

Савич В.В. // Аддитивные технологии, материалы и конструкции: Материалы науч.-тех. конф. (Гродно, 5-6 октября 2016 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редколл.: А.И. Свириденко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, ГрГУ, 2016. – 274 с. – С. 20–30.

3 Celebrating ten years of metal AM hip cups as GE launches validation consultancy for medical devices // Metal Additive Manufacturing | Spring 2018. Vol. 4 No. 1. – P. 11.

4 Hybrid Metal 3D Printer LUMEX Avance-25 & Applications/ https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/1300_matsuura.pdf

5 Okuma Introduces New Hybrid 3D Printer and CNC Machine // <https://3dprint.com/220638/okuma-hybrid-3d-printer-cnc/>

6 Emily-Jo Hopson. Digital Metal: High-precision Additive Manufacturing technology from a

metal powder giant / Metal Additive Manufacturing | Spring 2018. Vol. 4. No. 1. – P. 103–111.

7 David Whittaker. Alternative metal Additive Manufacturing technologies highlighted at Euro PM2017 // Metal Additive Manufacturing | Spring 2018. Vol. 4. No. 1. – P. 131–140.

8 Direct metal laser sintering/selective laser melting of tungsten powders / Ravi K. Enneti, Rick Morgan, Thomas Wolfe and all // Volume 53, No. 4, 2017 International Journal of Powder Metallurgy. – P. 23–31.

9 Debbie Huck-Jones. Beyond particle size: Exploring the influence of particle shape on metal powder performance // Metal Additive Manufacturing | Winter 2017. Vol. 3. No. 4. – P. 99–103.

10. GE Additive Machines: Direct Metal Laser Melting (DMLM) machines // <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/dmlm-machines/x-line-2000r>.

УДК 538.2; 620.179.14

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ЧАСТНЫХ ПЕТЛЯХ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

Сандомирский С.Г.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Одна из областей применения приборов магнитной структуроскопии – контроль структурно-го состояния и прочностных характеристик термически обработанных стальных изделий. Физической основой такого контроля является высокая чувствительность магнитных свойств сталей к изменениям их структуры. В большинстве случаев используют характеристики предельной петли магнитного гистерезиса материала изделия: коэрцитивную силу H_{cs} , остаточную намагниченность M_{rs} , намагниченность M_s технического насыщения [1]. Их измерение стандартными методами не производительно. Это обуславливают применение бесконтактного намагничивания изделий в разомкнутой магнитной цепи и получения информации об их остаточной намагниченности M_d при движении изделий [2].

Но изделия имеют размагничивающий фактор N [3] и в разомкнутой магнитной цепи их материал намагничивается по частным петлям магнитного гистерезиса. Методика расчета M_d стальных изделий, намагниченных на частных петлях магнитного гистерезиса, разработана в [4, 5]. Но в результате многочисленных исследований, обобщенных в [6, 7], использованные в [4] формулы уточнены.

Цель доклада – корректировка методики расчета остаточной намагниченности M_d изделия при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи и ее использование для анализа зависимости M_d стальных изделий от режима их термической обработки.

При расчете использованы следующие экспериментально обоснованные формулы.

Для основной кривой намагничивания:

$$M_m = \chi_a \frac{H_{cs}^2 H_m}{H_m^2 + H_{cs}^2} + \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{cs}^2} \times \left[\sum_{n=0}^1 (-1)^n \arctg \frac{H_{cs} + (-1)^n H_m}{H_0} \right] \quad (1)$$

Для нисходящей ветви ветвей петли гистерезиса:

$$M = \chi_a \frac{H_{cs}^2 H}{H^2 + H_{cs}^2} \pm \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{cs}^2} \times \left[2 \arctg \frac{H_{cs} + H}{H_0} - \sum_{n=0}^1 \arctg \frac{H_{cs} + (-1)^n H_m}{H_0} \right] \quad (2)$$

где M – намагниченность материала в поле H на ветвях петли гистерезиса после намагничивания в поле H_m до намагниченности M_m ,

$$K_{II} = M_{rs} / M_s, T = \operatorname{tg}(\pi K_{II} / 2), \tau = 1 \text{ м/кА},$$

$$H_0 = \frac{H_{cs}}{T}, k_0 = \frac{M_s}{\pi} \frac{\arctg(2H_{cs}/H_0)}{M_C - \chi_a H_{cs}/2} - 1,$$

$$\chi_a \approx \frac{[0,5 + 0,06\pi H_{cs} - (0,068\pi H_{cs})^2] M_{rs}}{(2,9 + 35e^{-1,75\pi H_{cs}}) H_{cs}} - 1,$$

$$M_C \approx 0,67 [0,5 + 0,06\pi H_{cs} - (0,068\pi H_{cs})^2] M_{rs}.$$

На первом этапе расчета, решая совместно уравнение (1) и уравнение $H_m = H_e - NM_m$, находили M_m и H_m в изделии при намагничивании во внешнем поле H_e .

На втором этапе расчета, полагая в (2) $M=M_d$ и решая совместно уравнение (2) и уравнение $H=-NM_d$, находили M_d изделия после намагничивания во внешнем поле H_c .

В качестве примера реализации разработанной методики на рисунке приведены рассчитанные по ней зависимости M_d шпилек диаметром 10 мм, длиной 100 мм ($N \approx 0,015$ [3]) из стали 40X от температуры T_0 их отпуска после закалки. При расчете использованы результаты [8] измерения H_{cs} , M_{rs} и M_s стали 40X после отпуска при разных температурах T_0 , приведенные в таблице.

Таблица – Магнитные свойства стали 40X, отпущенной при разных температурах T_0 после закалки от 860°C по данным [8, табл.26.2]

T_0 , °C	H_{cs} , А/м	M_{rs} , кА/м	M_s , кА/м
150	2960	840	1575
200	2650	875	1585
250	1780	907	1644
300	1490	883	1642
350	1440	852	1651
400	1320	915	1650
450	1220	1050	1648
500	1150	1186	1643
550	1200	1214	1638
600	1160	1186	1630
650	1050	1178	1607
700	950	1178	1602

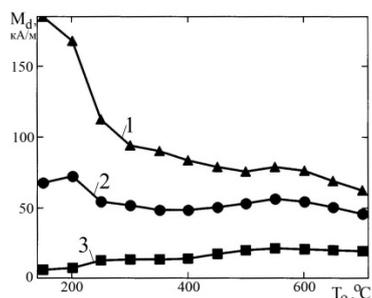


Рисунок – Зависимость остаточной намагниченности M_d шпилек и из стали 40X от температуры T_0 их отпуска при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи в поле H_c напряженностью 30 кА/м (1), 10 кА/м (2) и 3 кА/м (3). Расчет по разработанной методике

Результаты, представленные на рисунке показывают, что характер зависимости $M_d(T_0)$ шпилек и из стали 40X качественно зависит от напряженности H_c намагничивающего поля (по мере его снижения зависимость меняется с обратной на прямую). Но ни при какой из проанализированных H_c не удастся обеспечить монотонное изменение зависимости $M_d(T_0)$ во всем диапазоне изменения T_0 . Следовательно, для контроля качества отпуска шпилек и из стали 40X, движущихся в процессе контроля, следует

применять более сложные режимы намагничивания, например, описанные в [9], и реализующие их приборы.

Таким образом, разработанная методика позволяет анализировать влияние технологических факторов на остаточную намагниченность стальных изделий в разных условиях намагничивания, не прибегая к трудоемким экспериментальным исследованиям.

Литература:

1. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн.1. В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. – 848 с.
2. Сандомирский, С.Г. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (Обзор) / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия, 1996. – № 7. – С. 24–46.
3. Сандомирский, С.Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел. / С.Г. Сандомирский – Минск: Беларуская навука, 2015. – 244 с.
4. Сандомирский, С.Г. Остаточная намагниченность ферромагнитного тела, намагниченного в разомкнутой магнитной цепи / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1997. – № 8. – С. 50–59.
5. Сандомирский, С.Г. Изменение чувствительности магнитного метода контроля физико-механических свойств сталей при намагничивании изделий в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможностей метода) / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия, 1998. – № 7. – С. 72–81.
6. Сандомирский, С.Г. Расчет изменения намагниченности на частных петлях гистерезиса сталей по основным магнитным параметрам предельной петли гистерезиса / С.Г. Сандомирский // Электричество. – 2016. – № 12. – С. 39–43.
7. Клюев, В.В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В.В. Клюев, С.Г. Сандомирский – М.: Издательский дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.
8. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
9. Сандомирский, С.Г. Совершенствование методики магнитного контроля изделий массового производства из среднеуглеродистых легированных сталей / С.Г. Сандомирский // Приборостроение–2015: материалы 8-й междунар. научно-технич. конф., в 2 томах, Минск, 25–27 ноября 2015 / Мн.: БНТУ. – Т. 2. – С. 131–133.