

УДК 621.9.08

В.В. Плешаков, А.Н. Шурпо, Е.А. Егорушкин

## МАГНИТОШУМОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДЕТАЛЕЙ

Предложена методика оценки эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей на основе анализа амплитудных и частотных характеристик магнитошумового сигнала (скачков Баркгаузена). Показана возможность выбора оптимальных режимов контроля остаточных напряжений.

Ключевые слова: магнитошумовой контроль, скачки Баркгаузена, остаточные напряжения, поверхностный слой.

При циклическом перемагничивании ферромагнетиков выходной сигнал индуктивного преобразователя представляет собой случайный нестационарный процесс в виде последовательности импульсов ЭДС - скачков Баркгаузена (СБ), числовые характеристики которого неоднородны по петле гистерезиса, зависят от режима перемагничивания и факторов, определяющих магнитную текстуру ферромагнетиков [1-7]. Усреднение вероятных характеристик ЭДС СБ по периоду нестационарности неизбежно приводит к потере информации о динамике перестройки доменной структуры ферромагнетика, так как совершенно случайные различные процессы могут иметь одинаковые усреднённые характеристики. Поэтому использование для контроля текущих характеристик ЭДС СБ, отражающих интенсивность флуктуационных процессов перестройки доменной структуры ферромагнетиков в каждой точке петли гистерезиса, позволяет точнее определить свойства изделий.

Из текущих информативных примеров преобразователя СБ перспективным представляется использование частотных характеристик ЭДС СБ, таких как текущее число выбросов ЭДС СБ за определённый уровень селекции информационного канала [1]. Этот информативный параметр отражает не только интенсивность процесса, но и его частотные свойства.

Устройство для исследования текущего числа выбросов ЭДС СБ наряду с обычными блоками измерительного канала содержит ограничитель, порог срабатывания которого задает уровень селекции последовательности импульсов ЭДС СБ (рис. 1).

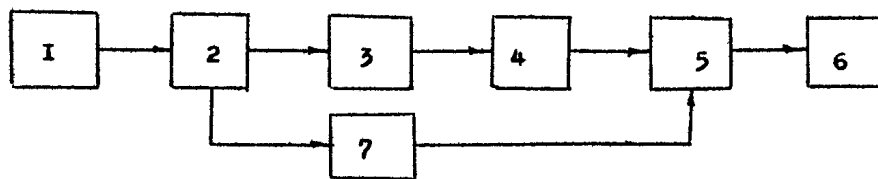


Рис. 1. Блок-схема устройства для исследования текущего числа выбросов ЭДС СБ

СБ возбуждаются в изделии током блока перемагничивания 1, преобразуются в электрический сигнал индуктивным преобразователем 2, усиливаются усилителем 3 и поступают на ограничитель 4.

Строб-импульс блока 7, появляющийся при заданном значении поля в каждый полупериод перемагничивания  $T/2$ , открывает ключ 5. Счетчиком 6 регулируется число выбросов ЭДС СБ за уровень ограничителя. Изменяя положение строб-импульса по петле гистерезиса, регистрируют огибающую текущей частоты выбросов ЭДС СБ. На вход ог-

раничителя поступает центрированный случайный процесс  $e_{сб}$  в виде последовательности импульсов ЭДС СБ (рис. 2а).

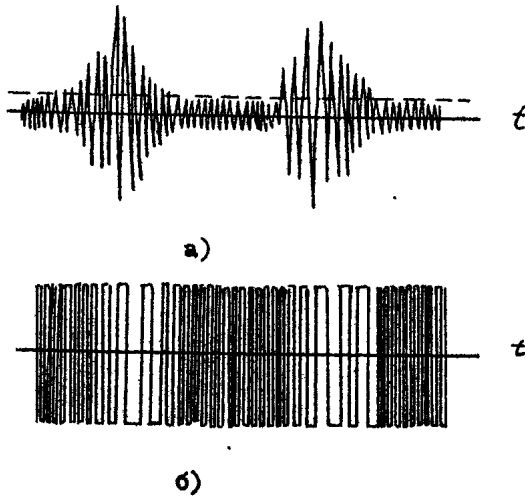


Рис. 2. Амплитудные (а) и спектральные (б) параметры магнитозумового сигнала

импульсов ЭДС СБ (рис. 2а).

На выходе ограничителя наблюдается последовательность прямоугольных импульсов  $\eta(t)$  (рис. 2б), частотные характеристики которых определяются числом положительных выбросов ЭДС СБ за уровень ограничителя  $S$  и практически не зависят от мощности процесса. Последнее позволяет при расчете числа положительных импульсов ЭДС СБ  $e(t)$  пользоваться простой моделью ЭДС СБ в виде неоднородного пуассоновского потока импульсов:

$$e(t) = \sum_i v_i \cdot F(t - t_i), \quad (1)$$

где  $F(t)$  - форма среднестатистического

импульса ЭДС СБ, появляющегося в момент времени  $t_i$ ;  $v_i$  - число импульсов в малом промежутке  $\Delta t_i$ .

Предполагается, что форма импульсов и их амплитуда постоянны, а вероятность  $p(t_1; t_2)$  появления  $K$  импульсов в интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$  подчиняется закону Пуассона:

$$p(t_1; t_2) = \frac{\left[ \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \right]^k}{k!} e^{-\int_{t_1}^{t_2} v(t) dt},$$

где  $v(t)$  - интенсивность потока импульсов, определяющая нестационарность ЭДС СБ по петле гистерезиса.

Реально предположить, что на протяжении длительности одного импульса ЭДС СБ изменение  $v(t)$  незначительно, т.е. имеет место квазистационарное изменение характеристик процесса (1). В этом случае математическое ожидание  $m(t)$ , дисперсия  $\sigma^2(t)$ , корреляционная  $\psi(t, \tau)$  и ковариационная  $k(t, \tau)$  функции процесса определяются, согласно [2], как

$$\begin{aligned} m(t) &= v(t) \int_{-\infty}^{\infty} F(\theta) d\theta; \\ \sigma^2(t) &= v(t) \int_{-\infty}^{\infty} F^2(\theta) d\theta; \\ \psi(t, \tau) &= v(t) \int_{-\infty}^{\infty} F(\theta) F(\theta + \tau) d\theta; \\ k(t, \tau) &= \psi(t, \tau) + m(t)m(t + \tau), \end{aligned}$$

где  $\theta = t - t_i$ .

Используя аппроксимацию формы среднестатистического импульса ЭДС СБ в виде суммы двух экспоненциальных функций [3]

$$F(t) = e^{-\alpha t} - e^{-\beta t},$$

где  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  ( $\beta > \alpha$ ) являются коэффициентами аппроксимации, зависящими от свойств ферромагнетика, определим

$$m(t) = \frac{\beta - \alpha}{\alpha\beta} v(t); \quad (2)$$

$$\sigma^2(t) = \frac{(\alpha - \beta)^2}{2\alpha\beta(\alpha + \beta)} v(t); \quad (3)$$

$$k(t, \tau) = \left[ \frac{\beta - \alpha}{2\alpha(\alpha + \beta)} e^{-\alpha\tau} + \frac{\alpha - \beta}{2\beta(\alpha + \beta)} e^{-\beta\tau} \right] v(t) + \frac{\beta(\beta - \alpha)e^{-\alpha\tau} + \alpha(\alpha - \beta)e^{-\beta\tau}}{\alpha^2\beta^2} v^2(t). \quad (4)$$

Для вычисления текущего числа выбросов  $N(C, t)$  процесса  $e(t)$  за уровень селекции  $C$  воспользуемся выражением из работы [4]:

$$N(C, t) = \frac{\sigma_1 \sqrt{1 - R_1^2}}{2\pi\sigma} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{C - m(t)}{\sigma(t)} \right)^2 \right] \left\{ \exp \left( -\frac{1}{2} M^2 \right) + \sqrt{2\pi} M \Phi(M) \right\}, \quad (5)$$

где

$$\sigma_1^2(t) = -\frac{\partial^2 k(t, \tau)}{\partial \tau^2} / \tau = 0;$$

$$R_1(t) = \frac{1}{\sigma(t)\sigma_1(t)} \frac{\partial k(t, \tau)}{\partial \tau} / \tau = 0;$$

$$M(t) = \frac{1}{\sqrt{1 - R_1^2(t)}} \left[ \frac{m(t)}{\sigma_1(t)} + \frac{C - m(t)}{\sigma(t)} R_1(t) \right];$$

$$m_1(t) = \frac{dm(t)}{dt};$$

$\Phi(Z)$  - интеграл вероятности.

Анализ показывает, что для квазистационарного процесса  $M(t) = 0$  [5]. Используя выражения (2-4), вычислим  $\sigma_1^2(t)$  и  $R_1(t)$ , после подстановки которых в (5) запишем выражение для текущего числа выбросов ЭДС СБ в виде

$$N(C^*, t) = \frac{\sqrt{\alpha\beta + 2(\alpha + \beta)v(t)}}{2\pi} \exp \left\{ -\frac{\alpha + \beta}{\alpha\beta} \frac{[C^* - v(t)]^2}{v(t)} \right\}, \quad (6)$$

где  $C^* = \frac{\alpha\beta}{\beta - \alpha} C$ .

Текущая частота выбросов ЭДС СБ определяется уровнем селекции  $C$ , формой импульсов ЭДС СБ и неоднородностью интенсивности потока импульсов  $v(t)$  по петле гистерезиса.  $C$  достаточной для практических исследований точностью функция  $v(t)$  может быть определена в виде

$$v(t) = \frac{N_0}{\pi} \frac{h}{h^2 + b^2(t - t_0)^2},$$

где  $N_0$  - полное число СБ за полуцикл перемагничивания;  $b = \frac{dH}{dt}$  - значение градиента поля перемагничивания;  $h$  - параметр, зависящий от магнитной текстуры ферромагнетика и определяемый экспериментально;  $t_0$  - момент времени, соответствующий напряженности поля перемагничивания, равной и коэрцитивной силе ферромагнетика  $H_0$ . В области

$H_c$  интенсивность СБ  $v(t)$  максимальна, с увеличением скорости перемагничивания уменьшается и зависит от структурных свойств ферромагнетика.

По формуле (6) были проведены расчеты числа выбросов ЭДС СБ. Анализ выражения (6) показывает, что характер распределения числа выбросов ЭДС СБ по полю перемагничивания (рис. 3) определяется уровнем селекции  $C$ . Ось абсцисс проградуирована в относительных единицах  $\gamma = \frac{T - T/2}{T/2}$ . При  $C=2,0$  В и  $C=1,3$  В кривые имеют максимум в области  $H_c$ , причем число выбросов ЭДС СБ для  $C=2,0$  В значительно меньше, чем для  $C=1,3$  В, вследствие того, что часть импульсов ЭДС СБ у основания перекрываются (тем больше, чем выше интенсивность  $v(t)$  процесса). Это приводит к снижению числа выбросов в области, близкой  $H_c$ , а в областях, значительно отличных от  $H_c$ , число импульсов ЭДС СБ, пересекающих уровень  $C$ , возрастает. Огибающая числа выбросов за уровень  $C=0$  при  $H_c$  имеет минимум. С повышением скорости перемагничивания увеличивается число выбросов ЭДС СБ, так как возникает интенсивность  $v(t)$  следования СБ и увеличивается число перекрывающихся импульсов.

Теоретические исследования сопоставлялись с экспериментальными зависимостями числа выбросов от уровня селекции на образцах из стали 30ХГСН2А размером 60x10x0,18 мм. Блок-схема экспериментальной установки изображена на рис.1. Образцы перемагничивались линейно изменяющимся током частотой 1 Гц и амплитудой 0,3 А.

На рис. 4 изображены экспериментальные кривые огибающих текущего числа выбросов ЭДС СБ за различные уровни  $C$ . Форма кривых для  $C=0,3$  В и  $C=1,3$  В качественно совпадает с соответствующими расчетными зависимостями (рис. 3). Более высокое положение кривой для  $C=0$  объясняется тем, что в расчетной модели процесса (1) не учтено влияние собственных шумов измерительного канала устройства.

Для исследования влияния на число выбросов ЭДС СБ изменения свойств ферромагнетиков экспериментальные образцы подвергались поверхностному пластическому деформированию путем их упрочнения дробеструйной обработкой. Изменялись параметры режима дробеструйной обработки:  $P$  - давление воздуха и  $\tau_y$  - продолжительность упрочнения.

Огибающие текущего числа выбросов ЭДС СБ для различных значений давления воздуха в пистолете  $P$  (время упрочнения  $\tau_y = 1,5$  мин) приведены на рис. 5.

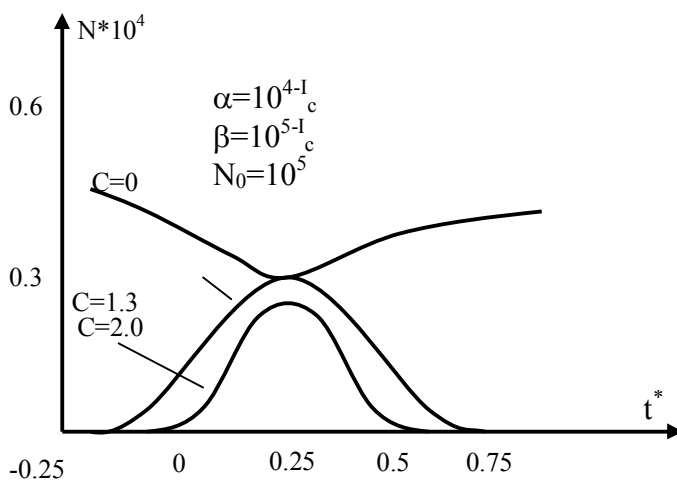


Рис. 3. Характер распределения числа выбросов ЭДС СБ по полю перемагничивания

С повышением степени пластической деформации (увеличение  $\tau_y$  или  $P$ ) возрастает общее количество выбросов ЭДС СБ за уровень  $C=0,3$  В, превышающий уровень собственных шумов измерительного канала (рис. 5б).

Это связано с изменением кристаллической структуры ферромагнетика путем измельчения и перемещения кристаллических зерен, а также с массовым развитием дислокаций. Образование локальных полей внутренних напряжений вызывает

дробление исходной магнитной текстуры ферромагнетика и оказывает влияние на динамику СБ. При этом количество  $N_0$ , интенсивность  $v(t)$  СБ повышаются, а форма импульсов ЭДС СБ изменяется.

Возрастание  $N_0$  и  $v(t)$  приводит к увеличению количества перекрывающихся импульсов и уменьшению числа выбросов ЭДС СБ за уровень  $C=0$ , не превышающий уровень собственных шумов измерительного канала (рис. 5а). Зависимости на рис. 5 могут быть использованы для контроля физико-механических свойств изделий по общепринятой методике выбора информативных параметров огибающих характеристик последовательности импульсов ЭДС СБ.

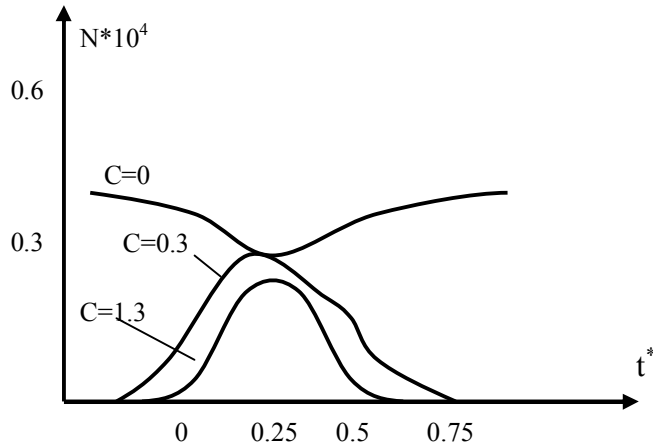


Рис. 4. Экспериментальные кривые огибающих текущего числа выбросов ЭДС СБ за различные уровни  $C$

Разработан прибор, позволяющий изменять в широких пределах частоту и амплитуду тока перемагничивания, что в сочетании с регулируемым уровнем селекции магнитшумового сигнала дает новые возможности контроля параметров качества поверхностного слоя

деталей. Основные технические характеристики прибора для измерения магнитшумовых параметров: максимальная амплитуда тока перемагничивания - 1 А; частота перемагничивания - 0,2 ... 100 Гц; полоса пропускания усилителя на уровне 0,7...300 кГц; коэффициент усиления - 80 дБ; приведенный к входу уровень шумов усилителя - не более 2 мкВ; приведенная относительная погрешность измерения - не более 3%; время измерения на этапе исследования - 20 с; время измерения на этапе контроля - 3 с; потребляемая мощность - не более 40 ВА.

Основными технологическими факторами процесса магнитшумового контроля являются ток перемагничивания  $I$ , А; частота тока перемагничивания  $f$ , Гц; уровень селекции  $C$ , В; положение строба полупериода перемагничивания  $s$ ; коэффициент усиления сигнала  $K_u$ , дБ. Целевой функцией оптимизационной задачи выбора режимов контроля является показатель связи между параметрами распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей и параметрами магнитного шума. Таким показателем может быть коэффициент их парной корреляции.

Основные параметры распределения остаточных напряжений первого рода в поверхностном слое после поверхностного пластического деформирования деталей: значение остаточных напряжений у поверхности детали  $\sigma_n$ , Па; максимальные остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое  $\sigma_{max}$ , Па; координата толщины поверхностного слоя на эпюре, соответствующая  $\sigma_{max}$ ,  $h_{max}$ , мм; толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями  $H$ , мм.

На основании экспериментальных данных построены зависимости коэффициентов парной корреляции параметров эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из высокопрочной стали 30ХГСН2А с амплитудными и частотными параметрами ЭДС магнитного шума от технологических факторов контроля. На основании анализа полученных результатов выбирались режимы контроля, обеспечивающие наибольшее значение коэффициента парной корреляции и достаточно высокую точность контроля.

Разработана методика оптимизации режимов контроля остаточных напряжений в поверхностном слое после ППД. Установлено, что параметры ЭДС наиболее сильно кор-

релируют с поверхностными остаточными напряжениями и максимальными остаточными напряжениями. Значительно меньшая корреляция наблюдается с толщиной упрочненного слоя. В последнем случае значение коэффициента не превышает 0,3. Наибольшая корреляция обеспечивается при изменении текущих значений частотных и амплитудных параметров ЭДС магнитного шума в диапазоне  $s = 0,5 \dots 0,75$ . Коэффициент парной корреляции в этом случае достигает значений  $0,8 \dots 0,85$ , что соответствует высокой их статистической связи. Указанный диапазон целесообразно использовать для изменения магнитошумовых параметров при контроле остаточных напряжений в поверхностном слое высокопрочной стали. Наиболее сильно остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое ( $\sigma_n$ ,  $\sigma_{max}$ ) коррелируют с частотными характеристиками магнитошумового сигнала при частоте перемагничивания 2 Гц. Установлено, что наиболее выгодным является уровень селекции  $C=2$ , при котором достигается наибольшая корреляция частотных характеристик с контролируруемыми технологическими параметрами слоя. Увеличение уровня селекции при изменении частотных характеристик ЭДС приводит сначала к резкому росту коэффициента парной корреляции до 0,8, а затем к некоторому его снижению из-за уменьшения уровня сигнала.

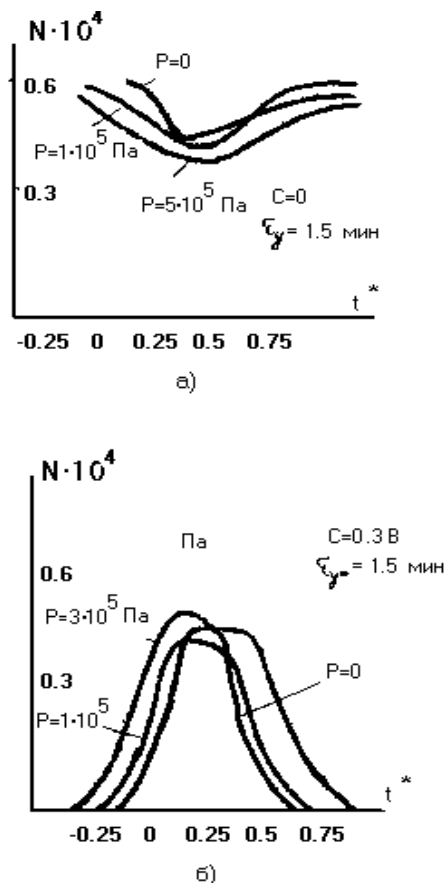


Рис. 5. Зависимость частоты МШ от давления при дробеструйной обработке

Таким образом, оптимальными режимами контроля остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из высокопрочной стали 30ХГСН2А при измерении амплитуды

магнитного шума являются сила тока перемагничивания 0,5 А, частота тока перемагничивания 0,2...0,5 Гц, положение интервала стробирования ( $T_i/T_n$ ) 0,5 ... 0,75. При изменении спектральных характеристик оптимальными режимами являются сила тока перемагничивания 0,5 А, частота тока перемагничивания 2, Гц, положение интервала стробирования ( $T_i/T_n$ ) 0,5 ... 0,75, уровень селекции 2. Коэффициент парной корреляции в этом случае достигает значений 0,85 ... 0,9.

Эпюра распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после ППД может оцениваться на основе анализа спектральных или амплитудных параметров ЭДС магнитного шума, регистрируемых при различных режимах контроля.

При увеличении пластической деформации поверхности ЭДС магнитного шума изменяется неоднозначно. Изменением стробирования и уровня селекции может быть обеспечен различный характер зависимости параметра магнитошумового сигнала и его чувствительность к изменению свойств поверхностного слоя. Максимум ЭДС при увеличении степени деформации поверхности сначала несколько снижается, а затем смещается в область меньших значений координаты строга. Поэтому изменением стробирования и уровня селекции можно добиться как прямой, так и обратной зависимости ЭДС от степени деформации поверхности.

Для оценки эффективной глубины сканирования поверхности при перемагничивании стали разработана феноменологическая модель формирования ЭДС магнитного шума. Приращение ЭДС за счет перемагничивания слоя толщиной  $dh$  на расстоянии  $h$  от поверхности детали описывается формулой

$$dU=c e^{-\lambda h}(\alpha - \frac{\beta}{\sigma})dh,$$

где  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  - постоянные, определяемые физико-механическими свойствами материала.

Численное интегрирование дифференциального уравнения проводилось с помощью ЭВМ. Параметры модели оценивались с учетом обеспечения максимального коэффициента парной корреляции ЭДС шума с остаточными напряжениями.

Показано, что при перемагничивании стали 30ХГСН2А с частотой 5Гц постоянная  $\lambda$  равна 25,3. Таким образом, вклад в ЭДС магнитного шума слоя, расположенного на расстоянии 0,04 мм от поверхности, составляет 35...38 %, а слоя, расположенного на расстоянии 0,08 от поверхности, - лишь 13...15% от общего уровня шума. Средневыпрямленная ЭДС несет основную информацию о поверхностном слое толщиной до 0,1 мм.

Изменение фильтрующих элементов позволяет регулировать полосу частот ЭДС магнитного шума в диапазоне 10...400 кГц . При этом магнитошумовой сигнал формируется в поверхностном слое от 0,04 до 0,12 мм.

На основе проведенных экспериментальных исследований получена следующая зависимость распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из высокопрочной стали 30ХГСН2А от частотных параметров магнитошумового сигнала:

$$\sigma=185,86-4,68h-0,04h^2-0,03hF_{0,45}-0,05hF_{0,85}-12,66F_{0,85}+0,12F_{0,45}F_{0,85}+0,0295F_{0,85}^2-0,0616F_{0,45} \text{ ГПа}, \quad (7)$$

где  $F_{0,45}$  и  $F_{0,85}$  – частоты магнитошумового сигнала при стробировании при  $T_i/T_n$ , равном 0,45 и 0,85 соответственно.

Модель обладает достаточно высокой информативной способностью и адекватна экспериментальным данным при 95%-м уровне доверительной вероятности. Таким образом, для оценки эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей достаточно измерить две частотные характеристики магнитошумового сигнала. Подставив эти значения в уравнение (7), можно получить аналитическое описание эпюры остаточных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плешаков, В.В. Магнитошумовой контроль технологических напряжений/ В.В. Плешаков, В.Е. Шатерников, В.В. Филинов. – М.: ИНТС, 2003. -155с.
2. Плешаков, В.В. Неразрушающий контроль технологических напряжений/ В.В. Плешаков, А.Г. Схиртладзе, Т.В. Никифорова. – М.: МГТУ «Станкин», 2002. -130с.
3. Соколик, А.А. Частотные характеристики выходных сигналов преобразователей при контроле магнитных изделий методом шумов Баркгаузена/ А.А. Соколик, В.В. Плешаков, В.В. Филинов // Физические методы и приборы контроля качества материалов и изделий: межвуз. темат. сб. - М.: МЭИ,1984. - №38. – С. 112-119.
4. Способ измерения остаточных напряжений в ферромагнитных объектах: а.с. 1114938 СССР: 01№27/83/ В.Е. Шатерников, В.В. Плешаков, А.А. Штин, А.И. Соколик. - М.: Госкомитет СССР по делам изобрет. и открытий, 1984. - 4 с.
5. Устройство для контроля изделий методом эффекта Баркгаузена: а.с. 1179204 СССР: G01N27/83 / В.Е. Шатерников, В.В. Плешаков, А.А. Соколик. - М.: Госкомитет СССР по делам изобрет. и открытий, 1985. -3 с.
6. Способ контроля степени упрочнения: а.с. 1182380 СССР G01N27/83, G01R33/12 / В.В. Плешаков, А.А. Штин, А.И. Соколик. - М.: Госкомитет СССР по делам изобрет. и открытий, 1985. - 4с.
7. Плешаков, В.В. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием/ В.В. Плешаков [и др.]; под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 1. – 480 с.

Материал поступил в редколлегию 30.09.14.