

УДК 620.179.14

## РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ШУМОВ

**В.В. Филинов<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор

**С.А. Микаева<sup>1</sup>**, доцент, д.т.н., заведующий кафедрой

**М.С. Родюков<sup>1,@</sup>**, к.т.н., доцент кафедры

**А.В. Филинова<sup>2</sup>**, к.т.н., старший научный сотрудник

<sup>1</sup>Кафедра «Электротехника и механика»,

Московский технологический университет (Институт кибернетики), Москва 119454, Россия

<sup>2</sup>Московское научно-производственное объединение «Спектр», Москва 119048, Россия

@Автор для переписки, e-mail: msrod@yandex.ru

Рассмотрены перспективы использования метода контроля напряженного состояния изделий из высокопрочных сталей, основанного на регистрации сигналов магнитных (МШ) и магнитоакустических шумов (МАШ) перемагничивания. Энергетические и эмиссионные характеристики МШ и МАШ определяются перестройкой магнитной текстуры ферромагнетика скачками Баркгаузена, соответственно, 180° и 90° доменных границ, при его циклическом перемагничивании. Поэтому МШ и МАШ несут разную информацию о физико-механических свойствах сталей, а параметры их сигналов во взаимосвязи могут использоваться для построения новых алгоритмов контроля и диагностики физико-механических свойств изделий из ферромагнитных материалов, например, напряженного состояния ответственных изделий из этих сталей. Приводятся основные результаты исследований по созданию средств магнитошумового контроля, достигнутые на кафедре «Электротехника и механика» Московского технологического университета (МГУПИ), их применения в промышленных технологиях машиностроительной, авиационной и нефтегазовой отраслей.

**Ключевые слова:** магнитные и магнитно-акустические шумы перемагничивания, эффект Баркгаузена, информационно-измерительная система для контроля механических напряжений, остаточные напряжения в сталях, неразрушающий контроль.

## MODERN ARCHITECTURE BOARD INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS OF HEAVY VEHICLES

**V.V. Filinov<sup>1</sup>**

**S.A. Mikaeva<sup>1</sup>**

**M.S. Rodyukov<sup>1,@</sup>**

**A.V. Filinova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Moscow Technological University (Institute of Cybernetics), Moscow 119454, Russia

<sup>2</sup>Moscow Research and Production Association «Spektr», Moscow 119048, Russia

@Corresponding author e-mail: msrod@yandex.ru

Prospects for using the method for controlling the stress state of products made of high-strength steels based on recording signals of magnetic (MN) and magnetoacoustic (MAN) remagnetization noise are considered. The energy and emission characteristics of MN and MAN are determined by the restructuring of the magnetic texture of the ferromagnet by Brakhausen jumps, 180° and 90° domain walls, respectively, with its cyclic reversal of magnetization. Therefore, MN and MAN carry different information about the physical and mechanical properties of steels, and the parameters of their signals in interrelation can be used to construct new algorithms for monitoring and diagnosing the physical and mechanical properties of articles made of ferromagnetic materials, for example, the stressed state of the critical products from these steels. The main results on the development of the means of magneto-noise control, achieved at the department of electrical engineering and mechanics of Moscow Technological University (MGUPI), their applications in the technologies of engineering, aviation and oil and gas industries are presented.

**Keywords:** magnetic and magnetic-acoustic noises of magnetization reversal, the Brakhausen effect, information-measuring system for controlling mechanical stresses, residual stresses in steels, non-destructive control.

Повышение технического уровня и эффективности производства в машиностроительной, авиационной и других отраслях промышленности, создание и освоение ресурсосберегающих технологий с улучшенным качеством продукции определяют устойчивый интерес к проблеме управления остаточными напряжениями (ОН), значительно влияющими на технологические и эксплуатационные свойства металлических изделий.

В этой связи одной из ключевых задач становится обеспечение неразрушающего контроля (НК) уровня напряженного состояния и на этапе разработки и исследования технологии, и в процессе производства и эксплуатации таких изделий.

Наиболее целесообразным представляется решение этой задачи за счет развития новых методов НК, таких, как метод магнитных шумов, МШ, основанный на эффекте Баркгаузена [1], разработкой и внедрением которого в производство кафедра «Электротехника и механика» Московского технологического университета (МГУПИ) занимается более 35 лет в рамках планов важнейших научно-исследовательских работ Российской академии наук, Минобрнауки РФ и отраслевых министерств.

За это время разработаны:

- теоретические основы инженерного расчета сигналов МШ, учитывающих влияние микро- и макронапряжений на формирование их энергетических и эмиссионных характеристик [2];
- принципы построения алгоритмов и средств НК, учитывающих особенности информативных параметров МШ и позволяющих повысить достоверность и чувствительность контроля микро- и макронапряжений [2–4];
- приборы и их модификации типа «ПИОН» [1–3, 5, 6], «АФС» [1–3, 6], «МIP» [3, 7], информационно-измерительные системы «СМАК» [6, 7], «МШ-1» [4, 8, 9], «МШ-3» [10, 11];

• основные принципы построения методик и средств неразрушающего контроля напряжений в металлоизделиях, успешно используемых в:

- технологии производства и в эксплуатации торсионных валов системы подресоривания гусеничных машин, работающих в условиях циклического и повторно-статического нагружения [2, 3, 6, 12];

- технологии производства подшипников ответственного назначения при оценке склонности к овализации подшипниковых колец, вызванной остаточными напряжениями [2, 6, 12];

- технологии производства артиллерийских боеприпасов при оценке технологических ОН и прогнозировании зон изделий, склонных к разрушению [1–3, 6, 11, 12];

- технологии оценки ОН и усталостных повреждений при циклическом характере нагружения узлов авиационной техники в эксплуатации и ремонте [2, 3, 5, 13];

- технологии диагностики напряженного состояния трубопроводов, оценки механических напряжений и прочностных свойств из металлов в нефтегазовой промышленности [14].

Одним из значительных достижений является разработка системного подхода к построению алгоритмов контроля ОН на основе использования метода МШ. Для диагностики и контроля напряженного состояния изделий из ферромагнитных материалов перспективно использовать не только МШ, но и магнитно-акустические шумы (МАШ) перемагничивания [2, 3, 6].

Энергетические и эмиссионные характеристики МШ и МАШ определяются перестройкой магнитной текстуры ферромагнетика скачками Баркгаузена, соответственно,  $180^\circ$  и  $90^\circ$  доменных границ, при его циклическом перемагничивании [2]. Поэтому МШ и МАШ несут разную информацию о физико-механических свойствах сталей, а параметры их сигналов во взаимосвязи могут использоваться для построения новых алгоритмов контроля и диагностики, например, напряженного состояния ответственных изделий из этих сталей.

Из энергетических характеристик сигналов МШ и МАШ обычно регистрируют значение среднеквадратического напряжения  $U_{\text{МШ}}$  или  $U_{\text{МАШ}}$  за полупериод перемагничивания  $T_{\text{п}}/2$  или за интервал стробирования длительностью  $\tau$ .

Из эмиссионных характеристик сигналов МШ и МАШ определяют количество импульсов МШ  $N_{\text{МШ}}$  или МАШ –  $N_{\text{МАШ}}$ , амплитуда которых превышает заданный порог дискриминации, за полупериод перемагничивания или за интервал стробирования  $\tau$ . Изменяя положение интервала стробирования  $\tau$  на полупериоде перемагничивания  $T_{\text{п}}/2$  (восходящей или нисходящей ветви петли гистерезиса ферромагнетика), регистрируют распределение текущих характеристик сигналов МШ и МАШ по полю перемагничивания  $H - U(H)$  и  $H - N(H)$  [2]. Анализ последних позволяет перейти к построению алгоритмов и методик контроля с большей чувствительностью к контролируемому параметру. Это требует разработки новых технических и программных решений для обработки сигналов МШ и МАШ.

На рис. 1 приведена блок-схема системы «МIP» для контроля методом МШ. Преобразователи и аналоговая часть системы выполнена аналогично приборам типа «АФС», «ПИОН» [2, 5] (рис. 2, 3). Плата АЦП содержит АЦП, генератор тактовых импульсов, устройство управления, буферную память, шинный формирователь.

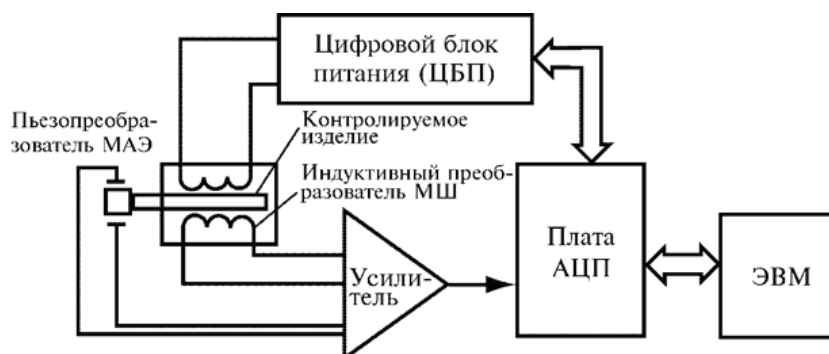


Рис. 1. Блок-схема системы «МІР» для регистрации магнитных и магнитоакустических шумов перемагничивания.

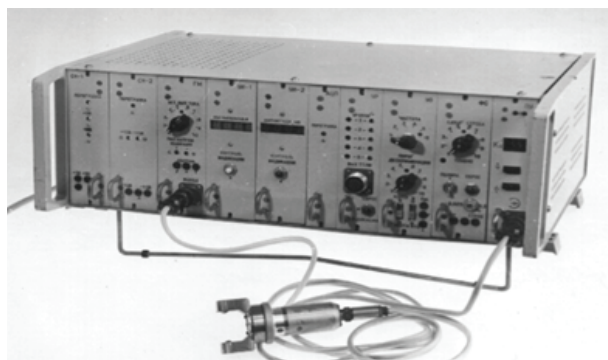


Рис. 2. Внешний вид прибора АФС-Р.



Рис. 3. Общий вид прибора ПИОН-01.

Она выполняет следующие функции:

- преобразует аналоговый сигнал в цифровой код;
- заносит преобразованный сигнал в буферную память;
- переписывает запомненную информацию из буферной памяти в оперативную память ЭВМ.

АЦП связан с ЭВМ, выполненной, например, на базе IBM PC, через шинный формирователь и устройство управления.

Высокое быстродействие в сочетании с большим объемом собственной памяти платы АЦП позволяет системе не только запоминать случайные сигналы МШ и МАШ с выводом их на дисплей, но и проводить их статическую обработку согласно разработанным методам корреляционного и регрессионного анализа программными средствами [2].

Работает устройство следующим образом. Контролируемое изделие перемагничивается линейно изменяющимся током (полем) ЦБП, сигналы МШ индуктивного преобразователя и сигналы МАШ пьезопреобразователя усиливаются, фильтруются [2, 5] и поступают на плату АЦП, работа которой управляется программой ЭВМ. Последняя выдает команду устройству управления на установку АЦП в исходное состояние и на заполнение буферной памяти. После этого ЭВМ переходит либо в режим ожидания, либо может выполнять какую-либо другую программу.

По заполнению буферной памяти устройство управления вырабатывает сигналы требования прерывания. Приняв его, процессор ЭВМ завершает выполнение текущей

команды, приостанавливает выполнение попутной программы и разрешает (подтверждает) прерывание. В ответ на это устройство управления выдает адрес вектора прерывания, и процессор начинает выполнять программу обслуживания прерывания, которая в рассматриваемом случае может заключаться в том, что процессор поочередно пересылает содержимое из ячеек буферной памяти платы АЦП в ячейки ОЗУ ЭВМ. После пересылки содержимого всего буфера программа обслуживания прерывания завершается, и далее весь процесс при необходимости может быть повторен.

В результате работы программы исследуемая функция времени сигналов МШ и МАШ, представленная в виде 16 000 последовательных значений, оказывается занесенной в ОЗУ ЭВМ и далее может подвергаться произвольной обработке программными средствами. Система «МІР» имеет следующие технические характеристики:

- два канала регистрации, соответственно, параметров  $U$  и  $N$  сигналов МШ и МАШ;
- амплитуда тока перемагничивания до 2 А частотой от 0.2 ÷ 40 Гц;
- полоса пропускания усилителя 1 ÷ 800 кГц;
- уровень шума усилителя, приведенный ко входу, не более 2 мкВ;
- коэффициент усиления  $10^4$ ;
- точность выбора интервала стробирования  $\tau$  (рис. 4) – не менее 1%;
- частота оцифровки АЦП до 2 МГц и разрядность 8 бит.

Система «МІР» может работать в режимах:

– обучения (исследования), когда с использованием корреляционного и регрессионного анализа на стадии исследования изделий находится оптимальная зависимость контролируемого параметра и характеристик сигналов МШ и МАШ;

– контроля, когда шкала устройства проградуирована на основе этой зависимости.

Систему «МІР» использовали при контроле напряженного состояния ответственных изделий из высокопрочных мартенситностареющих сталей типа ЧС 98 и ЭП 836. Последняя, например, относится к классу безуглеродистых сложнолегированных сталей и содержит 17% Ni, 10% Co, 10% W, 1.2% Mo, 0.8% Ti. В упрочненном (состаренном) состоянии она имеет структуру мартенсита и обладает хорошим сочетанием высоких прочностных и пластических свойств [2, 6, 12, 13].

Для примера на рис. 4 приведены огибающие распределений энергетических характеристик сигналов МШ –  $U_{\text{МШ}}$  и МАШ –  $U_{\text{МАШ}}$  на полупериоде перемагничивания  $T_n$  для двух значений приложенных растягивающих напряжений:  $\sigma = 0$  (сплошная линия) и  $\sigma = \sigma_{0.2}$  (пунктирная линия) для образцов из стали ЭП 836. Типичные огибающие МШ (ОМШ) имеют один максимум  $U_M$ , расположенный вблизи области полей перемагничивания  $H_M = H_C$  – коэрцитивной силы. Типичные огибающие МАШ (ОМАШ) имеют два максимума  $U_{1A}$  и  $U_{2A}$ , расположенные в областях полей перемагничивания, близких к насыщению ферромагнетиков [2].

Анализ изменений характерных точек ОМШ и ОМАШ от уровня напряженного состояния металлоизделий послужил основой для построения алгоритмов обработки программными средствами этих сигналов на базе системы «МІР».

На рис. 5 приведены результаты исследований параметров ОМШ от величины приложенных макронапряжений  $\sigma$ . Установлено, что увеличение  $\sigma$  приводит к взаимно противоположным изменениям величин UM и NM, а произведение UM · NM является

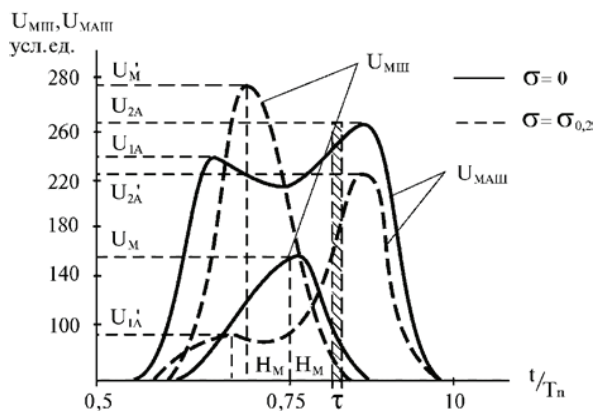


Рис. 4. Огибающие распределений энергетических характеристик МШ –  $U_{MШ}$  и МАШ –  $U_{МАШ}$  при различных значениях растягивающих напряжений  $\sigma$ .

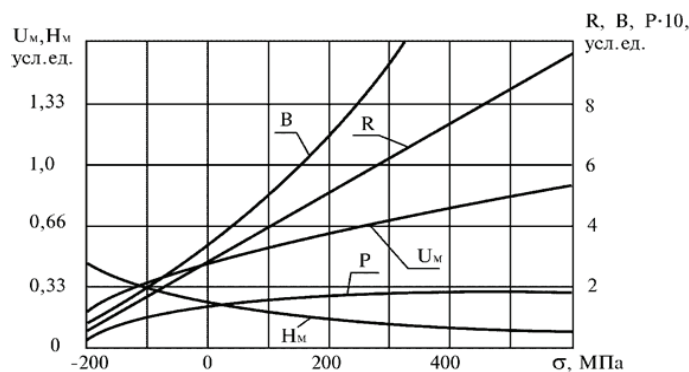


Рис. 5. Зависимость параметров ОМШ и ОМАШ от приложенных напряжений  $\sigma$ .

величиной, близкой к постоянной и практически не зависит от величины микронапряжений, определяемой режимом старения стали.

С увеличением  $\sigma$  параметры ОМШ и ОМАШ  $U_M$ ,  $U_{1A}$  и  $U_{2A}$  также меняются взаимно противоположным образом (рис. 4), причем величина первого максимума  $U_{1A}$  меняется в 2÷3 раза быстрее, чем  $U_{2A}$ .

Результаты исследований положены в основу построения алгоритмов обработки параметров ОМШ [2-4]:

- для повышения чувствительности и разрешающей способности контроля приложенных напряжений – параметр  $R = U_M / H_M$  и параметр  $B = U_M / U_{1A}$ ;
- для повышения достоверности оценки макронапряжений с отстройкой от влияния микронапряжений – параметр  $P = U_M \cdot H_M$ .

Как видно из рис. 5, параметры R и B обладают наибольшей чувствительностью к приложенным напряжениям. Однако их использование ограничено из-за влияния мешающих факторов контроля, например, флуктуаций структурно-фазового состояния контролируемого материала, решением следующих задач:

- контроль с использованием относительных методов измерений, когда необходимо зарегистрировать изменение состояния материала на одном и том же участке объекта контроля, например, в целях МШ тензометрии;

- контроль макронапряжений при обеспечении стабильности структуры материала контролируемого объекта с применением других методов неразрушающего контроля, чувствительных к изменению структурно-фазового состояния, например, с использованием намагниченности (индукции) насыщения.

В последнем случае можно расширить область применения МШ контроля напряженного состояния металлоизделий путем нормировки параметров ОМШ к параметрам ОМШ, например, к значению среднеквадратического напряжения  $U_{МАШ}$  за полупериод перемагничивания.

Для примера приведем алгоритм контроля напряженного состояния трубных заготовок из стали ЭП 836 диаметром 40 мм, длиной  $l = 500$  мм. На рис. 6 приведены распределения параметров  $U_M$  (или аналогично, параметра  $R$ ),  $\gamma = dU_M/dx$ ,  $U_{1A}$  вдоль образующей заготовки, полученных системой «МІР» при режиме перемагничивания током частотой 1 Гц и амплитудой 2 А. Индуктивный преобразователь МШ перемещали по наружной поверхности заготовки вдоль оси, пьезопреобразователь МАШ устанавливали неподвижно на торце заготовки.

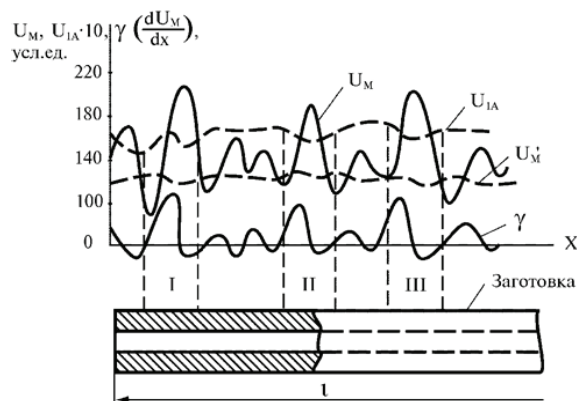


Рис. 6. Распределение параметров МШ и МАШ вдоль образующей заготовки.

Появление наибольшего значения  $U_M$  ОМШ позволило выявить участки изделия с наибольшим уровнем макронапряжений, опасных для разрушения. Однако к трещинообразованию склонны участки изделия с большим перепадом напряжений в соседних зонах, которые выявляются по параметру  $\gamma = dU_M/dx$ . В партии заготовок имеется группа, в которой параметр  $U'_M$  по длине  $l$  не меняется и  $\gamma = 0$ . Испытания этой группы заготовок в кислоте показывают их хорошую стойкость к трещинообразованию, и в дальнейшем изделия с равномерным распределением  $U_M$  относят к разряду годных. Другая группа заготовок имеет явно выраженную неоднозначность распределения  $U_M$  и  $\gamma$  по длине  $l$ , что указывает на неоднозначность распределения остаточных напряжений в них. Выделяют зоны, где  $U_M$  и  $\gamma$  максимальны (зоны I, II, III на рис. 6), следовательно, перепад напряжений наибольший. Испытания в кислоте показывают, что трещины образуются именно в этих зонах у 10% заготовок. У заготовок, для которых трещины не образуются, но имеют место перепады  $U_M$  и  $\gamma$ , оценивают уровень первого максимума  $U_{1A}$  МАШ (рис. 6), который оказался на 30–50% больше, чем для заготовок, склонных к трещинообразованию. В последнем случае можно использовать параметр  $B = U_M / U_{1A}$ , который уменьшается в опасных зонах в 2–3 раза. Следовательно, эти заготовки также относят к разряду годных [2–4, 12].

Таким образом, как показывают результаты проведенных исследований, успешное применение МШ и МАШ заключается в комплексном использовании вышеуказанных алгоритмов обработки параметров сигналов и методик контроля напряженного состояния металлоизделий. Практические результаты их внедрения в условиях серийного производства отражены в работ [1, 2, 6, 12, 14].

Модернизация системы «МІР» связана с применением современных микроконтроллеров (цифровой сигнальный процессор типа DSP). Так, информационно-измерительные системы «СМАК» [6] и «МШ-1» [4, 8, 9] значительно расширяют методические возможности метода МШ.

Рассмотренная методика контроля успешно применена для оценки напряженного состояния трубопроводов в процессе их эксплуатации в нефтегазовой промышленности. В этом случае регистрируют результаты измерений энергетических характеристик МШ в продольном и поперечном направлениях перемагничивания относительно оси напряжения трубопровода.

Реализация этой методики контроля механических напряжений в трубопроводе требует сканирования значительной зоны его поверхности при одновременном изменении направления перемагничивания. По существу обеспечивается контроль плосконапряженного состояния участка трубопровода.

Для контроля механических напряжений на плоскости разработан магнитошумовой прибор МШ-3 с 3-х-координатным сканером-приставкой [8, 10, 11], управляемый с персонального компьютера.

Прибор МШ-3 и сканер обеспечили возможность сканировать поверхность трубопровода с заданным шагом и одновременно менять направление перемагничивания относительно осей главных механических напряжений.

Для диагностики ресурса безопасной работы металла трубопровода предложено оценивать деструкцию их стали по регистрации значения изменения коэрцитивной силы ( $H_c$ ) во время эксплуатации. Значение  $H_c$  оценивалось по величине максимума  $U_m$  ОМШ [14].

Дальнейшим развитием приборов магнитного неразрушающего контроля является разработка универсальной информационно-измерительной системы «МШ-3М» (рис. 7) [4, 10, 11].

В информационно-измерительной системе МШ-3М реализованы режимы измерения:

А) параметров петли гистерезиса контролируемого изделия:

- коэрцитивная сила  $H_c$  как значение тока  $I_c$  в катушке перемагничивания в момент равенства напряжения на ней нулевому значению;
- остаточная индукция  $B_s$  как значение напряжения  $U_R$  на катушке перемагничивания в момент равенства тока катушки  $I_i = 0$ ;
- индукция насыщения  $B_R$  как значение напряжения  $U_N$  на катушке перемагничивания.

Б) энергетических параметров МШ:

- значение средневыпрямленного напряжения МШ  $e(t)$  за один период ТП или  $n$  циклов перемагничивания:

$$E_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{II}} \int_0^{T_{II}} e(t) dt;$$

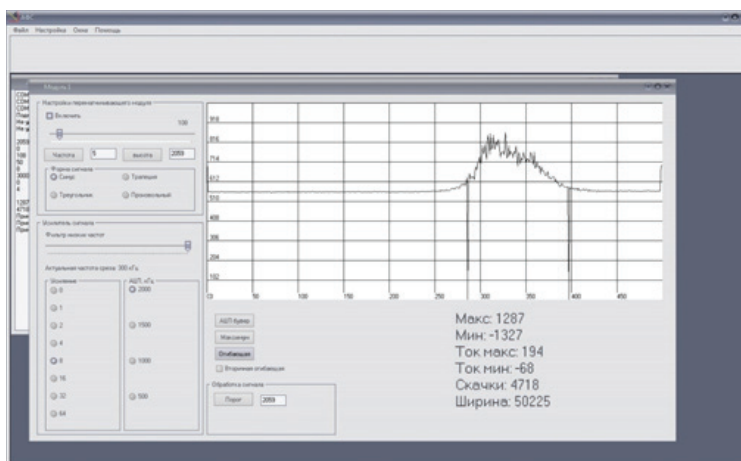


- значение текущего средневыпрямленного напряжения МШ  $e(t)$  в интервале стробирования  $\tau$  за один или  $n$  циклов перемагничивания:

$$E(t_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau} \int_{t_j - \frac{\tau}{2}}^{t_j + \frac{\tau}{2}} e(t) dt.$$



а



б

Рис. 7. Внешний вид прибора МШ-3М (а) и главное окно программы для ПК (б).

В результате усовершенствования магнитоакустических систем повысилась чувствительность к контролю приложенных механических напряжений и достоверность оценки макронапряжений с отстройкой от влияния микронапряжений, а также появилась возможность учитывать влияние флуктуаций структурно-фазового состояния металла при оценке механических напряжений. Использование информационно-измерительной системы МШ-3М расширяет возможности магнитных методов исследования физико-механических свойств металлов из ферромагнитных материалов за счет усреднения магнитных параметров в поверхностных и глубинных слоях. Программное обеспечение МШ-3М позволяет также использовать для контроля другие параметры петли гистерезиса, например,  $B_S$ ,  $B_R$ ,  $H_C$ . Применение сканирующего устройства существенно расширяет возможности МШ-3М при исследовании плосконапряженного состояния изделия.

#### Литература:

1. Филинов В.В., Резников Ю.А., Вагин А.В., Кузнецов Н.С. Опыт применения метода Баркгаузена для контроля напряженного состояния деталей из высокопрочной стали // Дефектоскопия. 1992. № 5. С. 17–20.

2. Филинов В.В. Методы и приборы контроля механических напряжений на основе использования магнитно-акустических шумов. М.: Машиностроение, 2001. 154 с.
3. Филинов В.В., Филинова А.В. Контроль механических напряжений в изделиях из сталей на основе регистрации магнитных и магнитоакустических шумов перемагничивания // Контроль. Диагностика. 2007. № 2. С. 41–44.
4. Филинов В.В., Аракелов П.Г. Разработка новых информативных параметров при контроле напряженного состояния ферромагнитных материалов на основе регистрации магнитных шумов перемагничивания // Контроль. Диагностика. 2013. № 5. С. 28–31.
5. Филинов В.В., Соколик А.И., Шатерников В.Е., Штин А.А. Магнитный структуроскоп, основанный на эффекте Баркгаузена // Дефектоскопия. 1985. № 12. С. 21–25.
6. Филинов В.В., Шатерников В.Е., Рукавишников И.В., Народицкий А.Н., Плешаков В.В., Ковалев Д.А. Применение метода магнитных шумов для контроля технологических напряжений // Контроль. Диагностика. 2005. № 3. С. 17–23.
7. Филинов В.В., Филинова А.В. Модернизация магнитошумового прибора, предназначенного для контроля механических напряжений // Приборы. 2010. № 11. С. 33–39.
8. Филинов В.В., Аракелов П.Г., Дидин Г.А. Информационная система для магнитошумового контроля механических напряжений // Приборы. 2010. № 11. С. 32–36.
9. Filinov V.V., Arakelov P.G., Shaternkov V.E., Didin G.A. Hardware-software complex “Training apparatus of the operator of devices of non-destructive testing” / Abstr. of the 10th Eur. Conf. of Non-Destructive Testing, Part 2. Moscow, 2010. P. 157.
10. Филинов В.В., Аракелов П.Г. Разработка информационно-измерительной системы для контроля физико-механических свойств изделий из ферромагнитных сталей с использованием информативных параметров сигналов магнитных и магнитоакустических шумов // Контроль. Диагностика. 2014. № 8. С. 35–42.
11. Филинов В.В., Аракелов П.Г., Третьяк Е.В., Головченко Д.А. Универсальная информационно-измерительная система для исследования магнитных свойств ферромагнитных сталей // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 5(14). С. 38–45.
12. Филинов В.В., Шатерников В.Е., Аракелов П.Г. Контроль технологических напряжений методом магнитных шумов // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 58–71.
13. Филинов В.В., Шатерников В.Е. Исследование физико-механических свойств высокопрочной стали и возможности их контроля по параметрам магнитных и акустических шумов // Дефектоскопия. 2014. № 10. С. 47–51.
14. Филинов В.В., Кузнецов А.Н., Аракелов П.Г. Контроль напряженного состояния трубопроводов по магнитным параметрам металла // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 41–50.