, 21.2]  $\mu_m$ ,  $M_{Hr}$  и рассчитанные по (2) параметры  $F_1$  и  $F_2$  этой стали.

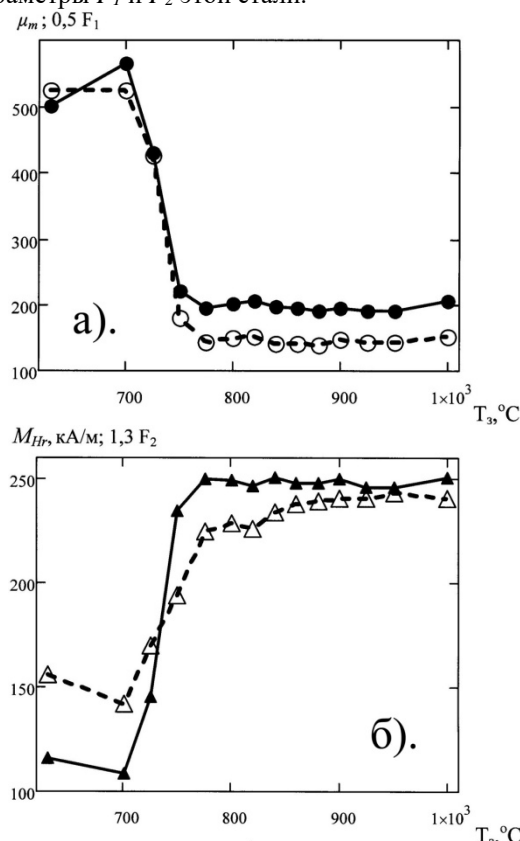


Рисунок 1 – Влияние  $T_3$  стали 38ХНМ на результаты измерения  $\mu_m$  (а, ●),  $M_{Hr}$  (б, ▲) и расчета  $F_1$  (а, ○),  $F_2$  (б, Δ) этой стали

Результаты (рисунки 1а, 2а) показывают, что зависимости  $\mu_m(T_0)$  и  $0,5F_1(T_0)$  стали 38ХНМ практически совпадают. Относительные погрешности  $\delta$  измерения  $\mu_m$  и расчета  $F_1$  равны,

но  $H_c$  и  $M_r$  по ГОСТу могут быть измерены на порядок проще, чем  $\mu_m$ .

Зависимости  $M_{Hr}(T_0)$  и  $1,3F_2(T_0)$  стали 38ХНМ также совпадают с точностью до погрешностей эксперимента (рис.1б, 2б). Но  $\delta$  расчета  $F_2$  по результатам измерения  $M_r$  и  $K_{II}$  вдвое меньше заявленной  $\delta$  измерения  $M_{Hr}$  (по ГОСТу методика и  $\delta$  измерения  $M_{Hr}$  не регламентированы, а ее измерение «не поддается автоматизации»).

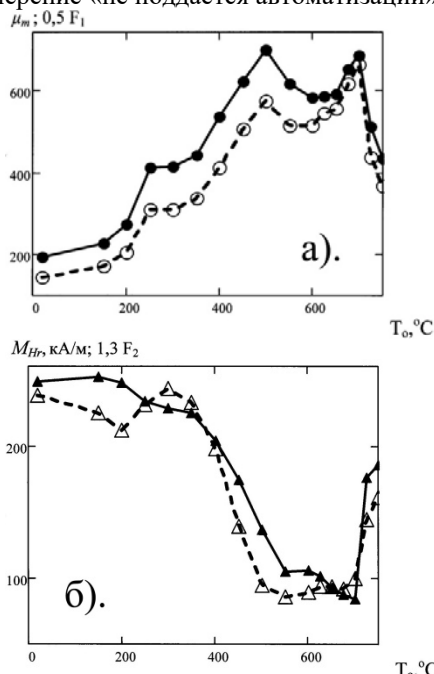


Рисунок 2 – Влияние  $T_0$  стали 38ХНМ после закалки от 860°C на результаты измерения  $\mu_m$ (а, ●),  $M_{Hr}$ (б, ▲) и расчета  $F_1$ (а, ○),  $F_2$ (б, Δ) этой стали

В магнитной структуроскопии параметры  $F_1$  и  $F_2$ , рассчитанные по (2) по результатам измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$ , могут быть использованы и в разных комбинациях друг с другом и с  $H_c$  и  $M_r$ .

Предложенный подход позволяет при разработке приборов магнитной структуроскопии

УДК 621.793.7

## РАСХОДНЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССА СВЕРХЗВУКОВОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ДЕТАЛИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Данько К.А., Долматов А.И.

Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина

Необходимость и целесообразность сочетания в деталях АД твердого, прочного, износостойкого и жаропрочного поверхностного слоя с пластичной, вязкой, устойчивой к образованию трещин и недорогой основой служит одной из причин увеличения популярности методов

изделий в замкнутой магнитной цепи сосредоточить усилия на повышении точности измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  материала изделий и отказаться от сложных и не точных измерений других магнитных параметров. Любой необходимый магнитный параметр материала изделий или любая их комбинация, могут быть синтезированы из результатов измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  с погрешностью, не более суммы погрешностей измерения параметров  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$ .

Все эти параметры могут быть рассчитаны по разработанным формулам (1) или упрощенным алгоритмам (2).

### Литература

1. Сандомирский, С.Г. Структурная чувствительность максимальной магнитной проницаемости. Ч. 1. Статистический анализ связи максимальной магнитной проницаемости сталей с параметрами петли гистерезиса / С.Г. Сандомирский // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 12 (186). – С. 33–38.
2. Сандомирский, С.Г. Анализ структурной чувствительности начальной магнитной проницаемости сталей / С.Г. Сандомирский // Зав. лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – № 6. – С. 29 – 33.
3. Сандомирский, С.Г. Возможности и ограничения использования измерений релаксационных магнитных параметров сталей в магнитном структурном анализе (обзор) / С.Г. Сандомирский // В мире неразрушающего контроля. – 2013. – № 4. – С. 5–12.
4. Клюев, В.В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В.В. Клюев, С.Г. Сандомирский – М.: Издательский дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.
5. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.

газотермического напыления в аэрокосмической отрасли по всему миру.

Газотермическое напыление считается одной из наиболее перспективных технологий с точки зрения технологических возможностей и экологии. Мировой рынок, включающий доходы от материалов, оборудования и напыления покрытий в 2015 г оценивался экспертами в 7.58 миллиардов