

В ходе работы измерительный сигнал, поступающий от подшипника к схеме обработки, представляет собой две последовательности импульсов. Одна последовательность соответствует скорости вращения вращающегося (обычно внутреннего) кольца и, следовательно, ротора, который на этих подшипниках установлен. В установленном режиме вращения эта последовательность имеет постоянную частоту следования. Вторая последовательность соответствует скорости вращения сепаратора и отличается от первой частотой следования, которая при одинаковом количестве магнитных меток связана с частотой вращения внутреннего кольца соотношением:

$$\omega_c = \frac{\omega_{вн}}{2} \left( 1 - \frac{D_w}{d_m} \cos \alpha \right),$$

где  $D_w$  – диаметр шариков;  $d_m$  – диаметр по центрам шариков;  $\alpha$  – угол контакта.

Кроме того, импульсы этой последовательности имеют фазовый сдвиг, вызванный отклонениями размера и формы шариков и дорожек качения, появляющимися в результате износа. Такой сигнал можно рассматривать как последовательность и частотно-импульсной или фазово-импульсной модуляцией, что, по сути, одно и то же. Следовательно, выделение информации о степени износа подшипника может быть осуществлено в результате демодуляции такого сигнала. Первая последовательность импульсов может использоваться в качестве опорного сигнала.

Структура возможной схемы обработки измерительного сигнала показана на рис. 3 [3].

Обе последовательности импульсов проходят через амплитудные ограничители 1 и 2 для устранения амплитудной модуляции, после чего поступают на входы демодулятора 3. Сигнал на выходе демодулятора имеет вид АМ-сигнала, глубина модуляции которого пропорциональна степени износа элементов подшипника. Далее сигнал может быть обработан различными способами,

например с использованием порогового устройства 4, порог срабатывания которого настраивается в соответствии с заданными требованиями к точности вращения системы и состоянию подшипника. К выходу порогового устройства подключается блок сигнализации 5.

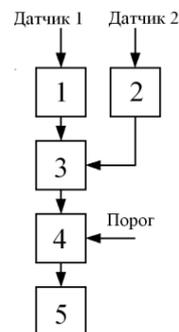


Рисунок 3 – Схема обработки сигнала

Предложенная конструкция шпиндельного узла позволит повысить долговечность его использования и тем самым снизить затраты на ремонт. Виброрезонансные приводы также могут встраиваться не в сепаратор, а в корпус шпиндельного узла, что позволяет управлять кинематикой тел качения в обычных подшипниках.

#### Литература

1. Савченко А.Л. Восстановление точностных параметров радиально-упорных шарикоподшипников методом обкатки с использованием ультразвука. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Мн.: БНТУ, 2007. – 22с.
2. Савченко, А.Л. Средства диагностики и управления кинематикой, интегрированные в подшипник качения / А.Л. Савченко, В.Т. Минченя, Н.Т. Минченя, Р.М. Асимов. – Приборы и методы измерений, №1(4), 2012. С. 99 – 103.
3. Савченко, А.Л. Обработка измерительного сигнала в мехатронном подшипнике со встроенными средствами диагностики. / А.Л. Савченко, В.Т. Минченя, Н.Т. Минченя. – Приборостроение-2015 / Материалы 8-й междунар. научн.-техн. конф., Минск, 25 – 27 ноября 2015 г. – Мн.: БНТУ, 2015. – Ч.2. – С.129 – 130.

УДК 620.179.14; 538.2

### АНАЛИЗ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ СТРУКТУРОСКОПИИ СТАЛЕЙ

Сандомирский С.Г.

Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь

Основными магнитными параметрами, чувствительными к структуре сталей, являются коэрцитивная сила  $H_c$  и остаточная намагниченность  $M_r$  (рис. 1). К фазовому составу стали чувствительна намагниченность  $M_s$  технического насыщения (рис.1). Относительная погрешность  $\delta_{Hc}$

измерения  $H_c$  по стандартной методике не превышает 2 %.  $M_r$  и  $M_s$  могут быть измерены с относительными погрешностями  $\delta_{M_r} \approx \delta_{M_s} \approx 3$  %, а отношение  $K_{П} = M_r/M_s$  при измерении  $M_r$  и  $M_s$  на одной и той же аппаратуре – с относительной погрешностью  $\delta_{КП} = 1$  %. Это явилось основой магнитной

структуроскопии – определения структуры, фазового состава и оценки физико-механических свойств материала изделия по его магнитным параметрам [1].

Но механические свойства и твердость сталей с содержанием углерода более 0,3% однозначно изменяются с увеличением температуры  $T_0$  их отпуска после закалки [1, 2]. А  $H_c$  в области изменения  $T_0$  от 400°C – 600°C – неоднозначно. Большинство изделий из таких сталей для получения заданных механических свойств подвергается отпуску в этом интервале температур. Разработка достоверного метода контроля качества термической обработки, твердости и механических свойств изделий из таких сталей стала главной задачей магнитного структурного анализа.

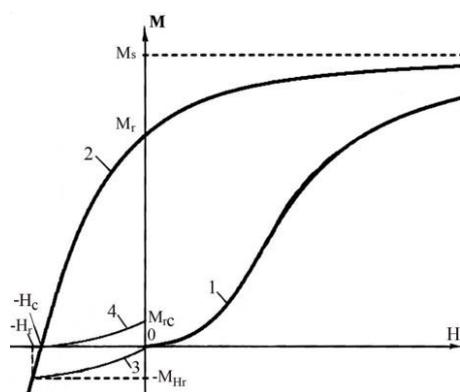


Рисунок 1 – Участки основной кривой намагничивания (1), нисходящей ветви предельной петли магнитного гистерезиса (2) стали и кривые возврата после ее перемагничивания полями  $-H_r$  (3) и  $-H_c$  (4)

Для ее решения было предложено использовать магнитные параметры материала, связанные с его релаксационной коэрцитивной силой  $H_r$  (рис. 1): релаксационную намагниченность  $M_{Hr}$ , намагниченность  $M_{rc}$  «коэрцитивного возврата» и релаксационную магнитную восприимчивость  $\chi_r = M_{Hr}/H_r$  [2]. Во многих случаях их чувствительность к изменениям структуры сталей высока и отлична от чувствительностей  $H_c$  и  $M_r$  к этим изменениям. Но достоверность определения  $M_{Hr}$ ,  $M_{rc}$  и  $\chi_r$  разрабатываемыми приборами не подтверждена метрологической аттестацией. В [3] показано, что при стандартных требованиях к измерительной аппаратуре относительная погрешность  $\delta_{M_{rc}}$  измерения параметра  $M_{rc}$  (который может быть измерен точнее, чем  $M_{Hr}$ ) может превышать 80%. Такая погрешность не удовлетворяет потребностям практики.

В [4] показано, что все изменения магнитных параметров сталей, связанные с изменениями их структурного состояния и фазового состава, обусловлены только происходящими при этом изме-

нениями  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  предельной петли магнитного гистерезиса этих сталей. Исходя из этого, для повышения достоверности магнитной структуроскопии, предложено формировать ее информационные параметры алгебраическими комбинациями  $H_c$ ,  $M_r$  и  $K_H$  [4]. Но математические операции, преобразующие результаты измерения физических величин, вносят дополнительные погрешности в результат их определения [5].

Цель доклада – рассчитать и проанализировать относительные погрешности магнитных параметров, сформированных из параметров предельной петли гистерезиса сталей, с учетом погрешности измерения их составляющих и погрешностей, вносимых математическими операциями расчета.

В рамках разработанного подхода предложено создать из  $H_c$ ,  $M_r$  и  $K_H$  сталей следующие информационные параметры [4]:

$$H_0 = H_c / \text{tg}(0,5\pi K_H) \quad (1)$$

$$H_{c1} = H_c (1 - K_H)^2 \quad (2)$$

$$F_1 = M_r / H_c \quad (3)$$

$$F_2 = M_r (1 - K_H) \quad (4)$$

Параметры (1) – (4) обладают высокой чувствительностью к изменениям структуры, происходящих в сталях при их термических обработках в практически важном интервале температур, простотой и точностью измерения [4]. Преимущество разработанного подхода по сравнению с измерением релаксационных магнитных параметров сталей в том, что  $H_c$ ,  $M_r$  и  $K_H$  по стандартным методикам можно измерить с минимальными по сравнению с другими магнитными параметрами сталей относительными погрешностями измерения.

Для расчета относительных погрешностей параметров  $H_0$ ,  $H_{c1}$ ,  $F_1$  и  $F_2$  использованы [6] формулы для расчета относительных погрешностей измерения, вносимых алгебраическими операциями [5]:

Таблица – Абсолютные и относительные погрешности измерения некоторых алгебраических функций

Вид функции	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$A = a + b$	$\Delta A = \Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta a + \Delta b}{a + b}$
$A = a - b$	$\Delta A = \Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta a + \Delta b}{a - b}$
$A = ab$	$\Delta A = a\Delta b + b\Delta a$	$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
$A = a^n$	$\Delta A = na^{n-1}\Delta a$	$\Delta A/A = n\Delta a/a$
$A = a/b$	$\Delta A = \frac{b\Delta a + a\Delta b}{b^2}$	$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta a}{a} - \frac{\Delta b}{b}$
$A = \text{tg}\alpha$	$\Delta A = \Delta\alpha/\cos^2\alpha$	$\Delta A/A = 2\Delta\alpha/\sin 2\alpha$

Проведя преобразования формул (1)–(4) с использованием формул из таблицы, получим следующие аналитические выражения для расчета относительных погрешностей  $\delta_{H_0}$ ,  $\delta_{H_{c1}}$ ,  $\delta_{F_1}$  и  $\delta_{F_2}$  определения соответственно параметров  $H_0$ ,  $H_{c1}$ ,  $F_1$  и  $F_2$ :

$$\delta_{H_0} = \delta_{H_c} + \pi K_{II} \delta_{K_{II}} / \sin(\pi K_{II}), \quad (5)$$

$$\delta_{H_{c1}} = \delta_{H_c} + K_{II} \delta_{K_{II}} / (1 - K_{II}), \quad (6)$$

$$\delta_{F_1} = \delta_{H_c} + \delta_{M_r}, \quad (7)$$

$$\delta_{F_2} = \delta_{M_r} + K_{II} \delta_{K_{II}} / (1 - K_{II}). \quad (8)$$

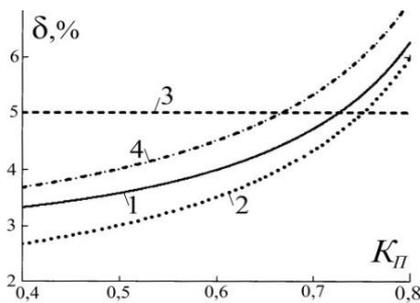


Рисунок 2 – Зависимость относительной погрешности  $\delta$  расчета параметров  $H_0$  (1),  $H_{c1}$  (2),  $F_1$  (3),  $F_2$  (4) от коэффициента  $K_S = M_r/M_s$  в практически возможном для сталей диапазоне его изменения

У современных конструкционных сталей  $K_{II}$  изменяется в диапазоне  $0,4 \leq K_S \leq 0,8$ . На рис.2 приведены зависимости относительных погрешностей  $\delta_{H_0}$ ,  $\delta_{H_{c1}}$ ,  $\delta_{F_1}$  и  $\delta_{F_2}$  расчета параметров  $H_0$ ,  $H_{c1}$ ,  $F_1$ ,  $F_2$  от  $K_{II}$ . Анализ представленных на рис.2 результатов показал, что в возможном для сталей диапазоне изменения коэффициента  $K_{II}$  относи-

тельные погрешности  $\delta_{H_0}$ ,  $\delta_{H_{c1}}$ ,  $\delta_{F_1}$  и  $\delta_{F_2}$  определения параметров  $H_0$ ,  $H_{c1}$ ,  $F_1$  и  $F_2$  изменяются от 2,7 ÷ 5% при  $K_{II} = 0,4$  до 5 ÷ 7% при  $K_{II} = 0,8$ .

Это в 2,34 ÷ 16,2 раз меньше относительной погрешности  $\delta_{M_{rc}}$  измерения релаксационного магнитного параметра  $M_{rc}$  [3]. Не высокая относительная погрешность определения анализируемых параметров  $H_0$ ,  $H_{c1}$ ,  $F_1$  и  $F_2$  является физической предпосылкой их эффективного использования для магнитной структуроскопии сталей взамен релаксационных магнитных параметров.

#### 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. Мужижкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. – 848 с.
2. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
3. Сандомирский, С.Г. Анализ методической погрешности измерения намагниченности сталей в процессе коэрцитивного возврата / С.Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2013. – № 2. – С. 57–60.
4. Сандомирский, С.Г. Новый подход к формированию информационных параметров в магнитной структуроскопии (обзор) / С.Г. Сандомирский // В мире неразрушающего контроля. – 2019. – Т. 22. – № 2. – С. 46–51.
5. Мастяева, И.Н. Численные методы: Учебное пособие / И.Н. Мастяева, О.Н. Семенихина – М.: Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2004. – 103 с.
6. Сандомирский, С.Г. Применение информационных магнитных параметров для неразрушающего контроля твердости среднеуглеродистых легированных сталей / С.Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2019. – № 8. – С. 53–57.

УДК 681.2.084

### ЛАБОРАТОРНОЕ УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ИНЪЕКЦИОННОЙ ИГЛЫ С ГОЛОВКОЙ

Киселёв М.Г., Габец В.Л., Соболев Д.Е., Пищалова Д.И.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Инъекционная игла (рис. 1) – полая узкая металлическая трубка, изготовленная из нержавеющей стали 12X18Н10Т, наружным диаметром  $D$  и длиной  $L$ .

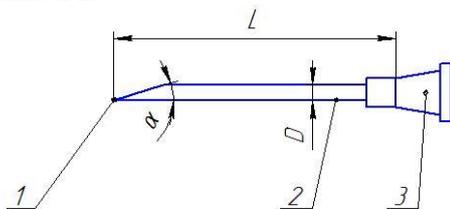


Рисунок 1 – Основные элементы инъекционной иглы и её геометрические параметры:  
1 – острый кончик; 2 – трубка иглы; 3 – головка иглы

Один конец трубки косо срезан под углом  $\alpha$  и заострён для лучшего проникновения в ткани, а другой заканчивается головкой (канюлей) для присоединения к шприцу или эластичной трубке. Инъекционные иглы применяются для проведения инъекций различных типов (внутримышечных, подкожных, внутривенных), для забора и переливания крови.

Основные размеры, технические требования и методы испытаний стерильных инъекционных игл однократного применения установлена ГОСТ 25046 – 81. Одним из важных эксплуатационных показателей инъекционной иглы является прочность соединения трубки с головкой. Проверку