

Неразрушающий Контроль и Диагностика



Электронная версия журнала
<http://science.by/nauka/13/>

№ 4 2012

Главный редактор

Мигун Николай Петрович

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА

Редакционная коллегия:

№ 4, 2012

Аскирко С.Д.
Боровский В.В.
Венгринович В.Л.
Войцехович Л.Н.
Высоцкий М.С.
Горбаш В.Г.
Жагора Н.А.
Зуйков И.Е.
Ивлев С.А.
Кулагин В.Н.
Лухвич А.А.
Матюк В.Ф.
Мелешко А.Л.
Пантелеенко Ф.И.
Попоудина С.А.
Рудницкий В.А.
Сергеев С.С.

Научно-практический журнал

*Электронная версия журнала
на сайте science.by (nauka.of.by)*

Учредители

*Белорусская ассоциация
неразрушающего контроля
и технической диагностики,
республиканское общественное
объединение*

*Институт прикладной физики
НАН Беларуси,
государственное научное учреждение*

*«Диатех»,
республиканское научно-производственное
унитарное предприятие*

*Министерство информации Республики Беларусь 4 ноября 2011 г.
зарегистрировало журнал «Неразрушающий контроль и диагностика»
в Государственном реестре средств массовой информации за № 1488.*

*Журнал входит в «Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований».*

*Журнал НКД зарегистрирован в международном каталоге научных
журналов со свободным доступом к полным текстам.
DOAJ (Directory of Open Access Journals, <http://www.doaj.org>).*

Неразрушающий контроль и диагностика
(Электронная версия журнала: <http://science.by/nauka/13/>)

Научно-практический журнал

Издатели

*Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси»*

*Республиканское научно-производственное унитарное предприятие
«Диатех»*

Адрес редакции:
220072 г. Минск, ул. Академическая, 16, к. 314.
Тел.: +375 17 284 0686,
факс: +375 17 284 1740,
e-mail: diatech@tut.by
URL <http://science.by/nauka/13/>

Подписной индекс (ведомственная подписка) 00844

Подписано в печать 18.09.2012.
Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Cambria.
Усл. печ. л. 7,04.
Тираж 100 экз.

Печать цифровая.
Государственное предприятие «Диатех»,
220072 г. Минск, ул. Академическая, 16.

Тексты публикуются в авторской версии без редакционных изменений.

ISSN 2224-1752 (печатная версия журнала).
EISSN 2224-5502 (электронная версия журнала).

© Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси», 2012

© Республиканское научно-производственное
унитарное предприятие «Диатех», 2012

УДК 681.5.09

**ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ
СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОТДЕЛЬНЫХ
КОМПОНЕНТОВ**
*SEMI-MARKOV MODEL OF MULTICOMPONENT SYSTEM BASED
ON PARAMETERS OF COMPONENTS OF SYSTEM*

Никищенко А.Н., Обжерин Ю.Е.
Nikishenko A.N., Obzherin Yu.E.

Построена полумарковская (ПМ) модель многокомпонентной системы на основе параметров ПМ моделей компонентов системы. Рассматриваются ПМ модели компонентов, фазовое пространство которых дополнено до ПМ с использованием «времени вперед». При построении модели системы использован метод суперпозиции. Определены стационарные характеристики системы.

Semi-Markov model of multicomponent systems based on parameters of semi-Markov models is built. The semi-Markov models of the components, the phase space which extended to a semi-Markov with "time forward", are considered. The method of superposition in model of the system is used. Stationary characteristics of the system are defined.

В производстве зачастую используются многокомпонентные системы, большинство из которых состоят из независимо функционирующих компонентов. Поэтому особый интерес представляет описание характеристик (надежности, эффективности) многокомпонентных систем на основе характеристик отдельных компонентов.

Параметры однокомпонентных технических систем во многих случаях могут быть описаны с применением теории полумарковских процессов. В литературе [1, 2, 3] процессы контроля, технического обслуживания и диагностики компонента описываются с помощью полумарковских процессов (ПМП) $\xi(t)$ с общим фазовым пространством состояний: $E = \{j\bar{d}x\}$,

где j — номер узла, изменившего свое физическое состояние последним;

\bar{d} — вектор, компоненты которого указывают на физическое состояние узла;

\bar{x} — вектор, компоненты которого дополняют фазовое пространство состояний, описывающее функционирование компонента, до полумарковского.

При построении ПМП компонентов возникает необходимость производить дополнение фазового пространства, чтобы обеспечить свойство марковости рассматриваемого процесса. Возможно два варианта дополнения фазового пространства до полумарковского:

1. с использованием «времени назад» — компоненты вектора \bar{x} фиксируют времена, прошедшие с момента последнего изменения узлов компонента в прошлом до ближайшего изменения состояния компонента системы;

2. с использованием «времени вперед» — компоненты вектора \bar{x} фиксируют времена с момента последнего изменения состояния компонента системы до ближайшего изменения узлов компонента в будущем.

При описании каждого компонента системы ПМП $\xi(t)$ с общим фазовым пространством состояний система в целом также может быть описана с использованием полумарковских моделей и метода суперпозиции.

В [4] рассмотрено и дано определение суперпозиции конечного числа независимых процессов Марковского восстановления (ПМВ), каждый из которых может находиться в дискретном множестве состояний. В этом случае непрерывные компоненты не вводятся, что можно интерпретировать как частный случай с нулевыми непрерывными компонентами.

В [5] приведена теория по нахождению стационарных характеристик многокомпонентных систем, состоящих из конечного числа независимых компонентов с использованием метода суперпозиции. В данном источнике описывается суперпозиция ПМП $\xi^{(i)}(t)$ с общим фазовым пространством состояний, дополненных до ПМП по первому варианту («время назад»). Фазовое пространство процесса суперпозиции расширяется до полумарковского введением дополнительного вектора непрерывных компонент, фиксирующих времена до следующего изменения компонент системы, что усложняет модель системы.

В данной работе показано, что при использовании описания функционирования компонентов с помощью ПМП с дополнением «временем вперед» (данное дополнение используется при построении модели контроля скрытых отказов в системе [1]), применение метода

суперпозиции не требует введения дополнительных компонент, т.е. усложнения системы.

Построим полумарковскую модель производственной системы, состоящей из N независимых компонентов, функционирование каждого из которых описывается ПМП $\xi^{(i)}(t)$ с компонентами, фиксирующими время до ближайшего изменения («время вперед»). Как уже отмечалось, фазовое пространство состояний ПМП может быть представлено в следующем виде: $E^{(i)} = \{j\bar{d}_i \bar{x}^{(i)}\}$, где $\bar{d}_i = \{d_i, d_i', d_i'', \dots\}$ — компоненты вектора, указывающие на физическое состояние компонентов системы, $j \in \overline{1, k_i}$ — номер элемента узла, изменившего свое физическое состояние последним, k_i — число узлов в i -м компоненте системы. Компоненты вектора $\bar{x}^{(i)} = \{x_1^{(i)}, \dots, x_{j-1}^{(i)}, 0, x_{j+1}^{(i)}, \dots, x_{k_i}^{(i)}\}$, фиксируют время с момента последнего изменения системы (j -го узла компонента) до ближайшего изменения состояния остальных узлов компонента системы. Узлы компонента могут быть как зависимыми, так и независимыми. При рассмотрении компонента с зависимыми узлами, кроме того, что $x_j^{(i)} = 0$, некоторые из оставшихся компонент вектора $\bar{x}^{(i)}$ могут обращаться в ноль (восстановление системы после обнаружения отказа) либо сохранять свое значение на некотором промежутке времени (остановка элемента на время проведения контроля). Все подобные изменения учтены на этапе описания компонентов системы, поэтому достаточно будет рассмотреть вектор $\bar{x}^{(i)}$ в общем виде.

Временная диаграмма функционирования i -го компонента системы в общем случае приведена на рисунке 1. В данном компоненте показана работа зависимых узлов: при изменении состояния j -го узла — изменяется состояние m -го узла.

Считаем, что определены следующие параметры ПМП i -го компонента системы, состоящего из k_i узлов:

- фазовое пространство состояний — $E^{(i)} = \{j\bar{d}_i \bar{x}^{(i)}\}$, разбитое на подпространство рабочих $E_+^{(i)}$ и отказовых $E_-^{(i)}$ состояний;
- времена пребывания ПМП $\xi^{(i)}(t)$ в состояниях — $\theta_{j\bar{d}_i \bar{x}^{(i)}}^{(i)}$;
- плотности вероятностей (вероятности) переходов ВЦМ $\{\xi_{k_i}^{(i)}, k_i \geq 0\}$:
 $\Psi_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$;
- стационарные распределения состояний ВЦМ $\{\xi_{k_i}^{(i)}, k_i \geq 0\}$:
 $\rho^{(i)}[j\bar{d}_i \bar{x}^{(i)}] = \rho_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_{j-1}^{(i)}, 0, x_{j+1}^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$;

- среднее стационарное время восстановления $T_-^{(i)}$ и среднее стационарное время наработки на отказ $T_+^{(i)}$ компонента.

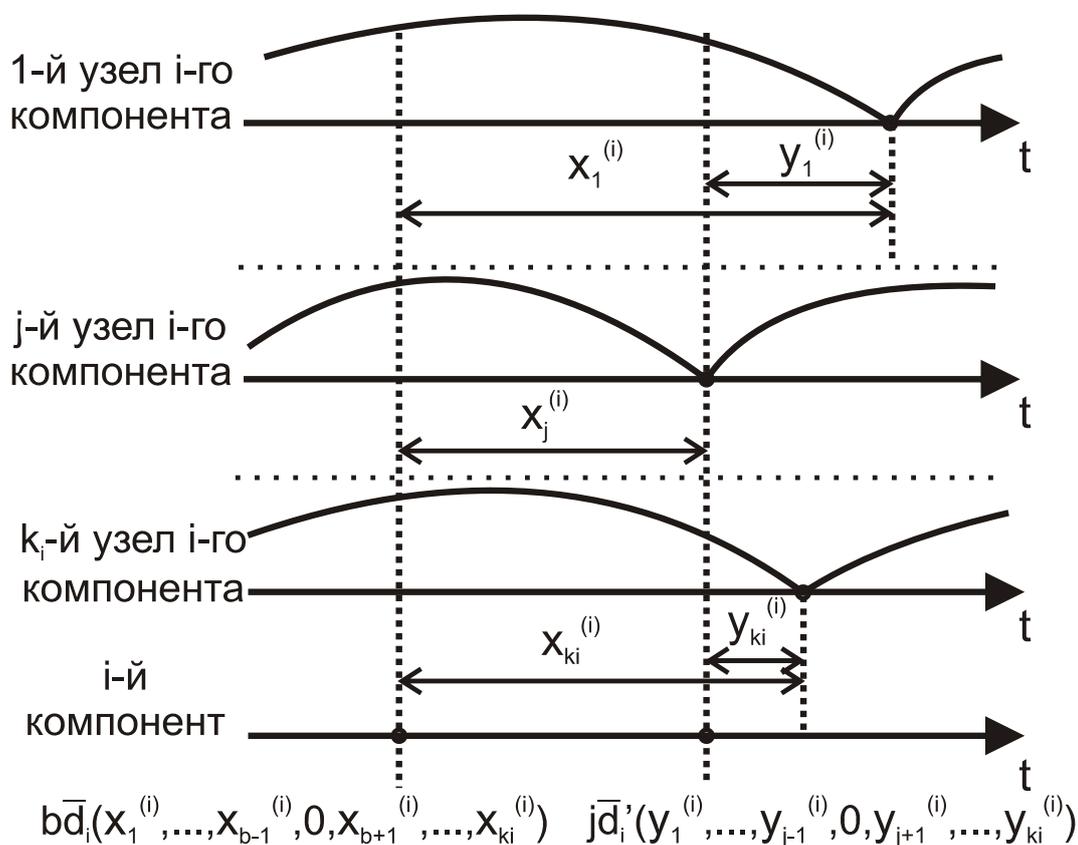


Рис. 1. Временная диаграмма функционирования i -го компонента системы

Приведем формальное определение суперпозиции ПМП $\xi^{(i)}(t)$ с общим фазовым пространством состояний $E^{(i)}$.

Определение. Суперпозицией ПМП $\xi^{(i)}(t)$ с общим фазовым пространством состояний $E^{(i)}$ называется n -компонентный процесс $\xi(t)$ с компонентами $\xi(t) = \{\xi^{(1)}(t), \xi^{(2)}(t), \dots, \xi^{(N)}(t)\}$.

Заметим, что построенный таким образом процесс $\xi(t)$ является полумарковским. Действительно, он не меняет своего значения между двумя соседними скачками процессов $\xi^{(i)}(t)$, $i = \overline{1, N}$, т.е. является процессом с кусочно-постоянными траекториями, к тому же он уже обладает марковским свойством.

Общее фазовое пространство состояний для ПМП $\xi(t)$ может быть представлено в следующем виде: $E = \{\bar{i}d\bar{z}, i = \overline{1, N}\}$. Компоненты вектора $\bar{d} = \bar{d}_1 \times \bar{d}_2 \times \dots \times \bar{d}_n$ указывают на физическое состояние узлов в компонентах; i — номер компонента, изменившего свое физическое состояние последним.

Компоненты вектора $\bar{z} = \{z_1, \dots, z_{i-1}, 0, z_{i+1}, \dots, z_N\}$, где $z_m = \bigwedge_{j \in 1, k_i} x_j^{(m)}$

фиксируют времена с момента последнего изменения системы до ближайшего изменения состояния m -х компонентов ($m \neq i$).

Множество значений вектора \bar{z} , при котором ПС работоспособна, обозначается через E_+ , а множество значений, при котором ПС неработоспособна, — через E_- ($E = E_+ \cup E_-$, $E_+ \cap E_- = \emptyset$).

Следует отметить, что построение суперпозиции для ПМП $\xi^{(i)}(t)$, фазовое пространство которых было дополнено компонентой «время вперед», не нуждается во введении дополнительных непрерывных компонент, т.к. введенные ранее компоненты i -го ПМП $\xi^{(i)}(t)$ ($x_1^{(i)}, \dots, x_{k_i}^{(i)}$) однозначно определяют фазовое пространство ПМП суперпозиции.

На рисунке 2 приведена диаграмма функционирования системы в целом. Рассмотрено два возможных перехода в системе: последнее изменение системы было в одном компоненте (b -м), а последующее происходит в другом компоненте системы (i -м); последнее и последующее изменения происходят в одном и том же компоненте системы.

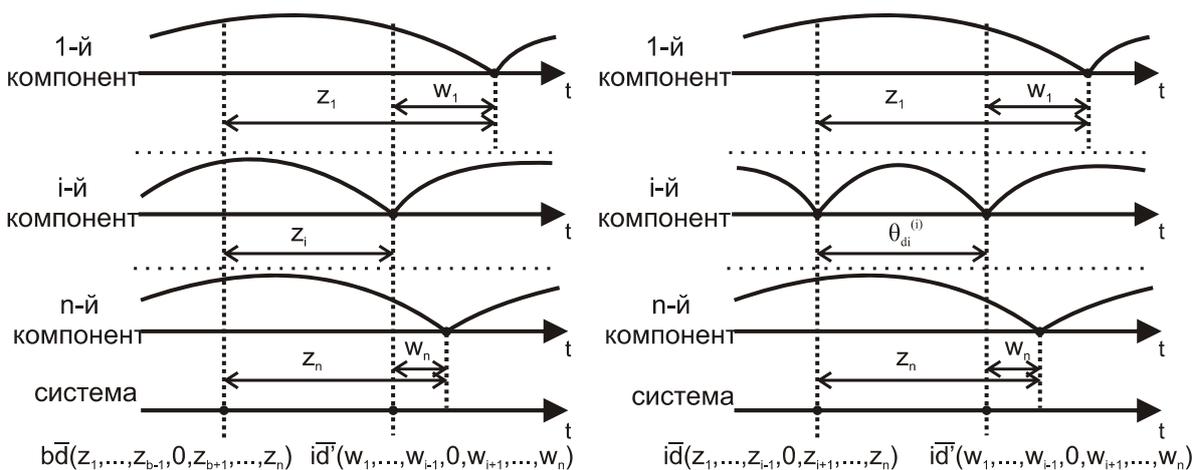


Рис. 2. Функционирование системы, состоящей из N независимых компонентов

Для задания ПМ ядра суперпозиции воспользуемся очевидной формулой для времени пребывания в состояниях на n -м шаге (\wedge — знак минимума):

$$\Theta_{i\bar{d}\bar{z}} = \Theta_{d^{(i)}} \wedge z^{(i)}, \quad (1)$$

$$z^{(i)} = \bigwedge_{\substack{j \in \overline{1, N} \\ j \neq i}} z_j. \quad (2)$$

Опишем плотности вероятностей переходов ВЦМ $\{\xi_n, n \geq 0\}$ суперпозиции. Пусть $E_{\bar{d}_i}^{(i)}$ — совокупность состояний i -го компонента, из которых возможен переход в состояние \bar{d}_i .

Из состояния $i\bar{d}\bar{z}$, переходы бывают следующих типов:

1) в совокупность состояний $i\bar{d}'\bar{w}$ (переход в состояние \bar{m}_i i -го компонента) с плотностью распределения вероятности перехода $p_{i\bar{d}\bar{z}}^{i\bar{d}'\bar{w}} = \Psi_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$, где $\bar{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)$, $w_i = \bigwedge_k y_k^{(i)}$, $i \in \overline{1, N}$, $\bar{d}_i' = \bar{m}_i$, $t = x_m^{(i)}$, $y_m^{(i)} = 0$, $x_k^{(i)} = y_k^{(i)} + t$, $\forall k \neq m$; $\bar{d}_j' = \bar{d}_j$, $x_k^{(j)} = y_k^{(j)} + t$, $\forall j \neq i, k \in kj$.

2) в совокупность состояний $j\bar{d}'\bar{w}$ (переход в состояние \bar{m}_j j -го компонента системы) с плотностью распределения вероятности перехода $p_{i\bar{d}\bar{z}}^{j\bar{d}'\bar{w}} = \Psi_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$, где $\bar{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)$, $w_i = \bigwedge_k y_k^{(i)}$, $i \in \overline{1, N}$, $s_j = z_j$, $\bar{d}_j' = \bar{m}_j$, $y_m^{(j)} = 0$, $x_k^{(j)} = y_k^{(j)} + s_j$, $\forall k \neq m$; $\bar{d}_i' = \bar{d}_i$, $x_k^{(i)} = y_k^{(i)} + s_j$, $\forall i \neq j, k \in kj$.

Предположим, существование стационарных плотностей распределения ВЦМ $\{\xi_n, n \geq 0\}$ $\rho[i\bar{d}\bar{z}]$ для состояний $i\bar{d}\bar{z}$, $i \in \overline{1, n}$. Составим для них систему интегральных уравнений с учетом полученных плотностей распределения вероятности переходов из одного состояния в другое:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho[i\bar{d}'\bar{w}] = \sum_{\bar{d}_i \in E_{\bar{d}_i}^{(i)}} \left(\int_0^\infty \rho[i\bar{d}\bar{z}] \Psi_{d_i}^{(i)}(t + y_1^{(i)}, \dots, t + y_k^{(i)}) dt + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_0^\infty \rho[j\bar{d}\bar{z}] \Psi_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_k^{(j)}) ds_j \right), \quad \bar{d}' \in E, \\ \sum_i \sum_{\bar{d} \in E} \int_0^\infty \rho[i\bar{d}\bar{z}] d\bar{z} = 1, \quad i \in \overline{1, n}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Лемма 1. Решение системы (5) для суперпозиции N независимых ПМП $\xi^{(i)}(t)$ являются функции вида:

$$\rho[i\bar{d}z] = \rho_0 \rho_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)}) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_0^\infty \left[\rho_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_k^{(j)}) \times \right. \\ \left. \times \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_k^{(j)}) \right] ds_j \quad (6)$$

где ρ_0 — находится из условия нормировки, последнее уравнение в системе (5), $\rho^{(i)}[j\bar{d}_i x^{(i)}]$ — стационарные распределения состояний ВЦМ $\{\xi_{k_i}^{(i)}, k_i \geq 0\}$, $\psi_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$ — плотности вероятностей (вероятности) переходов ВЦМ $\{\xi_{k_i}^{(i)}, k_i \geq 0\}$.

Доказательство. Покажем, что выражения (6) являются решением системы уравнений (5), для этого рассмотрим решение первых n уравнений системы (5) в общем виде:

$$\rho[i\bar{d}'w] = \sum_{d_i \in E_{d_i}^{(i)}} \left(\int_0^\infty \rho[i\bar{d}z] \psi_{d_i}^{(i)}(t + y_1^{(i)}, \dots, t + y_{k_i}^{(i)}) dt + \right. \\ \left. + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_0^\infty \rho[j\bar{d}z] \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) ds_j \right) = \\ = \sum_{d_i \in E_{d_i}^{(i)}} \left[\int_0^\infty \rho_0 \rho_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(t + y_1^{(i)}, \dots, t + y_{k_i}^{(i)}) dt \times \right. \\ \times \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_0^\infty \rho_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_{k_j}^{(j)}) \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_{k_j}^{(j)}) ds_j + \\ \left. + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left(\int_0^\infty \rho_0 \rho_{d_j}^{(j)}(x_1^{(j)}, \dots, x_{k_j}^{(j)}) \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) ds_j \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \prod_{\substack{h=1 \\ h \neq j}}^N \int_0^\infty \rho_{d_h}^{(h)}(s_h + x_1^{(h)}, \dots, s_h + x_{k_h}^{(h)}) \psi_{d_h}^{(h)}(s_h + x_1^{(h)}, \dots, s_h + x_{k_h}^{(h)}) ds_h \right) \right].$$

Проведем замену переменных $t = s_j$, тогда:

$$\begin{aligned} \rho[\overline{id'w}] &= \sum_{d_i \in E_{d_i}^{(i)}} \left(\sum_{i=1}^N \int_0^\infty \rho_0 \rho_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i \times \right. \\ &\quad \left. \times \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_0^\infty \rho_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_{k_j}^{(j)}) \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_{k_j}^{(j)}) ds_j \right) = \\ &= \sum_{d_i \in E_{d_i}^{(i)}} \left(\sum_{i=1}^N \int_0^\infty \rho_0 \rho_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i \times \right. \\ &\quad \left. \times \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_0^\infty \rho_{d_j}^{(j)}(s_i + s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_i + s_j + y_{k_j}^{(j)}) \psi_{d_j}^{(j)}(s_i + s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_i + s_j + y_{k_j}^{(j)}) ds_j \right). \end{aligned}$$

Для функций $\rho^{(i)}[\overline{jd_i x^{(i)}}]$ и $\psi_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_{k_i}^{(i)})$ выполняется следующее тождество:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \rho_{d_i}^{(i)}(t + s_i + y_1^{(i)}, \dots, t + s_i + y_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(t + s_i + y_1^{(i)}, \dots, t + s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i = \\ = \int_t^\infty \rho_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i. \end{aligned}$$

С учетом этого равенства, продолжим преобразование:

$$\begin{aligned} \rho[\overline{id'w}] &= \sum_{\overline{d_i} \in E_{\overline{d_i}}^{(i)}} \left(\sum_{i=1}^n \int_0^\infty \rho_0 \rho_{\overline{d_i}}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) \psi_{\overline{d_i}}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i \times \right. \\ &\quad \left. \times \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_{s_i}^\infty \rho_{\overline{d_j}}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) \psi_{\overline{d_j}}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) ds_j \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Лемма 2. Пусть $\varphi_i(t)$, $i \in \overline{1, N}$ — непрерывные функции, определенные в диапазоне $[0, +\infty)$ и интегралы $\int_0^\infty \varphi_i(t) dt$ являются сходящимися. Тогда справедливо следующее утверждение:

$$\sum_{i=1}^n \int_0^\infty \varphi_i(z) dz \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_z^\infty \varphi_j(s_j) ds_j = \prod_{i=1}^n \int_0^\infty \varphi_i(s_i) ds_i. \quad (8)$$

Доказательство леммы 2 приводится в [6].

С учетом (8) выражение (7) примет следующий вид:

$$\rho[\bar{i}\bar{d}'\bar{w}] = \rho_0 \sum_{d_i \in E_{d_i}^{(i)}} \left(\prod_{i=1}^n \int_0^\infty \rho_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i \right).$$

Напомним, что $\rho_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)})$ — стационарные распределения состояний, а $\psi_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)})$ — вероятности переходов ВЦМ $\{\xi_{k_i}^{(i)}, k_i \geq 0\}$. Очевидно, что:

$$\sum_{d_i \in E_{d_i}^{(i)}} \int_0^\infty \rho_{d_i}^{(i)}(t + y_1^{(i)}, \dots, t + y_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(t + y_1^{(i)}, \dots, t + y_{k_i}^{(i)}) dt = \rho_{d_i}^{(i)}(y_1^{(i)}, \dots, y_{k_i}^{(i)}). \quad (9)$$

С учетом выражения (9) уравнение (7) примет вид:

$$\rho[\bar{i}\bar{d}'\bar{w}] = \rho_0 \rho_{d_i}^{(i)}(y_1^{(i)}, \dots, y_{k_i}^{(i)}) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_0^\infty \left(\rho_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) \times \right. \\ \left. \times \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) \right) ds_j.$$

Таким образом, **лемма 1** доказана.

Для вычисления стационарных показателей надежности многокомпонентной системы можно использовать полученные средние времена пребывания в состояниях ПМП $\xi(t)$ и стационарное распределение вложенной цепи Маркова $\{\xi_n, n \geq 0\}$. С другой стороны, коэффициент готовности K_r , средняя наработка на отказ T_+ и среднее время восстановления T_- системы не зависит от метода дополнения фазового пространства до полумарковского. Поэтому для вычисления данных параметров используем формулы, приведенные в [5]:

$$K_r = \sum_{d \in E_+} \prod_{i=1}^N T_{d_i}^{(i)} \left\{ \prod_{i=1}^N (T_+^{(i)} + T_-^{(i)}) \right\}^{-1}, \text{ где } T_{d_i}^{(i)} = \begin{cases} T_+^{(i)}, & \text{если } d_i \in E_+^{(i)}, \\ T_-^{(i)}, & \text{если } d_i \in E_-^{(i)}, \end{cases}$$

$$T_+ = \sum_{d \in E_+} \prod_{i=1}^N T_{d_i}^{(i)} \left\{ \sum_{d \in E_+} \prod_{i=1}^N T_{d_i}^{(i)} \sum_{j \in G} \frac{1}{T_+^{(j)}} \right\}^{-1} = \sum_{d \in E_+} \prod_{i=1}^N T_{d_i}^{(i)} \left\{ \sum_{d \in E_-} \prod_{i=1}^N T_{d_i}^{(i)} \sum_{j \in L} \frac{1}{T_-^{(j)}} \right\}^{-1},$$

$$T_- = \sum_{d \in E_-} \prod_{i=1}^N T_{d_i}^{(i)} \left\{ \sum_{\bar{d} \in E_+} \prod_{i=1}^N T_{d_i}^{(i)} \sum_{j \in G} \frac{1}{T_+^{(j)}} \right\}^{-1} = \sum_{d \in E_-} \prod_{i=1}^N T_{d_i}^{(i)} \left\{ \sum_{\bar{d} \in E_-} \prod_{i=1}^N T_{d_i}^{(i)} \sum_{j \in L} \frac{1}{T_-^{(j)}} \right\}^{-1},$$

где E_+ – множество векторов $\bar{d} \in E_+$ таких, что изменение значения некоторой компоненты с работоспособной на отказовое переводит вектор \bar{d} в множество E_- ; E_- – множество векторов $\bar{d} \in E_-$ таких, что изменение значения некоторой компоненты с отказовой на работоспособную переводит вектор \bar{d} в множество E_+ ; G – множество номеров компонент вектора $\bar{d} \in E_+$, изменение значения каждой из которых с работоспособной на отказовое переводит вектор \bar{d} в множество E_- ; L – множество векторов $\bar{d} \in E_-$ таких, что изменение значения каждой компоненты с отказовой на работоспособную переводит вектор \bar{d} в множество E_+ .

Полученные результаты позволяют определять стационарные характеристики многокомпонентных систем, исходя из параметров каждого компонента системы, что, в свою очередь, позволяет упростить построение полумарковских моделей многокомпонентных систем. Данная модель позволяет выбрать оптимальную конструкцию и определить оптимальное взаимодействие между компонентами (проведение совместного контроля, диагностики, ТО). В дальнейшем планируется нахождение стационарных характеристик производственной системы, состоящей из произвольного числа компонент, в каждом из которых проводится контроль наличия скрытых отказов.

Литература

1. Бойко Е.Г. Модель контроля скрытых отказов автоматизированной системы / Е.Г. Бойко // Автоматизация процессов и управление: Вестн. СевГТУ: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2010. – Вып. 108. – С. 52–56.
2. Бойко Е.Г. Анализ влияния периода контроля на надежность технической системы/ Е.Г. Бойко, Ю.Е. Обжерин, Н.В. Казакова // Оптимизация производственных процессов — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005. – Выпуск 7. – С. 23-27.
3. Обжерин Ю.Е. Полумарковская модель календарного контроля параметрических отказов автоматизированной восстанавливаемой системы/ Ю.Е. Обжерин,

- Е.Г. Бойко// Автоматизация процессов и управление: Вестн. СевГТУ: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2007. – Вып. 83. – С. 61 – 64.
4. Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем/ В.С. Королюк, А.Ф. Турбин – К.: Наук. думка, 1982. – 236 с.
 5. Корлат А.Н. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания/ А.Н. Корлат, В.Н. Кузнецов, М.М. Новиков, А.Ф. Турбин – Кишинев: Штиинца, 1991. – 276 с.
 6. Кузнецов В.Н. Полумарковская модель восстанавливаемых систем/ В.Н. Кузнецов, А.Ф. Турбин, Г.Ж. Цатурян – К.: Ин-т математики АН УССР, 1968, №8. – С. 56–57.

Статья поступила в редакцию 25.09.12

**О ВКЛАДЕ ТЕРМОАКТИВАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТРЕНИИ**
*The contribution of thermoactivation component
acoustic emissions while friction*

Холодилов О.В., Белоногий Д.Ю.
Kholodilov O.V., Belonogyi D.Y.

Рассмотрены вопросы возникновения акустической эмиссии при трении твердых тел. Предложена модель возникновения акустической эмиссии, основанная на представлении зоны контакта как ячеистой излучающей структуры. С использованием представлений кинетической теории прочности С.Н. Журкова получены выражения, позволяющие оценить активность и амплитуду сигнала акустической эмиссии при трении твердых тел.

Considered the issues of acoustic emission by the friction of solids body. We propose a model of the acoustic emission, based on the idea of the contact zone as cellular radiating structure. With the use of representations of the kinetic theory of strength Zhurkov were obtained by expression to assess the activity and the amplitude of the acoustic emission signal by friction of solids body.

Введение

В настоящее время для диагностики состояния трибосопряжений разработано большое число методов [1]. Одним из наиболее эффективных является метод акустической эмиссии (АЭ). Акустические колебания при трении инициируются ударным взаимодействием микровыступов и упругопластической деформацией сопрягаемых поверхностей, процессами разрушения фрикционных связей и структурно-фазовой перестройки материалов, образованием и развитием трещин в поверхностных слоях взаимодействующих тел, отделением частиц износа [2, 3].

Как известно, фрикционное взаимодействие двух тел происходит не по всей площади контактирующих поверхностей, а в пределах т.н. «пятен касания» [2]. Из-за дискретности фрикционного контакта твердых тел, а также случайного характера распределения температурных и деформационных полей на пятнах фактического касания и,

как следствие, неравномерного разрушения поверхностного слоя трение и изнашивание имеют статистическую природу.

Форму акустического сигнала, возникающего при разрушении пятна касания и регистрируемого пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП), можно описать с помощью некоторой известной функции $F_i(t)$. Тогда излучение контактной области, содержащей N разрушаемых пятен касания, в общем случае может быть представлено в виде случайного процесса [2]

$$z(t) = \sum_{i=0}^N A_i F_i(t - t_i), \quad (1)$$

где A_i – амплитуда i -го импульса; t_i – момент излучения i -го импульса.

Существуют различные подходы построению модели АЭ при трении [2, 3]. Один из них позволяет построить феноменологическую модель, основанную на применении кинетической концепции прочности твердых тел [4], согласно которой разрушение представляет собой термоактивированное зарождение ансамбля микротрещин, их слияние и рост результирующей макротрещины. Эта модель предполагает, что интенсивность АЭ (число импульсов в единицу времени) определяется кинетикой разрушения [5], что позволяет произвести расчёт временной зависимости интенсивности АЭ при соответствующем термоактивированном зарождении ансамбля микротрещин в динамически нагружаемом объекте контроля.

В данной модели за основу берётся ячеистая излучающая структура, образующаяся при трении твердых тел в зоне контакта и определяемая физико-механическими и геометрическими свойствами взаимодействующих поверхностей [6, 7]. Характерный размер ячейки определяется в соответствии с масштабом фрикционной связи.

При фрикционном взаимодействии все ячейки, в которых реализуются касательные напряжения, превышающие критическое напряжение разрыва, разрушаются механически с отделением частицы износа. Кроме того, возможно разрушение ячеек в результате термоактивированного зарождения, роста и развития ансамбля микротрещин. В диапазоне реальных контактных нагрузок составляющая АЭ, определяемая термоактивационным механизмом, вносит определенный вклад.

Исходные предпосылки для построения модели

Предположим, что контактная область состоит из N ячеек (связей), каждая из которых представляет собой некоторый объем материала и характеризуется критическим напряжением разрыва $\sigma_{кр}$, а вся контактная область – некоторой функцией распределения ячеек по прочности в начальный момент времени $N(\sigma, 0)$ (рисунок 1).

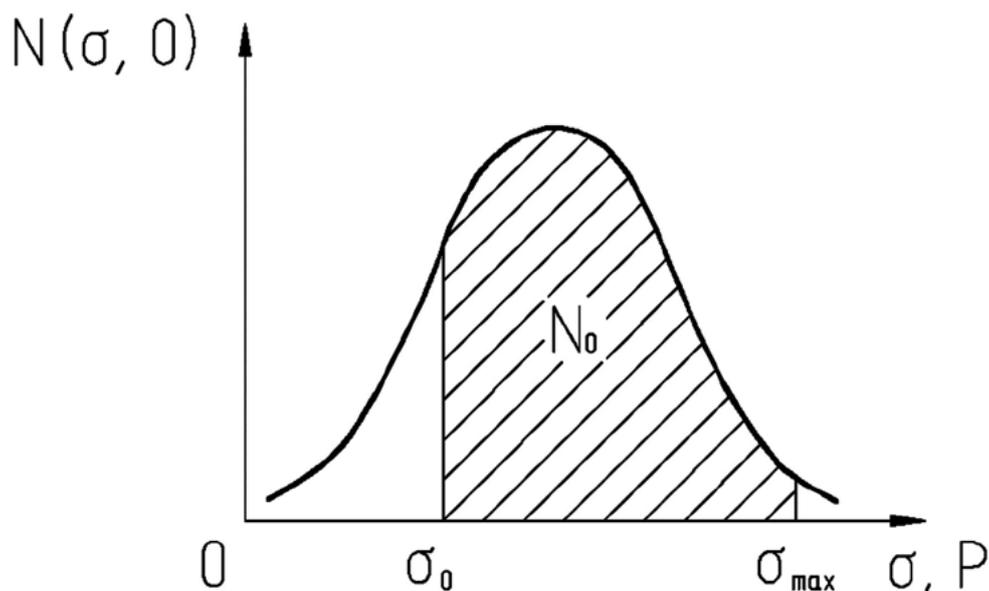


Рис. 1. Распределение ячеек образца по прочности

В статике ячейки совершают термические колебания относительно положения равновесия, однако кинетическая энергия этих колебаний при нормальных условиях не превышает энергию активации разрушения материала U_0 , поэтому отрыва ячеек не происходит.

При трении под действием нагрузки энергетический барьер понижается, и все ячейки, в которых касательные напряжения превышают критическое напряжение разрыва, разрушаются с отделением частицы износа.

Разрушение каждой ячейки сопровождается излучением одного импульса АЭ, поэтому количество ячеек, разрушаемых в единицу времени, соответствует термоактивированной составляющей активности АЭ [5].

Все ячейки, для которых касательные напряжения σ_t не превышают критического напряжения $\sigma_{кр}$, «ожидают» термоактивированный разрыв на протяжении времени t_p , определяемого согласно критерию суммирования повреждений Бейли [8]:

$$\int_0^{t_p} \frac{dt}{\tau_d(\sigma)} = 1, \quad (2)$$

где t_p – время до разрушения при заданном режиме нагружения $\sigma = \sigma(t)$, $\tau_d(\sigma)$ – долговечность материала ячейки при напряжении σ .

Зависимость долговечности ячейки от действующего на неё касательного напряжения σ описывается известной формулой С.Н. Журкова:

$$\tau_d = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right) \quad (3)$$

где τ_0 – постоянная, независящая от природы материала, имеет порядок 10^{-12} – 10^{-13} с, соответствует примерно периоду тепловых колебаний атомов в твердом теле; U_0 – энергия активации процесса разрушения; γ – структурно-чувствительный коэффициент; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Если $t_p \leq \frac{d}{v}$, где d – диаметр пятна контакта, а v – скорость скольжения, то t_p можно отождествить со временем жизни фрикционной связи.

Вывод определяющих соотношений

Можно установить функциональную связь между количеством фрикционных связей, разрушаемых в единицу времени термоактивированно, т.е. термоактивированной составляющей активности АЭ, и временем жизни фрикционной связи.

Пусть в начальный момент времени на образец действует нагрузка P , тогда количество ячеек с прочностью $\sigma > P$ определяется выражением

$$N_0 = N_0(\sigma, P) = \int_{\sigma_0}^{\sigma_{m\max}} N(\sigma, 0) d\sigma, \quad (4)$$

где σ_0 , $\sigma_{m\max}$ – соответственно, минимальная и максимальная прочности материала ячеек, превышающие действующую нагрузку.

Изменение числа ячеек за счет термоактивированного разрушения можно оценить из дифференциального уравнения

$$dN_0(\sigma, P) = - N_0(\sigma, P)W(\sigma, P)dt, \quad (5)$$

где $W(\sigma, P)$ – вероятность разрыва ячейки прочностью σ в единицу времени; $N_0(\sigma, P)$ – количество σ -ячеек при нагрузке P и скорости скольжения v . Решая это уравнение, получим

$$N_0(\sigma, P) = C \exp\left(-\int_0^{d/v} W(\sigma, P) dt\right), \quad (6)$$

где C – постоянная, определяемая из начальных условий.

Предположим, что за время dt нагрузка изменилась на величину dP . В этом случае изменение числа σ -ячеек (фрикционных связей) за счет термоактивированного разрушения описывается дифференциальным уравнением

$$dN_1(\sigma, P) = -N_1(\sigma, P)W(\sigma, P)dt, \quad (7)$$

где $N_1(\sigma, P)$ – количество σ -ячеек, оставшихся целыми при увеличении нагрузки на dP .

Решая это уравнение и находя постоянную интегрирования из условия, что при нагрузке P число σ -ячеек равно $N_0(\sigma, P)$, получаем

$$N_1(\sigma, P) = N_0 \exp\left(-\int_0^{d/v} W(\sigma, P) dt\right). \quad (8)$$

Количество σ -ячеек, разрушающихся за время жизни фрикционной связи, составляет

$$N_T(\sigma, P) = N_0(\sigma, P) - N_1(\sigma, P) = N_0(\sigma, P) \left[1 - \int_0^{d/v} W(\sigma, P) dt\right]. \quad (9)$$

Дифференцируя $N_T(\sigma, P)$ по времени, получим число σ -ячеек, разрушаемых термоактивированно в единицу времени, т.е. активность АЭ, регистрируемую ПЭП.

При разрушении dN_T ячеек в единицу времени возникает суммарный импульс АЭ с амплитудой, определяемой выражением

$$dz(t) = dN_T \sigma(t). \quad (10)$$

Тогда суммарный сигнал АЭ от разрушения ансамбля ячеек (фрикционных связей) в интервале времени регистрации τ будет равен

$$z(t) = \int_0^t N_T(\tau)\sigma(t - \tau)dt. \quad (11)$$

Необходимо учитывать, что на выходной сигнал оказывает существенное влияние форма импульса механического напряжения, возникающего при разрушении фрикционной связи.

Заключение

1 Предложена модель возникновения акустической эмиссии при трении твердых тел, основанная на представлении зоны контакта как ячеистой излучающей структуры.

2 С использованием представлений кинетической теории прочности получены выражения, позволяющие оценить активность и амплитуду сигнала акустической эмиссии при трении твердых тел.

Литература

1. Мышкин, Н.К. Диагностика изнашивания трибосопряжений / Н.К. Мышкин, Холодилов О.В., Лозовский В.Н. // Энциклопедия в 40 т.: т. IV–1. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. М.: Машиностроение (1995), 253–258
2. Акустические и электрические методы в триботехнике / А.И. Свириденко [и др.]; под ред. В.А. Белого. – Мн.: Наука и техника. – 1987. – 280 с.
3. Баранов, В.М. Акустическая эмиссия при трении / В.М. Баранов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат. – 1998. – 256 с.
4. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
5. Вайнберг, В.Е. Применение кинетической концепции разрушения для расчета интенсивности акустической эмиссии / В.Е. Вайнберг, А.Ш. Кантор, Р.Г. Лупашку // Дефектоскопия. – 1976. – №3. – С. 89–96.
6. Гарбар, И.И. Некоторые закономерности формирования структуры металла при трении / И.И. Гарбар // Трение и износ. – 1981. – № 6. – С. 1076–1084.
7. Цеснек, Л.С. Механика и физика истирания поверхностей / Л.С. Цеснек. – М.: Наука, 1979. – 264 с.
8. Вэйлей, Дж. Scratch – resisting power of glass and its measurement / Дж. Вэйлей // German Absh. – 1940. – V.19. – p. 291

Статья поступила в редакцию 15.10.12

**ПРИБОРЫ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ
НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО ДВУХПОЛЯРНОГО
ИМПУЛЬСНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ**

*Instruments of magnetic structurescopy based on the local bipolar
pulse magnetization*

Матюк В.Ф.

Matyuk V.F.

Описан принцип работы, устройство, назначение и технические характеристики приборов, реализующих импульсный метод магнитной структуроскопии с использованием двухполярного намагничивания. Рассмотрены особенности построения и работы приборов типа ИЛК и ИМА-6, созданных на протяжении ряда лет в лаборатории магнитных методов контроля Института прикладной физики НАН Беларуси.

The principle of operation, the structure, the purpose and technical characteristics of instruments implementing the pulsed method of magnetic structurescopy with bipolar magnetization are given. The characteristics of instruments such as ILK and IMA-6, created over the years in the laboratory of magnetic methods of control of the Institute of Applied Physics of National Academy of Sciences, are discussed.

Введение

В [1] рассмотрены особенности построения и возможности применения приборов импульсного магнитного контроля структурного состояния ферромагнитных сталей (приборов типа ИМА) с использованием локального однополярного импульсного намагничивания. Эти приборы позволяют решить широкий круг задач магнитной структуроскопии: контроль качества термообработки, механических свойств и структуры изделий из низкоуглеродистых и слаболегированных сталей толщиной от 0,15 до 30 мм после технологического отжига.

Среди материалов, применяющихся в машиностроении, большой удельный вес составляют конструкционные стали, изделия из которых подвергаются закалке с последующим отпускком. Основным методом контроля качества отпуска закаленных изделий из конструкционных сталей до сих пор является измерение твердости. Однако при измерении твердости стандартными методами с использованием инденторов повреждается поверхность изделия, что зачастую приводит к невозможности его

дальнейшего использования, информация снимается только с поверхностного слоя, что не дает представления о структурном состоянии всего изделия, а контроль проводится выборочно, что не гарантирует качества всех изделий из партии.

Основной проблемой неразрушающего контроля качества термообработки изделий из конструкционных сталей является неоднозначность между их основными магнитными свойствами и прочностными характеристиками в широком интервале изменения температур термообработки [2, 3]. Измерение в замкнутой магнитной цепи нескольких стандартных магнитных характеристик и построение множественной корреляционной модели в ряде случаев позволяет получить приемлемые корреляционные связи [4]. Однако процесс измерения этих характеристик малопроизводителен, возникают трудности с обеспечением стабильности измерения отдельных характеристик, с отстройкой от влияния зазора между преобразователем и контролируемым изделием и с метрологическим обеспечением реализующих эти измерения приборов.

Не нашли широкого применения на практике и нетрадиционные методы магнитного контроля качества термообработки изделий из конструкционных сталей: по высоте и форме фигур Лиссажу (из-за низкой чувствительности и точности) [5], магнитоупругий метод (из-за необходимости упругого или ударного нагружения изделия в процессе испытаний) [6], по потерям на перемагничивание [7], по магнитным шумам [8], метод высших гармоник [9].

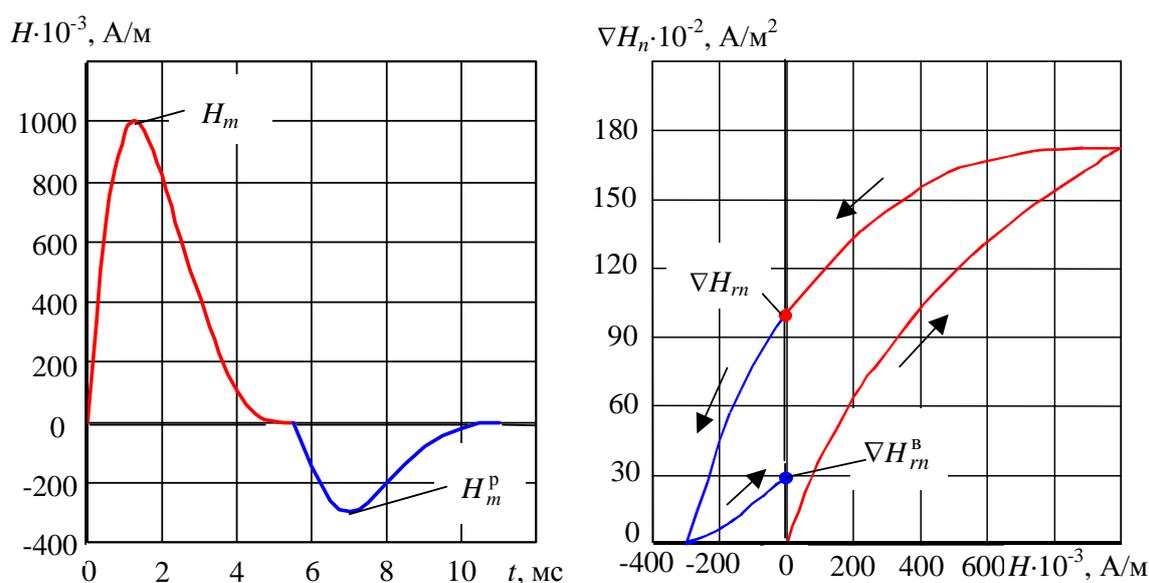
Измерение релаксационных магнитных характеристик (релаксационные коэрцитивная сила, намагниченность, магнитная индукция, магнитные восприимчивость и проницаемость) позволяет контролировать качество средне- и высокотемпературного отпуска изделий из конструкционных сталей [10]. Однако процесс их измерения довольно сложный. Поэтому более перспективно измерять остаточную магнитную индукцию или напряженность поля остаточной намагниченности после частичного размагничивания предварительно намагниченного изделия постоянным, переменным или импульсным магнитным полем [11].

В [1] показано, что импульсный магнитный метод с использованием локального однополярного намагничивания обладает рядом достоинств по сравнению с другими магнитными методами: возможность контроля как малогабаритных, так и крупногабаритных изделий, низкая чувствительность к колебаниям зазора между преобразователем и изделием, надежное метрологическое обеспечение.

Поэтому научный и практический интерес представляет дальнейшее развитие импульсного магнитного метода применительно к решению задачи неразрушающего контроля качества термообработки изделий из конструкционных сталей.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО ДВУХПОЛЯРНОГО ИМПУЛЬСНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ

Для неразрушающего контроля качества отпуска изделий из конструкционных сталей в Институте прикладной физики НАН Беларуси разработан метод, заключающийся (рис. 1) в локальном намагничивании контролируемого изделия до технического магнитного насыщения в одном направлении импульсным магнитным полем с амплитудой H_m , создаваемым соленоидом, ось которого перпендикулярна поверхности изделия, последующем воздействии на изделие импульсным магнитным полем этого же соленоида в противоположном направлении с амплитудой H_m^p , недостаточной для перемагничивания изделия, и измерении после окончания воздействия размагничивающего импульса градиента ∇H_{rn}^B нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности в центре намагниченного участка в направлении оси симметрии магнитного поля [12].



амплитуда импульсов: H_m – намагничивающего, H_m^p – размагничивающего;
 градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_n :
 ∇H_{rn} – после окончания намагничивающего и ∇H_{rn}^B – после окончания размагничивающего
 импульсов

Рис. 1. Принцип работы приборов магнитного контроля на основе локального двухполярного намагничивания

В [13] показано, что для изделий из сталей 35, 45, 40X, 45НХГМФА, 60С2 и 65Г за счет выбора амплитуды размагничивающего импульса H_m^p

можно получить однозначную связь между градиентом ∇H_{rn}^B нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности и температурой отпуска.

На рис. 2 представлены закономерности изменения величины ∇H_{rn}^B от температуры отпуска стали 65Г в зависимости от амплитуды размагничивающего импульса H_m^p [14] при амплитуде намагничивающего импульса $H_m = 1 \cdot 10^6$ А/м. Из него видно, что частичное размагничивание локально намагниченных до состояния технического насыщения изделий из стали 65Г импульсом магнитного поля амплитудой $H_m^p = 2 \cdot 10^5$ А/м обеспечивает однозначную связь между градиентом ∇H_{rn}^B и температурой отпуска данной стали в диапазоне изменения температуры от 100 до 600 °С.

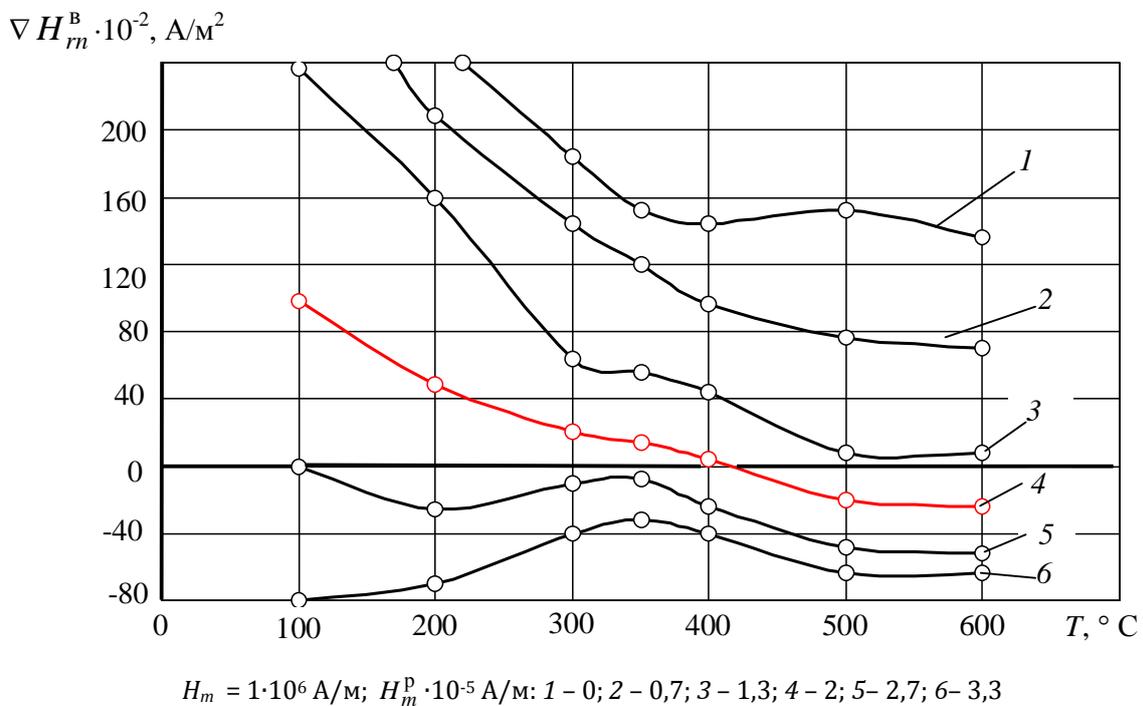


Рис. 2. Закономерности изменения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после окончания размагничивающего импульса от температуры отпуска стали 65Г при разных амплитудах размагничивающего импульса [14]

Реализация двухполярного импульсного намагничивания в приборах типа ИЛК

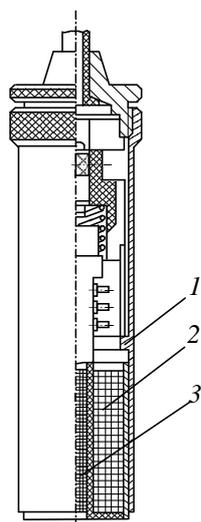
Метод контроля структурного состояния изделий из конструкционных сталей после их термообработки с использованием двухполярного импульсного намагничивания реализован в приборах типа “Импульс-

ный локальный контролер ИЛК” [15], “Импульсный локальный контролер ИЛК-2” [16], “Импульсный структуроскоп ИЛК-2А” [14, 17] и “Импульсный структуроскоп ИЛК-2Б” [18].

Приборы типа ИЛК применялись для контроля качества термической обработки изделий из углеродистых и низколегированных сталей с содержанием углерода более 0,3%, например, сталей 35, 45, 40Х, 40ХН, 45ХМФА, 55С2, 60С2, 65Г, а также других сталей, для которых была установлена однозначная связь между показаниями прибора и контролируемым параметром, использовались для сортировки изделий из сталей, магнитные свойства которых существенно изменяются при термообработке, на термически обработанные и необработанные [19].

Приборы ИЛК разных модификаций имели один и тот же преобразователь (рис. 3) и близкое по сути построение функциональных схем. Отличие приборов состояло в технической реализации этих схем и разном конструкторском исполнении.

Преобразователь у всех модификаций приборов данного типа аналогичен преобразователю прибора ИМА-2А [1] и состоит из намагничивающего соленоида, имеющего внутренний диаметр 6 мм, внешний диаметр 22 мм (увеличен по сравнению с преобразователем прибора ИМА-2А) и длину 30 мм, и феррозонд-градиентометра. Во всех приборах использовался феррозонд-градиентометр диаметром 4,5 мм и длиной 28 мм, питаемый переменным напряжением синусоидальной формы частотой 10 кГц. Данный феррозонд без использования компенсационных схем обеспечивает измерения градиента магнитного поля до $3,1 \cdot 10^4$ А/м.



1 – корпус, 2 – намагничивающий соленоид,
3 – феррозонд-градиентометр

Рис. 3. Преобразователь
приборов типа ИЛК

На рис. 4 представлена функциональная схема прибора ИЛК [15]. Прибор состоит из преобразователя, устройства формирования импульсов намагничивания-размагничивания и измерительного блока.

Устройство формирования импульсов намагничивания-размагничивания содержит два формирователя импульсов, один из которых формирует намагничивающий, а второй – размагничивающий

импульсы тока, которые, проходя через намагничивающий соленоид преобразователя, последовательно намагничивают, а затем частично размагничивают контролируемое изделие. Формирование импульсов тока осуществляется на основе заряда-разряда конденсаторов, причем амплитуда намагничивающего импульса фиксирована и составляет $1 \cdot 10^6$ А/м, а размагничивающего – изменяется в пределах от 0 до $3 \cdot 10^5$ А/м посредством установки соответствующего напряжения заряда конденсатора. Особенностью функциональной схемы прибора ИЛК является наличие блока, осуществляющего задержку размагничивающего импульса относительно намагничивающего на время прохождения намагничивающего импульса и окончания процессов релаксации, что повышает стабильность результатов контроля.

Устройство возбуждения феррозонда содержит генератор переменного напряжения частотой 20 кГц, которое служит для управления работой синхронного детектора измерительного устройства и, после деления и усиления, питает обмотку возбуждения феррозонда.

Измерительное устройство осуществляет выделение второй гармоники из сигнала, снимаемого с измерительной обмотки феррозонда, ее деление до требуемого уровня, детектирование и индикацию. Синхронное детектирование позволяет определять не только величину, но и знак сигнала, который пропорционален градиенту нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после окончания размагничивающего импульса.

Технические характеристики прибора ИЛК представлены в табл. 1.

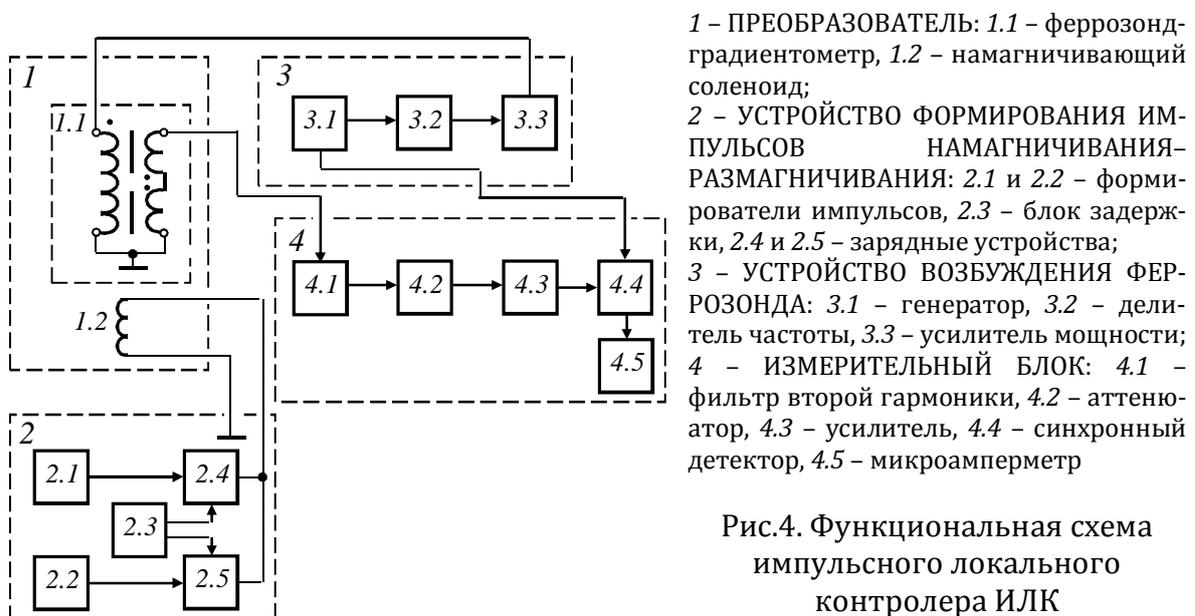


Рис.4. Функциональная схема импульсного локального контролера ИЛК

Отличительной особенностью прибора ИЛК-2 [16] является стабилизация амплитуды размагничивающего импульса [20] (что повысило

повторяемость результатов контроля), увеличение в 1,3 раза амплитуды намагничивающего и небольшое сужение диапазона установки амплитуды размагничивающего импульсов (табл. 1).

Однако степень стабилизации ограничена токами утечки элементов схемы из-за задержки между временем окончанием заряда и временем начала разряда емкости разрядной цепи.

Основным отличием импульсного структуроскопа ИЛК-2А [14, 17] является усовершенствование принципиальной электрической схемы, что позволило уменьшить погрешность измерения градиента напряженности поля остаточной намагниченности с 15 до 5 %, и иное конструктивное решение.

Таблица 1. Технические характеристики приборов типа ИЛК

Характеристика	Тип прибора			
	ИЛК (ИЛК-1)	ИЛК-2	ИЛК-2А	ИЛК-2Б
Амплитуда намагничивающего импульса, А/м	1·10 ⁶	1,3·10 ⁶	1·10 ⁶	1·10 ⁶
Амплитуда размагничивающего импульса, А/м ×10 ⁵	0-3,0	0,044-4,4	0,05-5	0,05-5
Диапазон измерения градиента ∇H_{rn}^B напряженности магнитного поля, А/м ² ×10 ³	0-28	0-28	0-28	0-28
Погрешность измерения градиента ∇H_{rn}^B , %, не более	-	15	5	5
Погрешность из-за изменений зазора, на 0,1 мм, %, не более	-	1,5	1,5	1,5
Продолжительность цикла измерения, с	-	5±2	5±2	5±2
Потребляемая мощность, В·А (намагничивание/измерение)	600/60	800/80	800/80	-
Диаметр контактной площадки преобразователя, мм	22	20	20	20
Габаритные размеры, мм×мм×мм	440×360×150	440×360×183	392×520×175	770×580×1285
Масса, кг, не более	12	16	15	120

Импульсный структуроскоп ИЛК-2Б построен на основе прибора ИЛК-2А с целью автоматической регистрации результатов контроля цифropечатающим устройством. Для этого используется информационно-измерительная система ИИС К200/9 и печатающее устройство типа ЭУМ-23. Конструктивно прибор ИЛК-2Б выполнен в виде стойки на базе типовой конструкции УТК КЭ СП1-2У3 ОСТ 25-54-78).

Внешний вид приборов типа ИЛК представлен на рис. 5.



Рис. 5. Приборы типа ИЛК

Широкое применение импульсных локальных контролеров и структуроскопов типа ИЛК сдерживалось недостаточной стабильностью и чувствительностью контроля структурного состояния изделий из некоторых марок сталей после проведенной термической обработки, обусловленная недостаточной стабильностью и неоптимальным выбором формы, длительности и амплитуды намагничивающего и размагничивающего импульсов, что особенно сказывалось при контроле изделий большой толщины, а также чувствительностью к магнитной предыстории контролируемого изделия.

Существенным ограничением возможностей импульсного магнитного контроля с помощью приборов ИЛК является использование только одного магнитного параметра – градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после окончания размагничивающего импульса.

Повышение достоверности контроля с использованием двухполярного импульсного намагничивания

Повышение стабильности формирования импульсов магнитного поля

В большинстве случаев импульсное магнитное поле формируется посредством разряда батареи конденсаторов через соленоид или систему соленоидов. Особенностью генераторов импульсных магнитных полей, используемых в приборах импульсного магнитного контроля, является широкий диапазон величин изменения их амплитуды. Стабильность амплитуды импульсов в случае, когда их величина достаточна для доведения материала до технического насыщения, не имеет принципиального значения. В случае небольших амплитуд импульсов, например, при работе в режиме частичного размагничивания изделия, следует предпринимать специальные меры для их стабилизации [21].

Формирование импульсов магнитного поля посредством заряда-разряда батареи конденсаторов через соленоид [20, 22, 23] не обеспечивает высокую точность формирования импульсов, существенно отличающихся по амплитуде. Это связано с тем, что установление требуемой амплитуды импульсов основано на сравнении напряжения заряда батареи конденсаторов с соответствующим уровнем напряжения, а точность сравнения зависит от абсолютных значений сравниваемых величин.

Помимо точности сравнения соответствующих уровней напряжения, точность заряда батареи конденсатора определяется и величиной зарядного тока, влияющего на превышение требуемого уровня напряжения заряда с момента срабатывания блока сравнения до прекращения тока заряда.

Повысить точность формирования импульсов магнитного поля требуемой амплитуды при использовании для этого цикла заряда-разряда батареи конденсаторов, особенно при малых значениях ее величины, можно за счет быстрого заряда батареи конденсаторов с превышением необходимого уровня напряжения и последующего устранения этого превышения посредством ее медленного разряда до требуемого уровня [24, 25].

Испытания генератора импульсов магнитного поля, разработанного по такому принципу, показали, что отклонения амплитуды генерируемых им импульсов магнитного поля величиной $2,4 \cdot 10^5$ А/м от установленного значения не превышают $\pm 0,3$ %, а величиной $1 \cdot 10^4$ А/м – $\pm 0,7$ %. В то же время отклонения в этих случаях амплитуды формируемых импульсов без превышения заданного уровня заряда и медленного разряда батареи конденсаторов составляют $\pm 0,5$ % и ± 4 % соответственно, что в 1,7 и 5,7 раз хуже, чем обеспечивает описываемый генератор.

Совершенствование блока измерения градиента магнитного поля

В приборах магнитной дефектоскопии, структуроскопии, толщинометрии и для определения степени намагниченности ферромагнитных изделий широко используются преобразователи Холла и феррозонды. Последние характеризуются высокой чувствительностью (до 10^{-8} Тл) и предпочтительнее при построении средств контроля структурного состояния изделий и магнитной дефектоскопии [21].

Необходимость измерения градиента индукции или напряженности магнитного поля возникает при измерении неоднородных магнитных полей, например, при импульсном магнитном методе контроля [26]. В приборах, реализующих этот метод, для расширения диапазона линейности и повышения точности измерений используется компенсационный метод. При этом компенсирующее поле создается либо специальными последовательно-встречно включенными обмотками, намотанными поверх измерительных и подключенными к источнику компенсирующего напряжения [23], либо для этих целей используются сами последовательно-встречно включенные измерительные обмотки, которые через разделительную цепь подключаются к этому же источнику [27].

Однако при использовании специальных компенсирующих обмоток увеличиваются размеры преобразователя и требуется относительно большая мощность для их питания. При необходимости использования в приборе нескольких типов преобразователей, например, преобразователя для измерения нормальной и преобразователя для измерения тангенциальной составляющих градиента магнитного поля, требуются отдельные каналы измерения для каждого из них. Кроме того, в современных приборах должны быть предусмотрены автоматический и дистанционный выбор поддиапазона и дистанционный съем результатов измерений.

Для реализации этой задачи в ИПФ НАН Беларуси разработан феррозондовый градиентометр, в котором для компенсации измеряемого градиента используются измерительные обмотки феррозонда, предусмотрены автоматический и дистанционный выбор поддиапазона измерения, дистанционный съем результатов измерения и возможность подключения различных типов феррозондовых преобразователей без введения дополнительных каналов измерения [28, 29]. Он может применяться как самостоятельно, так и быть встроенным в другие средства измерений.

При использовании в градиентометре феррозондов приборов типа ИМА [1] верхний предел измерения составляет $2 \cdot 10^5$ А/м² при хорошей линейности, температурная погрешность измерений в интервале 5–50 °С

не превышает 0,15 % на 10 °С, диаметр преобразователя уменьшен примерно в 2 раза, а мощность источника компенсационного тока – в 4 раза.

Снижение влияния магнитной предыстории

Случайная намагниченность ферромагнитных изделий является мешающим фактором при контроле режима их термообработки или механических свойств магнитными методами [30, 31]. Для ослабления ее влияния на результаты контроля проводится операция размагничивания, либо применяется специальный режим намагничивания – намагничивание двухполярным групповым импульсом, формируемым током промышленной сети [32].

Оценка влияния магнитной предыстории на погрешность измерений применительно к импульсному магнитному методу контроля качества термообработки изделий из конструкционных сталей [33, 34] показала, что влияние магнитной предыстории на результаты измерений зависит от уровня предварительной намагниченности изделия, ее полярности, измеряемого параметра и свойств изделия. Если градиент ∇H_{rn}^n предварительной намагниченности меньше по абсолютной величине градиента ∇H_{rn0} , создаваемого при намагничивании размагниченного образца импульсным магнитным полем с амплитудой H_m , то влияние магнитной предыстории на величину градиента ∇H_{rni} минимально (до 5–7 %). При превышении градиентом ∇H_{rn}^n по абсолютной величине градиента ∇H_{rn0} влияние магнитной предыстории усиливается, причем несимметрично относительно полярности градиента ∇H_{rn0} (погрешность значительно выше, если намагничивающий импульс создает остаточную намагниченность с тем же направлением градиента, что имеет градиент предварительной намагниченности – до 75 % на магнитотвердом образце). Если намагничивающий импульс создает остаточную намагниченность с градиентом, противоположным по направлению градиенту предварительной намагниченности, то максимальная погрешность находится на уровне до 10 %.

Влияние магнитной предыстории на величину градиента ∇H_{rn}^p после частичного размагничивания изделия носит более сложный характер и зависит от выбора величины размагничивающего импульса и от свойств изделия. Для магнитомягкого образца при величине предварительной намагниченности с градиентом в пределах $\pm \nabla H_{rn}^n$ погрешность измерения градиента ∇H_{rni}^p невысока и зависит от свойств образца, к

которому привязана амплитуда размагничивающего импульса, незначительно. За пределами этого диапазона погрешность резко увеличивается, причем она существенно больше в случае, если намагничивающий импульс создает остаточную намагниченность с тем же направлением градиента, что имеет градиент предварительной намагниченности. Для магнитожесткого образца минимальное влияние предварительной намагниченности наблюдается в случае привязки амплитуды размагничивающего импульса к этому образцу.

Установленные закономерности показали, что погрешность из-за магнитной предыстории можно снизить, если направление намагничивающего импульса выбрать таким образом, чтобы создаваемая им намагниченность имела градиент, противоположный по направлению к градиенту предварительной намагниченности. На основе этой закономерности разработан новый способ контроля [35].

Сущность этого способа состоит в том, что, прежде чем начать намагничивание изделия, определяют наличие и направление градиента ∇H_{rn}^n нормальной составляющей напряженности его случайной остаточной намагниченности. После этого изделие намагничивают импульсным магнитным полем с амплитудой H_m в таком направлении (определяется заранее), чтобы создаваемый им на изделии градиент ∇H_{rn0} был противоположен по направлению градиенту ∇H_{rn}^n нормальной составляющей напряженности поля случайной остаточной намагниченности изделия. После окончания намагничивания измеряют величину градиента ∇H_{rn0} нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности в центре намагниченного участка. Затем изделие размагничивают импульсным магнитным полем противоположного намагничивающему полю направления с амплитудой H_{m1}^p . Эта амплитуда выбирается заранее из условия, чтобы после размагничивания отпущенного при максимальной температуре для данного типа изделий (эталонного изделия), величина градиента ∇H_{rn1}^p нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности в центре намагниченного участка изделия была равна нулю. После окончания размагничивания измеряют величину градиента ∇H_{rn1}^p от намагниченного участка контролируемого изделия, а о качестве термообработки судят по сумме измеренных градиентов $\nabla H_{rn0} + \nabla H_{rn1}^p$.

Магнитная подготовка изделия двумя или несколькими сериями из двух импульсов противоположной полярности в случае, если направление первого импульса привязано к направлению градиента предвари-

тельной намагниченности, позволяет снизить ее влияние на результаты контроля. Для этого направление первого импульса в серии должно быть выбрано таким образом, чтобы создаваемая им намагниченность имела градиент, противоположный по направлению к градиенту предварительной намагниченности [36]. При данном способе отстройки от влияния предварительной намагниченности удастся снизить погрешность контроля до 1 % даже при уровне градиента случайной намагниченности порядка $7 \cdot 10^4$ А/м².

Оптимизация режима измерений

В процессе импульсного намагничивания в изделии возникают вихревые токи значительной величины, которые существенно влияют на вид кривой намагничивания и петли магнитного гистерезиса по остаточной намагниченности [37, 38].

Оценка влияния магнитного поля вихревых токов, возникающих в изделии в процессе воздействия на него локального импульсного магнитного поля амплитудой от $2 \cdot 10^4$ до $5,2 \cdot 10^5$ А/м и длительностью τ от 0,5 до 100 мс, на результаты импульсного намагничивания изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей, проведенная в [39], показала, что для материалов с высокой электропроводностью при длительности импульсов τ от 0,5 до 4 мс максимальная величина напряженности магнитного поля, создаваемого вихревыми токами, может достигать 40 % от амплитуды первичного магнитного поля. Демпфирование разрядной цепи диодом уменьшает вихревые токи только от заднего фронта намагничивающего импульса и эффективно при его длительности до 7–8 мс. Там же показано, что для ослабления влияния магнитного поля от вихревых токов на результаты импульсного намагничивания конструкционных среднеуглеродистых сталей скорость нарастания намагничивающего поля должна быть не более $150 \cdot 10^6$ А/(м·с), а скорость спада – не более $8 \cdot 10^6$ А/(м·с).

В [40, 41] установлено, что намагничивание изделий импульсным магнитным полем с амплитудой $H_m \geq 3,8 \cdot 10^5$ А/м без последующего размагничивания обеспечивает высокую чувствительность градиента ∇H_m к низкотемпературному отпуску независимо от длительности импульсов (примерно 250 А/(м²·°С)), однако контроль среднетемпературного и высокотемпературного отпуска изделий из стали 45 в этом режиме реализовать невозможно из-за неоднозначности и низкой чувствительности (рис. 6). Показано также, что магнитная стабилизация закаленных изделий без отпуска требует минимального числа циклов намагничивания

при минимальной амплитуде импульсов, а отпущенных после закалки изделий – при максимальной. Влияние количества намагничивающих импульсов на ход зависимостей градиента напряженности поля остаточной намагниченности от температуры отпуска наиболее заметно при их малом значении и амплитуде импульсов $H_m \leq 1,0 \cdot 10^5$ А/м. При $H_m = 2,5 \cdot 10^5$ А/м это влияние практически отсутствует.

Чувствительность измеряемого после локального импульсного намагничивания и последующего размагничивания градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_m^B к температуре отпуска изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей неодинакова по диапазону изменения температуры и определяется длительностью намагничивающего и размагничивающего импульсов и амплитудой H_m^P размагничивающего импульса (рис. 7). Так, намагничивание и частичное размагничивание контролируемого изделия импульсами в форме апериодического разряда конденсатора при их длительности по уровню 0,05 не менее 3,5 мс режим, при котором достигается полное размагничивание изделий, подвергнутых отпуску при максимальной температуре, обеспечивает однозначность контроля в диапазоне температур среднего и высокого отпуска [40, 41].

Аналогичные закономерности были установлены и на изделиях из других среднеуглеродистых сталей. При этом оптимальная амплитуда размагничивающего импульса зависит от марки стали, размеров и формы изделий, длительностей намагничивающего и размагничивающего импульсов и их числа.

На основе этих исследований разработана новая методика контроля качества отпуска изделий из среднеуглеродистых сталей [42]. Сущность ее (рис. 7, а, б) заключается в том, что контролируемое изделие вначале намагничивают импульсом магнитного поля в форме апериодического разряда конденсатора длительностью не менее 3,5 мс и амплитудой H_m , превышающей коэрцитивную силу изделия. Затем изделие частично размагничивают импульсом магнитного поля той же формы и длительности, но противоположного направления. Амплитуда размагничивающего импульса H_{ml}^P выбирается заранее из условия полного размагничивания намагниченного участка эталонного изделия из числа контролируемых, подвергнутого отпуску при максимальной температуре. После этого измеряют градиент ∇H_m^B и определяют искомую температуру по заранее установленной корреляционной температурной зависимости измеренной величины.

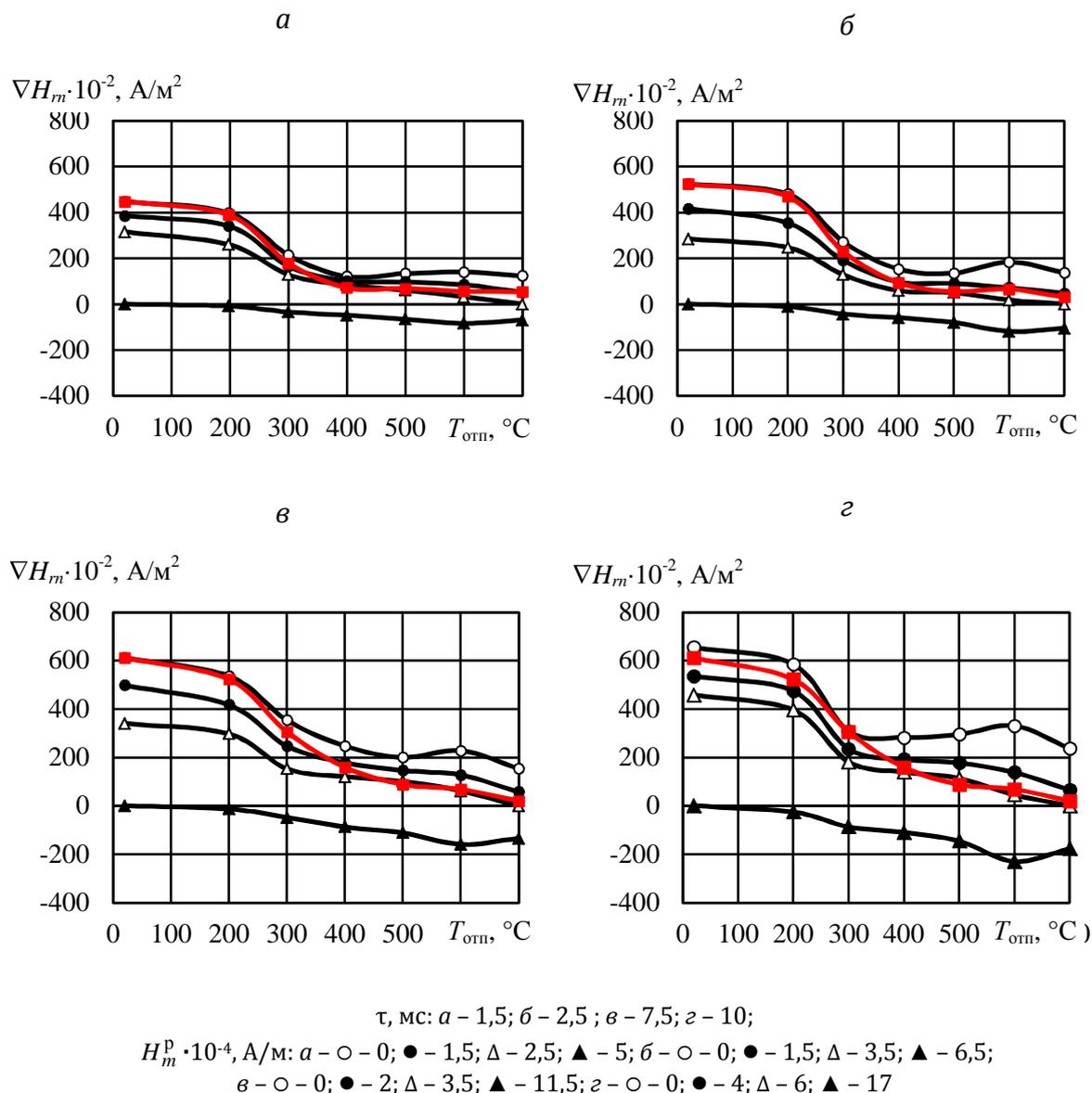
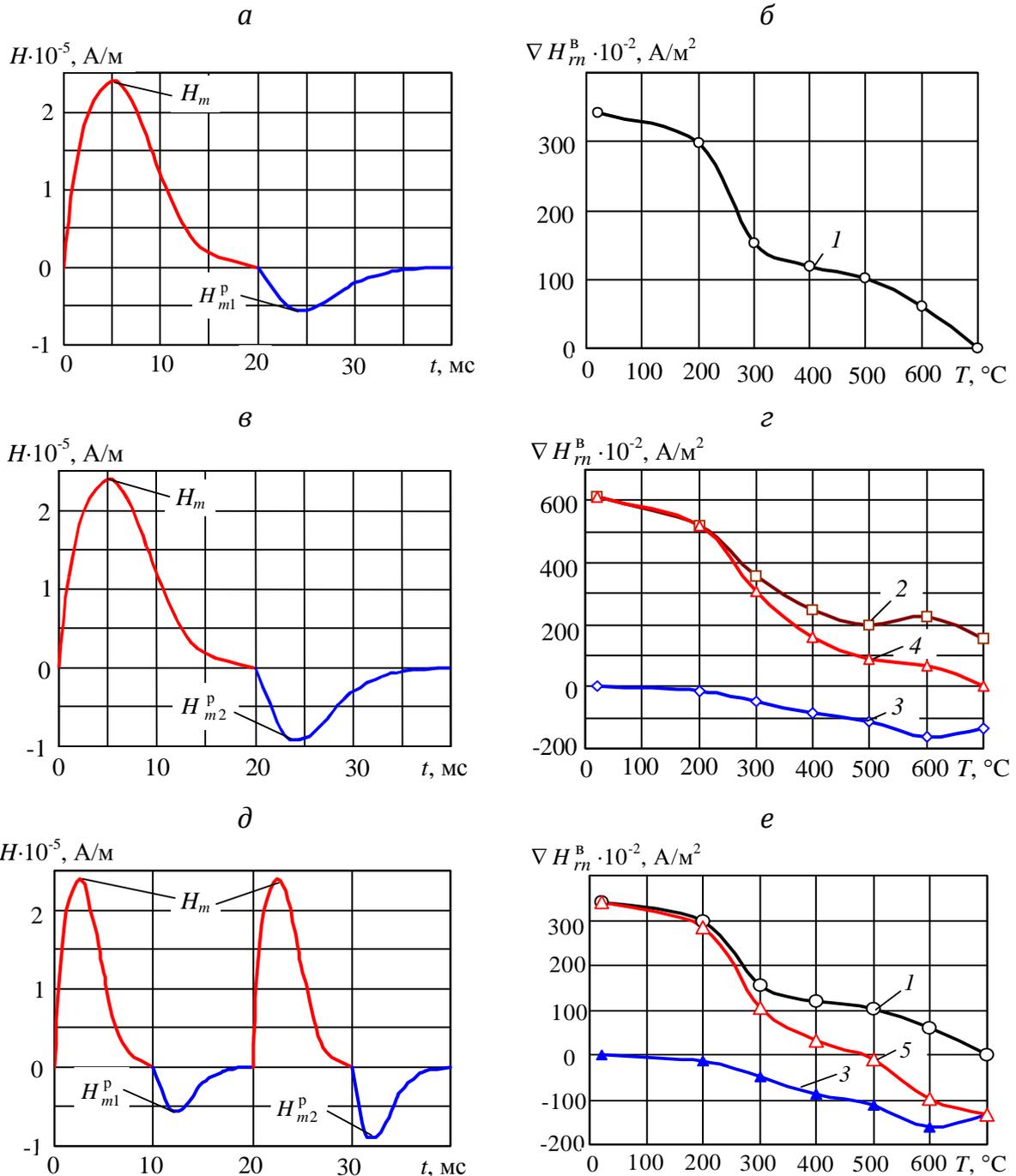


Рис. 6. Влияние длительности и амплитуды размагничивающего импульса на зависимость градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности и на сумму (■) градиентов после намагничивающего и после размагничивающего импульсов при привязке к закаленному изделию от температуры отпуска стали 45.

Определение суммы градиентов ∇H_m^B , измеренных после окончания намагничивающего (H_m) и после окончания размагничивающего (H_{m2}^p) импульсов, с привязкой амплитуды последнего к закаленным изделиям (рис. 7, в, г) позволяет увеличить в 1,5–2 раза чувствительность контроля к температуре отпуска во всем интервале ее изменения при практически линейной связи между ними [43]. Средняя чувствительность в этом диапазоне изменения температуры составляет 86 А/(м²·°С), а в диапазоне от 200 до 700 °С – 107 А/(м²·°С).



полное размагничивание изделия: H_{m1}^p – с максимальной температурой отпуска, H_{m2}^p – закаленного; ∇H_m^B после окончания: 1 – H_{m1}^p , 2 – H_m , 3 – H_{m2}^p ;
 сумма ∇H_m^B после окончания: 4 – H_m и H_{m2}^p , 5 – H_{m1}^p и H_{m2}^p

Рис. 7. Последовательность намагничивающих и размагничивающих импульсов (а, в, д) и зависимость градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагнитченности локально намагнитченного изделия (б, г, е) от температуры отпуска (сталь 45, $T_{зак} = 850$ °С)

Хорошие результаты получаются и при контроле по сумме градиентов ∇H_m^B , измеренных после локального размагничивания намагниченного изделия импульсами разной амплитуды (рис. 7, д, е), первая из которых привязана к изделию, отпущенному при максимальной для испытуемого типа изделий температуре (изделию с минимальной коэрцитивной силой) – H_{m1}^P , а вторая – к закаленному изделию (изделию с максимальной коэрцитивной силой) – H_{m2}^P [44]. При этом средняя чувствительность во всем диапазоне изменения температуры отпуска составляет 68 А/(м²·°С), а в диапазоне от 200 до 700 °С – 110 А/(м²·°С) (рис 7, е).

Повышение чувствительности градиента ∇H_m^B , измеряемого после окончания намагничивающего и после окончания размагничивающих импульсов, к изменению температуры отпуска за счет выбора амплитуды размагничивающего импульса связана с разным ходом зависимостей ∇H_m^B от температуры при низкотемпературном, среднетемпературном и высокотемпературном отпуске для разных значений H_m^P . Так градиент, измеренный после намагничивающего импульса (H_m), более чувствителен к изменению температуры при низкотемпературном и среднетемпературном отпуске и очень слабо (причем неоднозначно) зависит от температуры при высокотемпературном отпуске. В то же время градиент, измеренный после размагничивающего импульса с привязкой его амплитуды к размагниченному состоянию закаленного изделия (H_{m2}^P), более чувствителен к изменению температуры отпуска в диапазоне от 200 до 600 °С, а после размагничивающего импульса с привязкой его амплитуды к магнитному состоянию отпущенного при максимальной для данного типа изделий температуре (H_{m1}^P) – от 200 до 300 °С и от 600 до 700 °С.

Анализатор импульсный магнитный ИМА-6

На основе представленных выше результатов исследований и разработанных на их основе новых способов импульсного магнитного контроля температуры отпуска изделий машиностроения из конструкционных сталей разработан прибор "Анализатор импульсный магнитный ИМА-6" [45], который представляет собой следующий модельный ряд приборов, реализующих импульсный магнитный метод неразрушающего контроля структурного состояния ферромагнитных материалов и изделий из них. Он предназначен для контроля качества термообработки, механических свойств и микроструктуры изделий из низкоуглеродистых, среднеуглеродистых и низколегированных холоднокатаных и горячекатаных сталей. Прибор может также использоваться для сортировки сталей по маркам и для оценки степени намагниченности изделий.

Принцип работы этого прибора заключается в локальном импульсном намагничивании или в намагничивании и последующем частичном размагничивании контролируемого изделия неоднородным импульсным магнитным полем накладного соленоида, измерении градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после намагничивания, либо после размагничивания, либо в обоих случаях и в определении по величине измеренных градиентов или по величине их суммы на основе заранее установленных корреляционных связей (согласно ГОСТ 30415-96 [46]) механических свойств или режима проведенной термообработки.

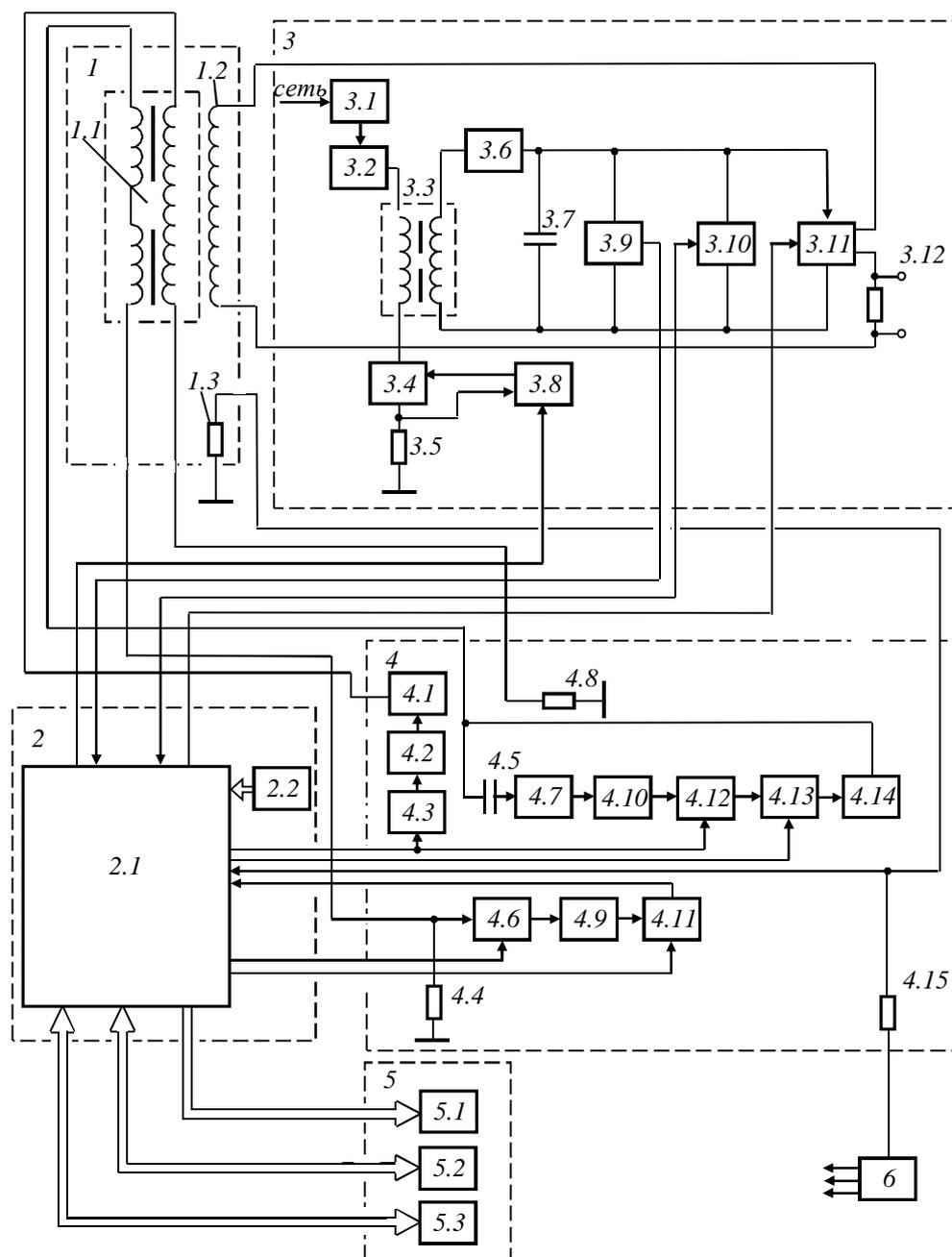
В отличие от предыдущих моделей приборов импульсного магнитного контроля, анализатор импульсный магнитный ИМА-6 может работать в режиме измерения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после локального импульсного намагничивания (режим приборов типа ИМА), режиме измерения градиента после частичного размагничивания (режим приборов типа ИЛК) и в режиме измерения суммы градиентов после намагничивания и после частичного размагничивания.

Первый режим работы прибора обеспечивает контроль механических свойств (твердость, предел прочности, предел текучести, относительное удлинение при разрыве) листовых холоднокатаных и горячекатаных низко- и среднеуглеродистых сталей толщиной до 30 мм, имеющих однозначную связь между контролируемыми свойствами и магнитными характеристиками после технологического отжига сталей. В этом режиме прибор может использоваться на металлургических предприятиях для выходного контроля и на машиностроительных предприятиях для входного контроля сталей.

Намагничивание и последующее частичное импульсное размагничивание изделия позволило реализовать контроль твердости среднеуглеродистых и слаболегированных сталей после их закалки и отпуска. В этом режиме прибор может использоваться на машиностроительных предприятиях для контроля качества термообработки изделий или их механических свойств, например, твердости.

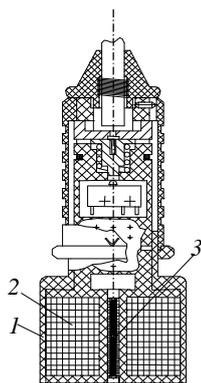
Измерение градиентов напряженности поля остаточной намагниченности после намагничивания и после частичного размагничивания и определение их суммы обеспечивает более высокую чувствительность и линейность показаний во всем диапазоне изменения температуры отпуска.

Для снижения влияния магнитной предыстории в приборе ИМА-6 предусмотрена магнитная подготовка изделия двумя импульсами противоположной полярности, причем направление первого импульса привязано к направлению градиента напряженности поля случайной намагниченности. Для усиления эффекта при контроле массивных изделий, имеющих случайную намагниченность, число пар импульсов магнитной подготовки может устанавливаться от 1 до 3.



1 - ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ: 1.1 - феррозонд-градиентометр, 1.2 - намагничивающий соленоид; 1.3 - опорный резистор; 2 - БЛОК УПРАВЛЕНИЯ: 2.1 - микроконтроллер, 2.2 - панель управления; 3 - ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ ТОКА: 3.1 - сетевой фильтр, 3.2 - выпрямитель, 3.3 - импульсный трансформатор, 3.4 - электронный ключ, 3.5 - токовый резистор, 3.6 - выпрямитель, 3.7 - конденсатор, 3.8 - ШИМ-контроллер, 3.9 - резистивный делитель напряжения, 3.10 - электронный ключ, 3.11 - электронный коммутатор, 3.12 - токовый резистор; 4 - БЛОК ИЗМЕРЕНИЯ: 4.1 - интегратор, 4.2 - усилитель-ограничитель, 4.3 - делитель частоты, 4.4 - резистор, 4.5 - конденсатор, 4.6 и 4.7 - усилители, 4.8 - резистор, 4.9 и 4.10 - фильтры, 4.11 - аналого-цифровой преобразователь, 4.12 - синхронный детектор, 4.13 - интегратор, 4.14 - источник тока, 4.15 - резистор; 5 - БЛОК ВЫВОДА ИНФОРМАЦИИ; 6 - БЛОК ПИТАНИЯ

Рис. 8. Функциональная схема прибора ИМА-6



1 – корпус, 2 – соленоид, 3 – феррозонд

Рис. 9. Импульсный магнитный анализатор ИМА-6

Таблица 2. Технические характеристики прибора ИМА-6

Амплитуда намагничивающих импульсов, А/м	$2,0 \cdot 10^4 - 2,4 \cdot 10^5 \pm 5\%$
Амплитуда размагничивающих импульсов, А/м	$1,0 \cdot 10^4 - 2,4 \cdot 10^5 \pm 5\%$
Шаг изменения амплитуды намагничивающих импульсов, А/м	$1,0 \cdot 10^4 \pm 5\%$
Шаг изменения амплитуды размагничивающих импульсов, А/м	$0,5 \cdot 10^4 \pm 5\%$
Диапазон показаний, А/м ²	$\pm(0-200) \cdot 10^3$
Диапазон измерения градиента напряженности магнитного поля, А/м ²	$\pm(0,2-200) \cdot 10^3$
Приведенная погрешность измерения градиента напряженности магнитного поля от конечного значения шкалы рабочего поддиапазона, %, не более	
первый поддиапазон	5
второй поддиапазон	5
третий поддиапазон	5
Индикация цифровая, количество разрядов	3,5 декады
Время установления рабочего режима, мин, не более	5
Время одного измерения, мин, не более	0,5
Максимальное число измерений в минуту	1
Время непрерывной работы в режиме ожидания, час, не менее	8
Мощность, потребляемая от сети, ВА, не более	
в режиме ожидания	17
в режиме импульсного намагничивания	160
Габаритные размеры, мм, не более:	
электронного блока	385×265×140
преобразователя	
диаметр	60
высота	150
Масса, кг, не более:	
электронного блока	7,5
преобразователя	0,8

Метрологическое обеспечение осуществляется с помощью меры градиента магнитного поля типа МГП-5Б [47] и не требует применения аттестованных образцов металла.

Функциональная схема прибора ИМА-6 представлена на рис. 8, общий вид – на рис. 9, а технические характеристики – в табл. 2.

Результаты испытаний

В табл. 3 представлены результаты корреляционного анализа экспериментальных данных, полученных с помощью прибора ИМА-6 на заготовках втулок из стали 45 с внутренним диаметром 24 мм, внешним диаметром 60 мм и высотой 18 мм, подвергнутых закалке в воду от температур 740, 820, 850, 850 (в масле) и 880 °С и последующему отпуску при 100, 200, 300, 400, 500, 600 и 700 °С [48]. Амплитуда намагничивающих импульсов составляла $2,4 \cdot 10^5$ А/м, а их количество – 5. Амплитуда размагничивающего импульса выбиралась исходя из результатов измерений на отпущенном при 700 °С и закаленном образцах для каждой

Таблица 3. Параметры корреляции показаний прибора ИМА-6 с температурой термообработки и твердостью заготовок втулок из стали 45

$T_{зак}, ^\circ\text{C}$	740	820	850	850 (масло)	880	
$H_{m1}^p \cdot 10^{-5}, \text{А/м}$	0,9	1,2	1,25	1,25	1,1	
$H_{m2}^p \cdot 10^{-5}, \text{А/м}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,45	
∇H_{rn}	R (по $T_{отп}$)	0,919	0,907	0,855	0,876	0,925
	σ (по $T_{отп}$), °С	4,8	5,3	5,93	6,5	5,7
	R (по HRC)	0,916	0,758	0,736	0,723	0,836
	σ (по HRC), HRC	1,7	3,4	3,7	3,6	3,2
∇H_{rn}^B при H_{m1}^p	R (по $T_{отп}$)	0,662	0,933	0,894	0,805	0,92
	σ (по $T_{отп}$), °С	5,8	3,4	4,2	6,3	3,8
	R (по HRC)	0,692	0,902	0,863	0,785	0,918
	σ (по HRC), HRC	1,52	1,0	1,3	1,6	1
∇H_{rn}^B при H_{m2}^p	R (по $T_{отп}$)	0,926	0,978	0,968	0,959	0,988
	σ (по $T_{отп}$), °С	3,9	3,1	3,1	3,7	2,6
	R (по HRC)	0,935	0,892	0,895	0,901	0,95
	σ (по HRC), HRC	1,0	1,3	1,2	1,2	0,9
$\nabla H_{rn} + \nabla H_{rn}^B$ при H_{m1}^p	R (по $T_{отп}$)	0,91	0,95	0,937	0,909	0,971
	σ (по $T_{отп}$), °С	4,3	3,9	3,8	4,8	3,5
	R (по HRC)	0,914	0,813	0,84	0,834	0,91
	σ (по HRC), HRC	1,1	1,4	1,4	1,4	1,2
$\nabla H_{rn} + \nabla H_{rn}^B$ при H_{m2}^p	R (по $T_{отп}$)	0,885	0,979	0,973	0,948	0,979
	σ (по $T_{отп}$), °С	3,8	2,6	2,4	3,2	2,5
	R (по HRC)	0,9	0,908	0,911	0,9	0,954
	σ (по HRC), HRC	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8

температуры закалки. Измерения проводились с использованием режима магнитной подготовки тремя парами импульсов. Корреляционная связь устанавливалась для градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после намагничивания, после последующего частичного размагничивания и для их суммы.

Из табл. 3 видно, что при измерении только величины ∇H_m коэффициенты корреляции R лежат в пределах от 0,723 до 0,925. Однако среднеквадратичное отклонение σ измерений достигает 6,5 °С (по температуре) и 3,7 HRC (по твердости), что связано с нелинейной зависимостью этого параметра от температуры отпуска. Следует также отметить уменьшение коэффициентов корреляции и увеличение σ с ростом температуры закалки.

Коэффициенты корреляции и среднеквадратичное отклонение при использовании в качестве параметра контроля только величины ∇H_m^B зависят от привязки амплитуды размагничивающего импульса к закаленному или отпущенному при максимальной температуре образцу. Так, привязка ∇H_m^B к отпущенному при 700 °С образцу обеспечивает коэффициент корреляции по температуре не менее 0,926 (при σ не более 3,9 °С), а по твердости – не менее 0,892 (при σ не более 1,3 HRC). При привязке ∇H_m^B к закаленному образцу коэффициенты корреляции несколько меньше, а среднеквадратичное отклонение больше и сильнее зависят от температуры закалки.

Контроль по сумме градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных после намагничивания и после частичного размагничивания изделия, характеризуется несколько большими значениями коэффициентов корреляции и меньшей величиной среднеквадратичного отклонения. Привязка амплитуды размагничивающего импульса к отпущенному при максимальной температуре образцу и в этом случае дает лучшие результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные на основе измерения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после локального импульсного намагничивания и частичного размагничивания приборы позволяют контролировать структурное состояние изделий машиностроения из конструкционных среднеуглеродистых марок сталей, подвергнутых низкотемпературному, среднетемпературному или высокотемпературному отпуску после закалки.

Намагничивание и частичное размагничивание контролируемого изделия импульсами магнитного поля в форме апериодического разряда

конденсатора длительностью более 3,5 мс каждый (по уровню 0,01) с привязкой амплитуды размагничивающих импульсов к размагниченному состоянию изделия, закаленного и отпущенного при минимально возможной температуре, и измерение суммы градиентов, измеренных после окончания намагничивающего и размагничивающего импульсов или после окончания двух разных по амплитуде размагничивающих импульсов, не только устраняет неоднозначность, но и повышает чувствительность контроля.

Литература

1. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 2, с. 29–64.
2. Морозова В.М., Михеев М.Н. Магнитные и электрические свойства закаленных и отпущенных углеродистых сталей. – Труды Института физики металлов, 1965, вып. 24, с. 26–35.
3. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
4. Бида Г.В., Шашков А.Н. Комплексное использование магнитных свойств сталей при неразрушающем контроле качества термообработанных деталей. – Дефектоскопия, 2003, № 4, с. 67–74.
5. Кузнецов И.А., Попов Э.И. Применение моста переменного тока для контроля качества закалки и высокого отпуска деталей из конструкционных сталей. – Дефектоскопия, 1969, № 5, с. 97–105.
6. Родигин Н.М., Сырочкин В.П. Магнитоупругий метод контроля режима термической обработки и механических свойств конструкционных сталей. – Дефектоскопия, 1974, № 6, с. 7–14.
7. Пономарев В.С., Францевич В.М., Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Прибор для контроля качества термической обработки малогабаритных изделий путем измерения электромагнитных потерь на перемагничивание в слабых магнитных полях. – Дефектоскопия, 1981, № 3, с. 23–27.
8. Венгринович В.Л., Бусько В.Н. Применение метода магнитных шумов для структуроскопии сталей. – Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук, 1994, № 1, с. 33–37.
9. Чернышев А.В., Зацепин Н.Н., Гусак Н.О. Контроль качества термической обработки при помощи метода высших гармоник. – Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук, 1983, № 4, с. 99–101.
10. Бида Г.В., Царькова Т.П., Костин В.Н., Сажина Ю.Е. Использование релаксационных магнитных свойств для неразрушающего контроля закаленных и отпущенных сталей. – Дефектоскопия, 1991, № 12, с. 39–44.
11. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы неразрушающего контроля структурного состояния и прочностных характеристик термически обработанных изделий (обзор). – Дефектоскопия, 1985, № 3, с. 3–21.
12. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д., Кратиров В.Б. Способ контроля механических свойств изделий из ферромагнитных материалов. Авт. свид. СССР № 728068. – Бюл. изобр., 1981, № 21, с. 261.

13. Мельгуй М.А., Кратиров В.Б. Контроль закалки некоторых углеродистых и легированных сталей. – В кн.: Материалы VIII Всесоюз. науч.-техн. конф. по неразрушающим физ. методам и средствам контроля, в 2 ч. – Ч. IIа – Кишинев, 1977, с. 198–201.
14. Мельгуй М.А., Кратиров В.Б. Прибор для контроля качества термической обработки сталей – импульсный структуроскоп ИЛК-2А. – В кн.: Научно-технические достижения. Межотраслевой научно-технич. сборник. – М.: ВИМИ, 1986, № 1, с. 81–84.
15. Мельгуй М.А., Кратиров В.Б. Прибор для контроля среднеуглеродистых и слаболегированных сталей – импульсный локальный контролер ИЛК. – В кн.: Новые физические методы и средства контроля промышленных изделий. Тезисы докл. II Белорусской республиканской научно-технич. конф. – Минск, 1978, с. 49–52.
16. Мельгуй М.А., Кратиров В.Б., Вальд А.А. Контроль качества термической обработки сталей, применяемых в авиастроении. – В кн.: Повышение надежности авиационной техники средствами неразрушающего контроля. Тезисы докл. IV Всесоюзной отраслевой научно-технич. конф. – М.: ОНТИ, 1983, с. 236–242.
17. Мельгуй М.А., Кратиров В.Б. Импульсный структуроскоп ИЛК-2А. – Дефектоскопия, 1984, № 10, с. 52–56.
18. Мельгуй М.А., Кратиров В.Б. Создать и изготовить опытные образцы импульсного локального контролера ИЛК-2Б для контроля качества термической обработки изделий из высокопрочной стали с автоматической регистрацией результатов производительностью 120 изделий в час. – Отчет о НИР, рег. № 81013267, Минск, 1984. – 96 с.
19. Мельгуй М.А., Шушканов В.М., Кратиров В.Б., Горбунова Н.В. Выявление термически не обработанных изделий из стали 12ХНЗМА. – Дефектоскопия, 1984, № 4, с. 89–91.
20. Кратиров В.Б. Импульсный генератор. Авт. свид. СССР № 790281. – Бюл. изобр., 1980, № 47, с. 289.
21. Испытания магнитных материалов и систем /Е.В. Комаров, А.Д. Покровский, В.Г. Сергеев, А.Я. Шихин. Под ред. А.Я. Шихина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
22. Осипов А.А., Матюк В.Ф. Генератор импульсов. Авт. свид. СССР № 1762391. – Изобрет., 1992, № 34, с. 204.
23. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д., Цукерман В.Л. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4А. – Дефектоскопия, 1986, № 11, с. 63–67.
24. Матюк В.Ф., Кратиров В.Б., Пинчуков Д.А., Бурак В.А. Генератор импульсов магнитного поля. – Патент РБ № 11677. – Афіцыйны бюлетэнь, 2009, № 1, с. 117.
25. Матюк В.Ф., Бурак В.А., Осипов А.А., Пинчуков Д.А. Генератор импульсов магнитного поля. – В кн.: Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Материалы 3-й международной научно-технич. конф. Могилев, 23–25 сентября 2009 г. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2009, с. 133–134.
26. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
27. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Осипов А.А., Пиунов В.Д., Кулагин В.Н. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М. – Дефектоскопия, 2003, № 3, с. 47–53.

28. Матюк В.Ф., Пинчуков Д.А., Кратиров В.Б., Бурак В.А. Магнитометр. Патент РБ на полезную модель № 4295. – Афіцыйны бюлетэнь, 2008, № 2, с. 166.
29. Матюк В.Ф., Бурак В.А., Осипов А.А., Пинчуков Д.А. Градиентометр для магнитной структуроскопии. – В кн.: Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Материалы 3-й международной научно-технич. конф. Могилев, 23–25 сентября 2009 г. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2009, с. 135–137.
30. Сандомирский С.Г., Сандомирская Е.Г. Влияние магнитной предыстории изделия на результат контроля его физико-механических свойств магнитным методом при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможности метода). I. Модельный эксперимент – Дефектоскопия, 2004, № 6, с. 63–71.
31. Сандомирский С.Г. Влияние магнитной предыстории изделия на результат контроля его физико-механических свойств магнитным методом при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможности метода). I. Аналитическое моделирование – Дефектоскопия, 2004, № 6, с. 72–79.
32. Горкунов Э.С., Антонов А.В., Стерхов Г.В. и др. Исследование стабильности состояния остаточной намагниченности при намагничивании изделий импульсами от сети переменного тока. – Дефектоскопия, 1984, № 4, с.40–45.
33. Матюк В.Ф., Бурак В.А. Повышение достоверности импульсного магнитного контроля качества термообработки изделий из среднеуглеродистых сталей. – В кн.: Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Материалы 3-й международной научно-технич. конф. Могилев, 23–25 сентября 2009 г. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2009, с. 128–129.
34. Матюк В.Ф., Бурак В.А. Снижение влияния магнитной предыстории на результаты контроля качества термообработки изделий из улучшаемых марок сталей импульсным магнитным методом. – Тезисы докл. XXIV Уральской конференции "Физические методы неразрушающего контроля", 6 – 9 апреля, г. Екатеринбург, 2009. – Екатеринбург: УрО РАН, ИФМ УрО РАН, Инст. машиноведения УрО РАН, 2009, с. 11.
35. Матюк В.Ф., Бурак В.А. Способ импульсного магнитного контроля качества термообработки ферромагнитного изделия. – Патент РБ № 13175. – Афіцыйны бюлетэнь, 2010, № 2, с. 127.
36. Матюк В.Ф., Бурак В.А. Способ импульсного магнитного контроля температуры термообработки ферромагнитного изделия. – Патент РБ № 13238. – Афіцыйны бюлетэнь, 2010, № 3, с. 119–120.
37. Матюк, В.Ф., Стрелюхин А.В. Особенности влияния длительностей фронтов импульсов при локальном намагничивании плоских изделий на нормальную составляющую поля остаточной намагниченности. I. Влияние длительности заднего фронта. – Дефектоскопия, 1997, № 9, с. 42–49.
38. Матюк, В.Ф., Стрелюхин А.В. Особенности влияния длительностей фронтов импульсов при локальном намагничивании плоских изделий на нормальную составляющую поля остаточной намагниченности. II. Влияние длительности переднего фронта. – Дефектоскопия, 1998, № 2, с. 3–9.
39. Матюк, В.Ф., Кратиров В.Б., Бурак В.А. Магнитное поле вихревых токов над поверхностью плоского проводника в процессе воздействия на него импульсным

- магнитным полем накладного соленоида. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук, 2008, № 2, с. 104–110.
40. Матюк В.Ф., Кратиров В.Б., Бурак В.А. Оптимизация режимов намагничивания при импульсном магнитном контроле механических свойств улучшаемых марок сталей. – В кн.: "Современные методы и технологии создания и обработки материалов". В двух частях. Ч.1. Материалы II международной научно-технич. конф./ред-кол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Мн.: Экоперспектива, 2007, с. 96–101.
 41. Матюк В.Ф., Бурак В.А. Контроль качества отпуска улучшаемых среднеуглеродистых марок сталей. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.- тэхн. навук, 2008, № 3, с. 113 – 118.
 42. Матюк В.Ф., Кратиров В.Б., Бурак В.А. Способ импульсного магнитного контроля температуры отпуска изделия из улучшаемой ферромагнитной стали после его окончания. – Патент РБ № 11395. – Афіцыйны бюлетэнь, 2008, № 6, с. 137–138.
 43. Матюк В.Ф., Бурак В.А., Делендик М.Н. Способ импульсного магнитного контроля температуры отпуска изделия из среднеуглеродистой стали – Патент РБ № 12447. – Афіцыйны бюлетэнь, 2009, № 5, с. 123.
 44. Матюк В.Ф., Бурак В.А. Способ импульсного магнитного контроля температуры отпуска изделия из улучшаемой ферромагнитной стали. – Патент РБ № 12446. – Афіцыйны бюлетэнь, 2009, № 5, с. 122–123.
 45. Матюк В.Ф., Бурак В.А., Осипов А.А., Пинчуков Д.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-6. – Дефектоскопия, 2009, № 7, с. 62–74.
 46. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом: ГОСТ 30415–96. – Введ. 01.01.1998. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 16 с.
 47. Матюк В.Ф. Состояние и перспективы метрологического обеспечения средств магнитной структуроскопии. – В кн.: Метрология–2009. Доклады Международной научно-практич. конф.– Минск: БелГИМ, 2009, с. 294–298.
 48. Матюк В.Ф., Бурак В.А. Контроль качества отпуска закаленных изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей импульсным магнитным методом. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2011, т. 77, № 5, с. 31–36.

Статья поступила в редакцию 19.11.12

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ БЕТОНА МЕТОДОМ
ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ**
*Determination of the elastic modulus of concrete
by the dynamic indentation method*

Мацулевич О.В., Рудницкий В.А., Литвиновский Д.А.
Matsulevich O.V., Rudnitsky V.A., Litvinouski D.A.

В работе рассматриваются вопросы повышения информативности неразрушающего контроля бетонных конструкций за счет одновременного определения прочности на сжатие и модуля упругости бетона методом динамического индентирования. На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований динамического взаимодействия сферического индентора с бетоном получено выражение для определения модуля упругости бетона по параметрам индентирования. На примере образцов бетона, подвергнутых воздействию высоких температур, показано, что метод динамического индентирования позволяет выявить снижение модуля упругости, не сопровождающееся снижением прочности. Приведено описание прибора ИПМ-1Б, реализующего метод динамического индентирования в контроле строительных материалов.

This paper deals with the aspects of increasing the informativeness of nondestructive testing of concrete constructions due to the simultaneous determination of compressive strength and elastic modulus of concrete by the dynamic indentation method are considered in the paper. On the basis of experimental and theoretical research of the dynamic interaction of a spherical indenter with concrete, an expression for determining the concrete elastic modulus from indentation parameters is derived. For the concrete samples subjected to the influence of high temperature is shown that the dynamic indentation method reveals the decrease of elastic modulus without a corresponding decrease in strength. The description of the device IPM-1B which implements the dynamic indentation method in the control of building materials is given.

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений развития неразрушающих методов контроля бетонов является повышение информативности испытаний за счет определения, наряду с прочностью, других физико-механических характеристик. Решение этой задачи, в первую очередь оценка модуля упругости, позволит в ряде случаев значительно повысить достоверность и эффективность контроля. Так, например, при

воздействию на исследуемые объекты различных повреждающих факторов может иметь место качественное искажение соотношений между модулем упругости и прочностью, когда увеличение прочности будет сопровождаться снижением модуля. Оценка несущей способности таких объектов на основании неразрушающего определения только прочности может привести к ошибочным результатам. В таких случаях важно иметь возможность независимого неразрушающего определения модуля упругости и прочности в рамках одного метода контроля. В настоящей работе рассматриваются вопросы определения модуля упругости бетона ударно-динамическим методом, получившим в последние годы наиболее широкое распространение в неразрушающем обследовании строительных конструкций и сооружений.

Описание метода и аппаратуры

Наиболее совершенным вариантом ударно-динамического метода является метод динамического индентирования с непрерывной регистрацией процесса удара [1]. Метод развивается в лаборатории контактно-динамических методов контроля Института прикладной физики НАН Беларуси. Он заключается в нанесении локального удара жестким индентором по испытуемому материалу и регистрации всей кривой текущей скорости перемещения индентора, которая и представляет собой исходную информацию о материале. Скорость индентора в каждый момент времени фиксируется с помощью магнитоиндукционного датчика, состоящего из смонтированного на инденторе постоянного магнита и катушки индуктивности, закрепленной на корпусе прибора. Обработка полученного массива скорости индентора позволяет получить несколько основных параметров индентирования: коэффициент восстановления скорости e (отношение скорости отскока индентора к скорости его падения), длительность активного этапа удара t_a , максимальную глубину внедрения индентора α_{\max} , максимальное контактное усилие P_{\max} . Перечисленные параметры могут использоваться как в качестве косвенных характеристики прочности бетона, так и для расчета его физико-механических свойств согласно принятым моделям деформирования.

Применительно к испытаниям строительных материалов метод динамического индентирования с непрерывной регистрацией процесса удара реализован в измерителе прочности ИПМ-1Б. Прибор выполнен в виде портативного блока, состоящего из ударного преобразователя и электронного узла, включающего аналого-цифровой преобразователь, процессор, дисплей и автономное питание. Важным отличием прибора от известных аналогов является конструкция ударного преобразователя, позволяющая реализовать свободный ход индентора (не-

стесненный удар) при его контакте с материалом. Свободный ход индентора в момент удара необходим для корректного расчета физико-механических свойств материала по параметрам движения индентора.



Рис. 1. Внешний вид прибора ИПМ-1Б

Прибор ИПМ-1Б внесен в реестр средств измерений Республики Беларусь. Выпускается по ТУ ВУ 100289280.021 – 2010.

Теоретические исследования

Чтобы определить модуль упругости бетона методом динамического индентирования, необходимо иметь уравнения, связывающие физико-механические свойства бетона с регистрируемыми параметрами индентирования. Такие уравнения выводятся на основании упрощенных моделей, описывающих поведение материалов в заданных условиях нагружения. Одним из возможных способов построения модели материала является энергетический подход. Данный подход предполагает анализ энергетических соотношений при ударе с целью выделения из полной энергии удара составляющих, затрачиваемых отдельно на упругое, пластическое и вязкое деформирование материала.

Чтобы оценить, какие свойства бетона (упругие, вязкие или пластические) преобладают при динамическом нагружении сферическим индентором, было проведено экспериментальное исследование влияния энергии удара на форму зависимости контактного усилия P от глубины внедрения α . Энергия удара варьировалась за счет изменения предударной скорости индентора. С этой целью на основе прибора ИПМ-1Б была изготовлена лабораторная установка, позволяющая регулировать усилие, развиваемое разгонной цилиндрической пружиной, и изменять таким образом величину предударной скорости V_0 . Для проведения эксперимента были выбраны 3 значения предударной скорости: 1,8; 3,0 и 4,1 м/с. Результаты, полученные на образце бетона класса прочности С35/45, показаны в виде зависимостей контактного усилия от глубины внедрения на рисунке 2.

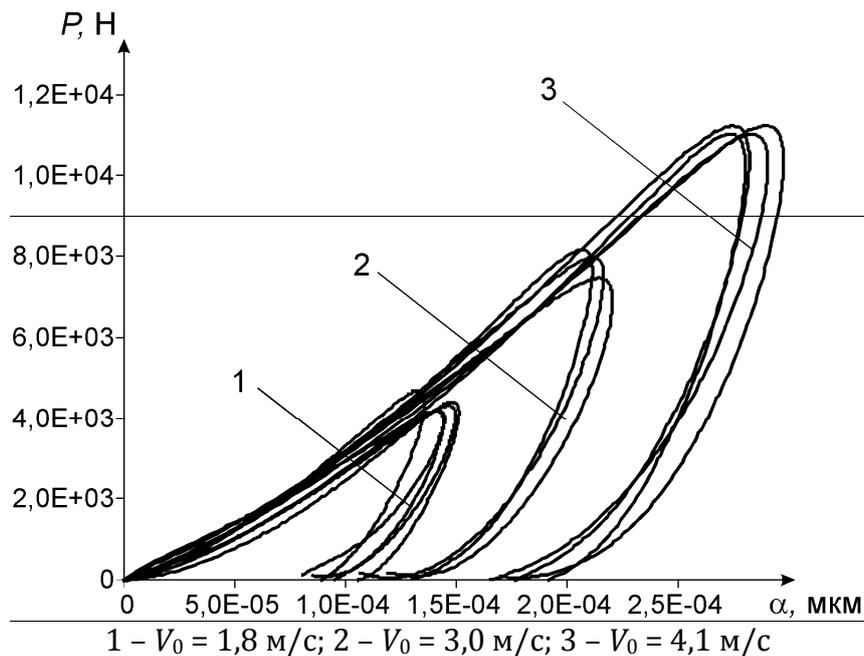


Рис. 2. Зависимости контактной силы от глубины внедрения при различной предударной энергии индентора на образце бетона класса С35/45

Как видно из рисунка 2, для каждой предударной скорости наблюдается определенный разброс кривых $P(\alpha)$. Коэффициент вариации v значений P_{\max} и α_{\max} на рассматриваемом образце бетона при $V_0 = 4,1$ м/с составил 7-8 %. Необходимо подчеркнуть, что разброс результатов измерений обусловлен главным образом неоднородностью структуры бетона. Методическую погрешность прибора ИПМ-1Б характеризует коэффициент вариации v , полученный на образце из однородного материала (например, металла). Его величина не превышает 2,5 %.

Приведенные на рисунке 2 кривые имеют вид, типичный для материалов, проявляющих выраженные упругие и пластические свойства. Ход кривых на активном этапе удара практически не зависит от скорости нагружения. Запаздывание максимума перемещения индентора относительно максимума контактной силы практически отсутствует, свидетельствуя о том, что вязкие свойства бетона при рассматриваемом виде нагружения не проявляются. Таким образом, полную энергию деформирования бетона сферическим индентором можно рассматривать как состоящую из энергий упругого и пластического деформирования. Суммарная энергия упругопластического деформирования и потерь является величиной постоянной, численно рав-

ной предударной кинетической энергии индентора. Сделав допущение, что вся кинетическая энергия индентора расходуется только на упругое и пластическое деформирование испытуемого материала в месте контакта с индентором, для полной энергии можно записать:

$$W_0 = W_y + W_{\text{п}} = \frac{mV_0^2}{2}, \quad (1)$$

где V_0 и W_0 – соответственно предударная скорость и кинетическая энергия индентора,

W_y и $W_{\text{п}}$ – соответственно энергия упругого и пластического деформирования испытуемого материала.

Во время пассивного этапа удара запасенная энергия W_y восстанавливается, обуславливая движение индентора в противоположном направлении

$$\frac{mV_{\text{max}}^2}{2} = W_y, \quad (2)$$

где V_{max} – скорость отскока индентора.

Чтобы получить аналитическое выражение, связывающее твердость H и скорость отскока V_{max} при заданной величине W_0 и параметрах испытуемого материала, необходимо располагать уравнением, описывающим изменение упругопластической деформации в зависимости от контактной силы P . В качестве такого уравнения воспользуемся уравнением [2]

$$P = ad^n, \quad (3)$$

где d – диаметр проекции отпечатка;

a и n – параметры исследуемого материала.

Определим энергию упругопластического деформирования

$$W_0 = \frac{mV_0^2}{2} = \int_0^{\alpha_{\text{max}}} Pd\alpha = \frac{2}{n+2} P_{\text{max}} \alpha_{\text{max}}. \quad (4)$$

Чтобы связать параметры α_{\max} и d , рассмотрим геометрические соотношения в невосстановленном отпечатке (рисунок 3).

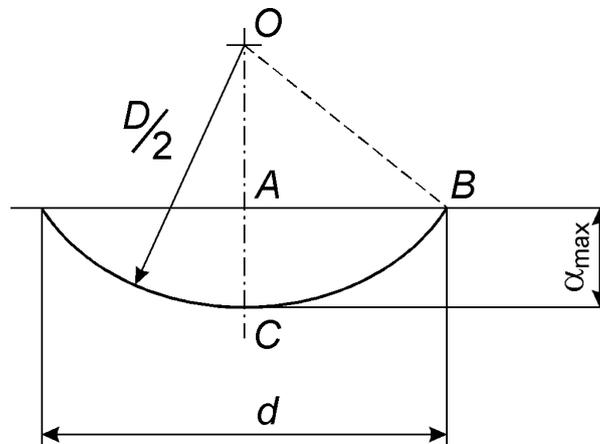


Рис. 3. Схема невосстановленного отпечатка

Для сторон прямоугольного треугольника OAB можно записать следующее уравнение

$$\frac{d^2}{4} = \frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - \alpha_{\max} \right)^2 = \frac{D}{2} \alpha_{\max} - \alpha_{\max}^2,$$

где D – диаметр сферического наконечника индентора.

Поскольку диаметр индентора (32 мм) значительно превышает глубину отпечатка (не более 1 мм на образцах класса прочности С8/10), членом с квадратом глубины можно пренебречь. Тогда выражение для определения глубины отпечатка через его диаметр будет иметь следующий вид

$$\alpha_{\max} = d^2 / 4D, \tag{5}$$

Подставляя выражение (5) в (4), получаем

$$W_0 = \frac{1}{2(n+2)} P_{\max} \frac{d^2}{D}. \tag{6}$$

Контактное усилие можно выразить через твердость H , используя для этого ее определение как среднее давление в отпечатке при ударе

$$P_{\max} = \frac{H\pi d^2}{4}. \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) содержат три неизвестных: H , P_{\max} и d , и для того, чтобы их определить аналитически, необходимо иметь третье независимое уравнение. В качестве такого уравнения используем выражение для энергии упругого деформирования [3], учитывающее, что жесткий сферический наконечник, находясь в контакте с криволинейной поверхностью отпечатка, упруго деформирует его до диаметра D

$$W_y = 0,3 \frac{P_{V=0}^2}{\alpha_{\max}^2 D^2} \cdot \frac{1}{E^*}, \quad (8)$$

где E^* – приведенный модуль упругости испытываемого материала и индентора, описываемый выражением

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}. \quad (9)$$

где μ_1 и μ_2 – соответственно коэффициенты Пуассона материала индентора и контролируемого материала,
 E_1 и E_2 – соответственно модули упругости материала индентора и контролируемого материала.

Решая теперь совместно систему из трех уравнений (6-8), определим выражение для энергии упругого деформирования

$$W_y = 0,178\pi^{5/4} (2+n)^{3/4} H^{5/4} D^{3/4} W_0^{3/4} \frac{1}{E^*}. \quad (10)$$

Учитывая, что максимальная кинетическая энергия отскока индентора равна работе упругого деформирования (уравнение (2)), выражение для скорости отскока индентора будет иметь следующий вид

$$V_{\max} = 1,12 \cdot \left(\frac{2+n}{2}\right)^{3/8} \left(\frac{D^3}{W_0}\right)^{1/8} \frac{H^{5/8}}{(E^*)^{1/2}}. \quad (11)$$

Разделив уравнение (11) на предударную скорость индентора, выразим коэффициент восстановления скорости индентора:

$$e = 1,12 \cdot \left(\frac{2+n}{2} \right)^{3/8} \frac{D^{3/8} V_0^{3/4} H^{5/8}}{m^{1/8} (E^*)^{1/2}}. \quad (12)$$

Уравнение (12) связывает модуль упругости контролируемого материала E_2 с регистрируемыми при измерении параметрами: коэффициентом восстановления скорости, максимальной контактной силой и максимальной глубиной внедрения. Выразив E_2 , получим

$$E_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\left(1,12 \cdot \left(\frac{2+n}{2} \right)^{3/4} \frac{D^3}{W^{1/4}} \left(\frac{P_{\max}}{\pi D \alpha_{\max}} \right)^{5/4} \right)^{-1} \cdot e^2 - \frac{1 - \mu_1^2}{E_1}}. \quad (13)$$

Экспериментальные исследования

Для экспериментальной проверки полученного выражения были испытаны образцы бетона 6-ти различных классов прочности (С16/20, С28/35, С32/40, С35/45, С40/50, С45/55) в диапазоне прочности на сжатие от 25,8 МПа до 75,8 МПа. Всего было испытано 20 образцов (по 4 образца в каждой серии).

Определение параметров динамического индентирования проводилось с помощью измерителя прочности материалов ИПМ-1Б. На каждом образце выполнялось 14 измерений (по 7 измерений на двух противоположных гранях образца), по которым рассчитывались средние значения модуля упругости E_2 по формуле (13). Затем модуль упругости образцов определялся ультразвуковым методом. Измерение скорости распространения ультразвука в образцах осуществлялось при сквозном прозвучивании с помощью специального лабораторного оборудования. После проведения неразрушающих испытаний определялась прочность образцов на сжатие $R_{сж}$. Нагружение образцов проводилось по тем же граням, которые испытывались прибором ИПМ-1Б.

Результаты определения модуля упругости бетонных образцов различной прочности методом динамического индентирования приведены на рисунке 4 (кривая 2). Кривая 1 – модуль упругости образцов, рассчитанный по результатам ультразвуковых испытаний.

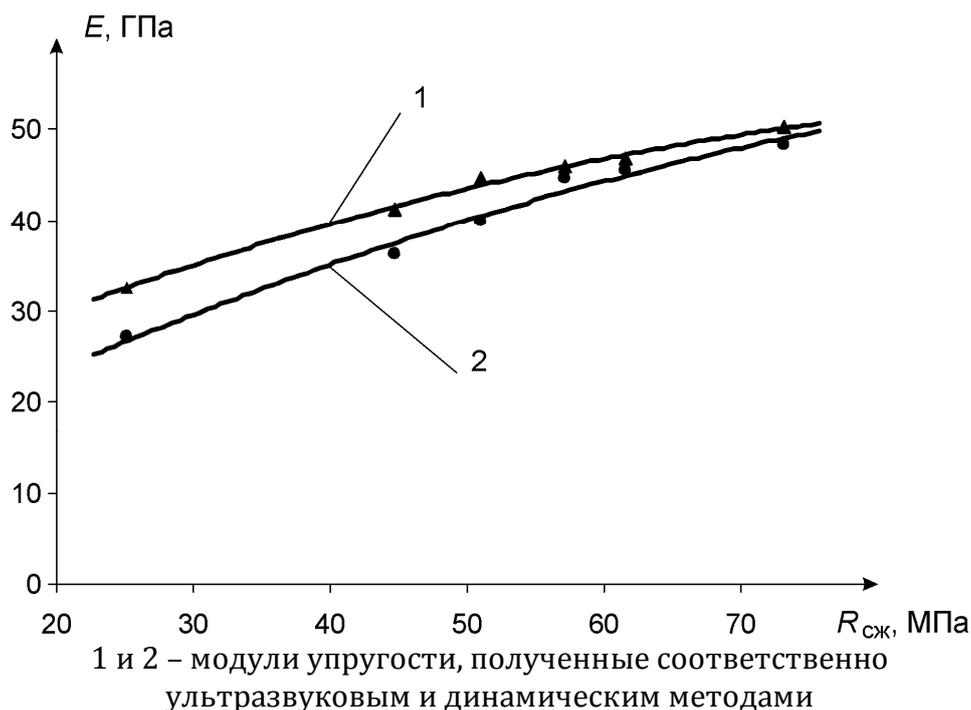


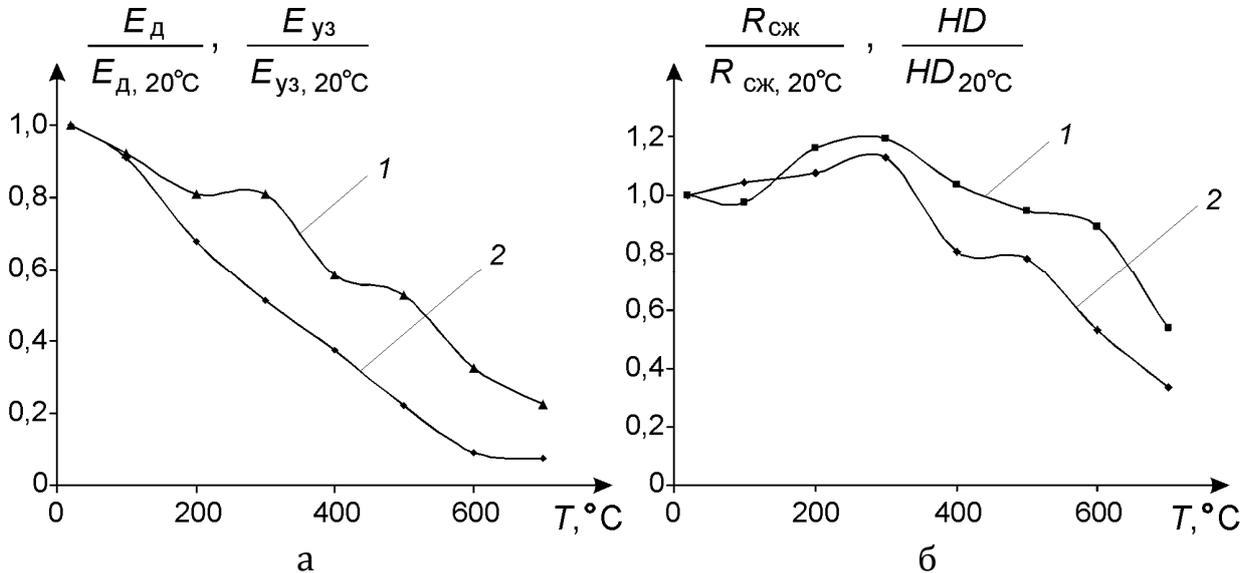
Рис. 4. Зависимости модуля упругости бетона от прочности на сжатие

Как видно из рисунка 4, характер изменения кривых 1 и 2 одинаков и хорошо согласуется с известным фактом замедления роста модуля упругости бетона с увеличением прочности на сжатие. В то же время кривая 1, полученная ультразвуковым методом, дает более высокие значения модуля упругости. Это обусловлено тем, что модуль упругости соответствует минимальным деформациям, а поскольку деформация при индентировании значительно больше, то и величина модуля упругости будет меньше. Компенсировать расхождение между кривыми 1 и 2 можно пересчетом с помощью следующей эмпирической зависимости

$$E_{уз} = 1380 \cdot E_{дин}^{0,707} . \quad (14)$$

Разработанная методика была опробована в рамках экспериментов по определению влияния температуры на физико-механические свойства бетона. На рисунке 5, а приведена экспериментальная кривая изменения модуля упругости при увеличении температуры от 20 до 700 °С. Образцы бетона размерами 100x100x100 мм выдерживали в термокамере при заданной температуре, охлаждали до комнатной температуры и испытывали методом динамического индентирования, ультразвуковым импульсным методом, а также сжатием на прессах по ГОСТ 10180-90. Чтобы

наглядно сопоставить полученные результаты, значения характеристик представлены в относительном выражении (приведены к значениям, полученным при температуре 20 °С).



а: 1 и 2 – соответственно динамический и ультразвуковой модули упругости,
б: 1 – прочность на сжатие, 2 – динамическая твердость

Рис. 5. Влияние температуры на модуль упругости (а) и прочностные характеристики (б) бетона

Как следует из рисунка, воздействие высоких температур сопровождается значительным уменьшением модуля упругости бетона и может привести к снижению несущей способности объекта. Определение модуля динамическим (кривая E_d) и ультразвуковым (кривая E_{uz}) методами дает схожие данные – модуль падает уже при незначительном нагреве. В то же время определение прочностных характеристик (рисунок 5, б) дает существенно отличающийся результат. Динамическая твердость HD , измеренная прибором ИПМ-1Б, в диапазоне 20...300 °С несколько увеличивается и только после 300 °С начинает снижаться. Это подтверждается данными измерения прочности на сжатие стандартным методом (кривая $R_{сж}$). Таким образом, контроль только прочности бетона может привести неверной оценке несущей способности сооружения.

Для исключения описанной неоднозначности результатов неразрушающего контроля может использоваться предлагаемый метод динамического индентирования с непрерывной регистрацией процесса удара, в частности, реализующие его приборы ИПМ-1Б. Как видно из рисунка 5, метод предоставляет возможность отдельного опреде-

ления прочностных и упругих свойств бетона. При этом исключается необходимость применения других методов контроля (например, ультразвукового).

Заключение

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований динамического взаимодействия сферического индентора с бетоном получено выражение для определения модуля упругости бетона по параметрам индентирования. Проведенные сопоставительные испытания показали хорошее соответствие с результатами определения модуля упругости ультразвуковым методом. Применение предложенной методики позволяет повысить информативность неразрушающего контроля строительных сооружений за счет одновременного определения прочности на сжатие и модуля упругости бетона.

Литература

1. Рудницкий, В.А., Рабцевич А.В. Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов – Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 79–86.
2. Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. Инженерные методы исследования ударных процессов. М.: Машиностроение, 1979, 320 с.
3. Пилипчук В.И. Обзор теорий твердости. – Труды институтов комитета. Выпуск 60 (120). – М.-Л.: Стандартгиз, 1962, 111 с.

Статья поступила в редакцию 26.11.12

Итоги 4-й международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов»

Н.П. Мигун¹, С.С. Сергеев²

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск

²Белорусско-Российский университет, г. Могилев

В г. Могилеве 26-27 сентября 2012 г. на базе Белорусско-Российского университета прошла 4-я международная научно-техническая конференция «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», организованная Белорусско-Российским университетом, Институтом прикладной физики НАН Беларуси, Белорусской ассоциацией неразрушающего контроля и технической диагностики, Российским обществом неразрушающего контроля и технической диагностики и УП «БЕЛГАЗПРОМДИАГНОСТИКА». Целью конференции и проходившей в ее ходе выставки являлось обобщение результатов исследований и обмен опытом между учеными и специалистами различных организаций и стран в области разработки и практического применения неразрушающих методов и средств контроля качества материалов, промышленных изделий, сооружений и технологического оборудования. Значительное внимание было уделено также проблемам диагностирования потенциально опасных объектов, подготовки квалифицированных кадров.

В конференции приняли участие ученые и специалисты из организаций и предприятий Беларуси, России и Украины. Академическая наука была представлена ведущими институтами в области физики неразрушающего контроля и технической диагностики стран СНГ, среди которых Институт прикладной физики НАН Беларуси (ИПФ НАН Беларуси), Институт физики металлов и Институт машиноведения УрО РАН, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, ряд других институтов. Сильными коллективами в этой области была представлена также вузовская наука. Это Белорусско-Российский университет (БРУ), Белорусский национальный технический университет (БНТУ), Национальный исследовательский университет (МЭИ) (г. Москва), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ), Иркутский государственный университет путей сообщения и другие известные университеты. Целый ряд сообщений сделали известные ученые из научно-

производственных объединений и предприятий. Всего же материалы трудов конференции содержат 121 доклад с изложением результатов исследований в области практически всех известных методов неразрушающего контроля ученых из 38 организаций и предприятий Беларуси, России и Украины.

При проведении 4-й Международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» активно использовался потенциал России и Беларуси в области информационно-коммуникационных технологий. Впервые в рамках ставших уже традиционными могилевских конференций успешно проведена презентация пленарного доклада в формате телемоста между аудиториями участников конференции в БРУ и в НИИ интроскопии МНПО «Спектр» в Москве. Содокладчики – директор НИИ интроскопии МНПО «Спектр» академик РАН В.В. Ключев и председатель Белорусской ассоциации неразрушающего контроля и технической диагностики, директор ИПФ НАН Беларуси Н.П. Мигун.

Докладчики проанализировали современное состояние исследований и полученных результатов в области технической диагностики, приведя примеры наиболее интересных последних разработок в Беларуси и России. Эти примеры свидетельствуют о все более широком распространении методов НК и ТД в самых разных отраслях: промышленные предприятия, строительство, магистральные и другие трубопроводы, транспорт, энергетика, предприятия нефтехимического комплекса. Потребность предприятий широкого спектра министерств и ведомств в современных методах и средствах НК и ТД является определенной гарантией устойчивой востребованности результатов научных исследований в области физики неразрушающего контроля. При этом достаточно сильная в Беларуси научная школа в этой области (только в ИПФ НАН Беларуси 15 докторов и 20 кандидатов наук) позволяет эффективно решать возникающие на предприятиях специфические задачи. В России, по словам академика В.В. Ключева, безусловными лидерами данного направления являются ЗАО «НИИ интроскопии МНПО «Спектр», Институт неразрушающего контроля Томского политехнического университета (ИНК ТПУ) и предприятия, входящие в состав ассоциации «СПЕКТР-ГРУПП». Рассмотрены перспективы развития неразрушающего контроля. Особо подчеркивалось, что получение новых фундаментальных и прикладных научных результатов и разработка на их основе современных высокоэффективных приборов и методик неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) – одна из главных необходимых составляющих каче-

ства и конкурентоспособности выпускаемой национальной продукции, гарантирующая безопасность промышленных, транспортных, энергетических, строительных объектов.

В пленарном докладе В.Л. Венгриновича (ИПФ НАНБ, г. Минск) «Вероятностная концепция оценки ресурса технических объектов по данным многосенсорных измерений» были представлены результаты исследования в статистической Байесовской постановке проблемы оценки рисков опасных состояний конструкций, подвергаемых мониторингу. Было отмечено, что ключевыми понятиями в теории являются воздействие, уязвимость и робастность системы, предложена общая теория количественного анализа рисков повреждения, полного и частичного разрушения элементов и конструкций в целом, рассмотрена проблема минимизации рисков на стадиях проектирования объекта и функционирования системы мониторинга. Приведены примеры функционирования разработанной системы мониторинга для ряда уникальных объектов в Беларуси.

Еще один совместный белорусско-российский доклад представили на пленарном заседании зав. кафедрой БРУ С.С. Сергеев и проф. К.Е. Аббакумов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург). Докладчики проанализировали вопросы сопоставимости структуры Государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования в России и Беларуси, возможности реализации практико-ориентированного обучения с учетом потребностей работодателей от промышленности, вопросы преобразований в высшей школе и возможные пути повышения качества подготовки специалистов на различных уровнях. Оба докладчика отметили, что проблема подготовки квалифицированных кадров по неразрушающему контролю с высшим базовым образованием сегодня, как никогда, важна и актуальна.

Работа конференции проходила в рамках 5 секций, тематика которых соответствовала важнейшим современным направлениям развития физики и техники НК и ТД. Это дефектоскопия материалов и промышленных изделий; контроль структуры и физико-механических характеристик материалов и изделий; контроль геометрических параметров объектов; мониторинг, диагностика и прогнозирование остаточного ресурса технических объектов, а также компьютерные технологии в неразрушающем контроле.

Около половины всех докладов, представленных на секции «Дефектоскопия материалов и промышленных изделий», были посвящены акустическим методам контроля. В ряде сообщений изложены результаты совершенствования магнитографического, токовихревого, ферро-

зондового и капиллярного методов. Из докладов, посвященных акустическим методам, большой интерес вызвала работа К.Е. Абакумова и Р.С. Коновалова (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), в которой авторы изучили закономерности распространения связанных электроакустических волн вдоль границы раздела пьезоэлектриков или тонкопленочных гетероэпитаксиальных структур, выращенных на различных подложках методом молекулярной лучевой эпитаксии. В рамках предложенной модели нежесткого соединения решена задача о распространении поверхностных волн типа Стоули вдоль границы диэлектриков и показано, что путем варьирования параметров соединения границ подложки и пьезопленки можно добиться существенного изменения скорости волны. В работе М.В. Асадчей и др. (ИПФ НАН Беларуси) выявлены закономерности возбуждения и рефракции поверхностных и поперечных подповерхностных волн при околоскритических углах падения волны на объекты со слабонеоднородным (по упругим свойствам) упрочненным слоем. Авторами обращено внимание на значимость влияния даже малых толщин упрочненного слоя на изменение амплитуды и спектра возбуждаемых мод, что представляет значительный интерес для разработки методов и средств ультразвукового контроля металлоизделий как с поверхностной, так и с объемной термообработкой.

Интересен также доклад Д.Н. Хатькова («Институт физики прочности и материаловедения СО РАН»), в котором предложен метод расширения отстройки от влияния зазора при вихретоковом контроле. За счет предварительного введения «фазовой компенсации» при настройке измерительных каналов на эталонные образцы с реальной микрогеометрией поверхности авторам удалось существенно повысить чувствительность и надежность выявления поверхностных дефектов по сравнению с традиционными методами. В частности, этим методом выявляются эталонные дефекты на расстоянии 80-90 мм, а традиционным методом – на расстоянии не более 10-12 мм.

В докладе Н.П. Мигуна Н.П., Н.В. Деленковского и А.Б. Гнусина (ИПФ НАН Беларуси), посвященном актуальной прикладной проблеме повышения чувствительности капиллярного контроля, впервые установлено, что при определенных условиях процесс проявления дефектов может эффективно протекать и при неполном по площади нанесении твердой фазы проявителя из аэрозольных баллончиков. Так, при степени покрытия твердой фазой проявителя поверхности образца в диапазоне 90-100% площади следов дефектов существенно не отличаются от полученных по традиционной технологии (толщина слоя проявителя 20-40 мкм). Это открывает перспективы разработки

новых методик капиллярного контроля, позволяющих значительно снизить расход проявителя при проведении контроля.

В.И. Пудовым (Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург) предложен усовершенствованный феррозондовый метод для двух разных областей человеческой деятельности: для лазерного деформирования и термомагнитной обработки магнитомягких сплавов, а также для выявления магнитных включений в тканях человека, оценки их размеров и пространственной ориентации. Использование этого метода (за счет обратной связи) позволило существенно повысить надежность и точность создаваемого упрочненного слоя, а также уменьшить травматизм живых тканей в операционном процессе.

Интересен и доклад В.А. Новикова (БРУ, Могилев) и др., посвященный формированию индикаторных рисунков дефектов на пленке, визуализирующей магнитное поле дефекта, в котором обращено внимание на возможности метода и достижение на практике достаточно высокой чувствительности при обнаружении объемных дефектов, расположенных на достаточно большом расстоянии от контактной поверхности.

На секции «Контроль структуры и физико-механических характеристик материалов и изделий» были заслушаны доклады по следующим основным направлениям: магнитный, оптический, электрический, радиоволновый контроль, контроль физико-механических характеристик, контроль диэлектрических свойств, электрохимический контроль, контроль параметров жидких сред, разрушающий контроль и контроль технологических параметров объектов. Результаты исследований по магнитным и электрическим методам контроля структуры и физико-механических характеристик представили сотрудники ИПФ НАН Беларуси, Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, Института физики металлов УРО РАН.

Так, в докладе А.П. Гусева и В.Д. Пиунова была представлена информация о разработанном источнике высокооднородного магнитного поля для эталона магнитной индукции, в сообщении И.И. Брановицкого и И.Т. Скурту описано использование кривых Безье для представления основной кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса магнитомягких материалов, а в докладе В.А. Рудницкого и др. излагаются результаты исследований релаксации и ползучести асфальтобетона методом индентирования. Сообщение В.Ф. Матюка касается нового способа повышения достоверности контроля качества термообработки малогабаритных изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей, включая методику выбора режима им-

пульсного намагничивания изделий цилиндрической формы из инструментальных углеродистых сталей. В.Н. Костин и О.Н. Василенко из ИФМ УрО РАН привели подробную информацию о разработанном ими способе повышения достоверности локального измерения магнитных параметров при структуроскопии ферромагнитных объектов.

Значительный интерес вызвал доклад сотрудников Белорусского национального технического университета и Физико-технического института НАН Беларуси. Так, А.Л. Жарин А.Л., А.Г. Анисович, К.Л. Тявловский и др. предложили оригинальную методику исследования изменения свойств поверхности объектов из конструкционных материалов после воздействия на них магнитным импульсом. Исследования проводили методом зондовой электрометрии, предусматривающей бесконтактные измерения пространственного распределения работы выхода электронов с помощью бесконтактного конденсаторного зонда.

Ряд интересных докладов представили сотрудники БРУ. Так, В.И. Борисов и А.В. Карпенко представили новый способ определения диэлектрической проницаемости радиоволновым методом. В докладе А.В. Хомченко и др. описан разработанный ими и внедренный в производство способ измерения величины двулучепреломления в плоскости автомобильных закаленных стекол, а оригинальный способ измерения мутности масел и прибор для его реализации представили С.С. Сергеев и А.П. Марков.

На секции «Контроль геометрических параметров объектов» были представлены доклады, по контролю различными методами металлических и дорожных покрытий, по применению вихретокового, рентгеновского, теплового и оптического неразрушающего контроля для диагностики трубопроводов и других объектов.

Например, доклад сотрудника ИПФ НАН Беларуси И.Е. Загорского был посвящен разработке устройства для контроля степени соосности гофрированной металлической трубы и гофрированной полимерной оболочки, наносимой на трубу. Разработано и внедрено в производство устройство на основе вихретоковых преобразователей, позволяющее измерять соосность с точностью 1 мм в заводских условиях нанесения полимерного покрытия.

Следует отметить логическую завершенность научных исследований, изложенных в двух докладах, представленных сотрудниками того же института А.А. Лухвичем, А.Л. Лукьяновым и О.В. Булатовым. В первом докладе проведен анализ возможности определения магнитодинамическим методом толщины слоя никелевого покрытия камеры сгорания ракетных двигателей на участках, где имеются технологиче-

ские пазы, которые вносят большую погрешность в измерение толщины. В результате проведенных исследований предложена методика компенсации этой погрешности. Во втором докладе приводятся особенности разработки толщиномера никелевых покрытий, который позволяет измерять толщину до 1 мм с разрешающей способностью менее 0,15 мкм.

Доклад А.В. Хомченко и др., представленный коллективом авторов из БРУ и Могилевского государственного университета им. А.А. Кулешова, посвящен исследованию влияния толщины металлического покрытия на кремнии на величину коэффициента отражения лазерного пучка при различных углах падения в рамках волноводной спектроскопии. Показано, что предложенная более простая методика контроля толщины и состояния поверхности слоя без использования призмы связи обеспечивает точность результатов, сопоставимую с многоугловой эллипсометрией.

В докладе сотрудника ИПФ НАН Беларуси А.В. Чернышева исследовано влияние толщины магнитного листа на распределение в нем напряженности магнитного поля, создаваемого накладным преобразователем, проведен теоретический анализ величины размагничивающего фактора магнитных листов различной толщины при их намагничивании витком тока. Показано, что размагничивающий фактор стремится к нулю при уменьшении толщины слоя к нулю.

Представитель этого же института В.И. Шарандо выступил с докладом о результатах исследования влияния формы электродов и контактной нагрузки при термоэлектрическом контроле никеля на стали. Анализ влияния экспериментальных условий проводимых измерений термоЭДС на вид градуировочных характеристик преобразователя показал, что для уменьшения погрешности измерений необходимо использовать износостойкие электроды термопреобразователя и обеспечивать высокую степень их прижима к контролируемому изделию.

Весьма многочисленной как по числу докладов, так и по направленности их тематики, была секция «Мониторинг, диагностика и прогнозирование остаточного ресурса технических объектов». На ней заслушаны доклады по вибродиагностике, диагностике трубопроводов, подшипников и светодиодных ламп, трибодиагностике, неразрушающему контролю напряженного состояния, мониторингу строительных конструкций. Здесь доминирующей темой была диагностика машиностроительных изделий в динамическом режиме (6 докладов). Среди них, например, были представлены интересные работы Объединенного института машиностроения НАН Беларуси (А.С. Скороходов), Бело-

русского государственного университета информатики и радиоэлектроники (П.Ю. Бранцевич). В докладе Д.А. Ткачева из Военной Академии РБ отмечается, что для определения технического состояния изделий по данным диагностики успешно используются современные способы обработки сигналов и элементы распознавания образов, в частности, кластерный анализ. В то же время, учитывая многофакторность и зашумленность измеряемой информации, а также необходимость диагностирования конкретных дефектов, следует уделить вопросам обработки сигналов больше внимания. Интерес вызвал также доклад по диагностике ресурсных характеристик светодиодных ламп (С.В. Бернат, В.В. Марков). Авторы показали, что ресурс можно диагностировать посредством изучения теплового поля вокруг лампы.

В ряде докладов рассмотрены даже такие специфические для НК и ТД проблемы, как раннее обнаружение факторов пожаров в производственных помещениях и неразрушающий контроль подлинности драгоценных металлов и камней.

Отличительной особенностью секции «Компьютерные технологии в неразрушающем контроле» было особенно активное участие молодых научных сотрудников. Например, в двух докладах, сделанных аспирантом БРУ В.Т. Вишнеревским, рассмотрены вопросы совершенствования систем управления электроприводами с упругими связями. В частности, рассмотрены эксперименты по контролю параметров грузоподъемных шахтных систем, дано математическое описание движения груза в шахте с распределенным элементом длиной 1 км, представлены результаты численного моделирования. Представляет интерес и работа, выполненная аспирантом этого же университета И.В. Курловичем, посвященная программному управлению и контролю параметров сварки. Изложены описание режимов сварки, системы управления и визуализации процесса. Доклад сотрудника БГУИР В.Э. Базаревского, посвященный организации ресурсов для загрузки, хранения и обработки информации, получаемой при диагностике технических объектов, также вызвал живой интерес участников конференции.

Прошедшая конференция способствовала обмену новейшими результатами в области физики и техники неразрушающего контроля и технической диагностики, установлению научных и деловых контактов между учеными и специалистами.

Статья поступила в редакцию 11.10.12

**14-е заседание Рабочей группы
по неразрушающему контролю научно-технической
комиссии по метрологии МГС**

В.В. Федоров

*ведущий инженер производственно-исследовательского отдела
радиоэлектронных измерений БелГИМ*

14-е заседание Рабочей группы по неразрушающему контролю научно-технической комиссии по метрологии МГС (РГ по НК НТК-Метр) состоялось 10 октября 2012 г. в Государственном комитете по стандартизации Республики Беларусь, г. Минск. Впервые заседание РГ по НК проводилось одновременно с 36-м заседанием НТКМетр.

В работе заседания приняли участие представители четырех стран – Беларуси, России, Узбекистана, Украины. На заседании были рассмотрены следующие вопросы:

1. О выполнении решений и рекомендаций, принятых на предыдущих заседаниях МГС, НТКМетр и РГ по неразрушающему контролю.

2. О работах, проводимых национальными органами в области неразрушающего контроля (обмен опытом работы, информационными материалами).

3. О ходе выполнения мероприятий «Программы работ по стандартизации, метрологии и оценке соответствия в области неразрушающего контроля» и предложениях Республики Казахстан в Программу на 2013 год.

4. О ходе разработки межгосударственных стандартов на основе ЕН 12668.

5. О разработке межгосударственного стандарта на основе международного стандарта «Контроль неразрушающий. Квалификация и сертификация персонала» (внедрение ISO 9712:2012).

6. О разработке межгосударственных стандартов на ультразвуковой метод измерения толщины на основе европейских стандартов EN 14127 «Контроль неразрушающий. Ультразвуковая толщинометрия» и EN 15317 «Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Основные технические характеристики оборудования для ультразвуковой толщинометрии и методы их измерений».

7. О разработке проекта ПМГ «Правила обеспечения безопасности особо опасных и ответственных объектов. Организация и порядок проведения работ при выполнении неразрушающего контроля».

8. О проекте межгосударственного стандарта «Контроль неразрушающий. Порядок разработки и проведения аттестации методик неразрушающего контроля».

9. Об актуализации Программы работ по стандартизации, метрологии и оценке соответствия в области неразрушающего контроля.

10. Об активизации работ по стандартизации в рамках Межгосударственного технического комитета по стандартизации МТК 515 «Неразрушающий контроль».

11. О предложениях в проект повестки 36-го заседания НТКМетр.

12. О дате и месте проведения 15-го заседания РГ НК.

На заседании была актуализирована программа работ по стандартизации, метрологии и оценке соответствия в области неразрушающего контроля и предложено утвердить актуализированную программу на очередном заседании НТКМетр. Актуализированная программа работ и другие материалы заседания размещены в свободном доступе на официальном сайте Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (easc.org.by) в разделе «Заседания – Рабочая группа по неразрушающему контролю НТКМетр».

Статья поступила в редакцию 03.12.12

**12-я Международная выставка по неразрушающему
контролю и технической диагностике
в промышленности**

26-28 марта 2013 в Москве на территории СК «Олимпийский» состоится 12-я Международная выставка «NDT Russia – неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности».

На выставке будет представлен широкий спектр приборов неразрушающего контроля.

Подробная информация на сайте:

<http://ndt-russia.ru>

Тел.+7 (812) 380-60-00

**6-я Центральноазиатская Международная выставка
«Металлургия. Машиностроение. Станкостроение.
Промышленная Автоматизация - Machinery Central Asia 2013»**

8-10 октября, 2013 г., НВК «Узэкспоцентр», Ташкент, Узбекистан.

Разделы выставки:

- Metallurgy;
- Machine building;
- Machine building production and automation of production;
- Instruments and equipment for non-destructive control and technical diagnosis in industry.

За подробной информацией обращайтесь к организаторам:

ITE Uzbekistan

Пр-т Мустакиллик, 59а

Ташкент, 100000, Узбекистан

Тел. +(998 71) 113 01 80, Факс +(998 71) 237 22 72

E-mail: mca@ite-uzbekistan.uz

Сайт: www.mca.ite-uzbekistan.uz

(См. 4 страницу обложки)



Белоногий Дмитрий Юрьевич
Belonogiy Dmitriy Yuryevich

филиал ОАО «Химремонт» – «Транснефтедиагностика»,
инженер по сварке и дефектоскопии
Адрес: г. Гомель, ул. Мазурова, д. 32, кв. 60
Тел.: 78-45-89,
e-mail: wanderclyff@mail.ru



Литвиновский Дмитрий Андреевич
Litvinouski D.A.

ООО «ИнжСпецСтройПроект»,
заместитель директора
Адрес: пр. Независимости, 183, помещение 2, Минск, 220125,
Беларусь
Тел.: +375 (17) 289-60-76



Матюк Владимир Федорович
Matyuk V.F.

доктор технических наук
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
заведующий лабораторией
Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16
Тел. +(375 17) 284 18 55,
e-mail: matyuk@iaph.bas-net.by



Мацулевич Олег Владимирович
Matsulevich O.V.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
научный сотрудник
Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16
Тел.: +(375 17) 284 24 38,
e-mail: matsulevich@iaph.bas-net.by



Мигун Николай Петрович
Migoun N.P.

Доктор физико-математических наук
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
директор
Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16
Тел./факс (+375 17) 284 17 94,
e-mail: migoun@iaph.bas-net.by



Никищенко Алексей Николаевич
Nikishenko A.N.

Севастопольский национальный технический университет,
кафедра высшей математики,
аспирант,
Тел. (+38063)6332552,
e-mail: sklibur@rambler.ru



Обжерин Юрий Евгеньевич
Obzherin Yu.E.

*доктор технических наук, профессор,
Севастопольский национальный технический университет,
зав. кафедры высшей математики,
Тел. (+380692)435373,
e-mail: objsev@mail.ru*



Рудницкий Валерий Аркадьевич
Rudnitsky V.A.

*доктор технических наук, профессор
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
заведующий лабораторией
Адрес: 220072, г. Минск, академическая, 16
Тел.: +(375 17) 284 24 38
E-mail: rudnitsky@iaph.bas-net.by*



Сергеев Сергей Сергеевич
Sergeev S.

*кандидат технических наук, доцент
Белорусско-Российский университет,
заведующий кафедрой
Адрес: 212005, г. Могилев, ул. Ленинская, 89
Тел.: +375 222 22 52 12,
e-mail: sss@tut.by*



Федоров Владислав Викторович

*Республиканское унитарное предприятие
«Белорусский государственный институт метрологии»,
ведущий инженер производственно-исследовательского отдела
радиоэлектронных измерений
E-mail: pozdeeva@belgim.by*



Холодилев Олег Викторович
Kholodilov Oleg Viktorovich

*доктор технических наук, профессор
Белорусский государственный университет транспорта,
заведующий кафедрой «НК и ТД»
Адрес: г. Гомель, ул. Красноармейская, д. 6а, кв. 48
Тел.: 95-39-14, 77-52-10
e-mail: olhol@belsut.gomel.by*

**Правила для авторов
научно-практического журнала
«Неразрушающий контроль и диагностика»**

Для публикации оригинальной статьи авторы должны представить в редакцию следующие материалы:

1. Авторское заявление с указанием контактной информации (в электронном и бумажном виде).

2. Направление от организации, в которой выполнялась работа (в бумажном виде на бланке организации). Направление не требуется, если работа выполнялась за рубежом.

3. Файл с текстом статьи в формате WinWord, а также в бумажном виде или в электронном в формате pdf. Если одновременно с русским текстом статьи по желанию авторов публикуется ее английский перевод, он представляется отдельно.

4. Файлы в формате WinWord с текстом аннотации на русском и английском языках. Перевод на английский язык осуществляется авторами. Каждая аннотация, кроме собственно текста, должна включать в себя заглавие статьи, фамилии и инициалы авторов, также на русском и английском языках.

5. Файл в формате WinWord, в котором следует указать информацию для Авторского указателя:

- на русском языке – сведения об авторах (фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, звание, должность, место работы, телефон, факс, адрес электронной почты и другая контактная информация по усмотрению автора);

- на английском языке – транслитерацию фамилий и имен авторов, а также название учреждений, где выполнялась работа.

6. Фотографии авторов в электронном виде для размещения в Авторском указателе. Фамилия автора должна входить в имя файла с фотографией.

Бумажные версии документов могут быть представлены в редакцию любым из следующих способов:

- отправлены по факсу редакции: **(+375 17) 284 17 40;**

- присланы обычной почтой или переданы непосредственно по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 16, **Государственное предприятие «Диатех», редакция журнала «Неразрушающий контроль и диагностика».**

Электронные версии документов должны быть присланы в редакцию по электронной почте на адрес *info@science.by*.

К публикации в журнале «Неразрушающий контроль и диагностика» принимаются статьи, прошедшие рецензирование. Поступившая в редакцию рукопись направляется по выбору редакции на отзыв специалисту в данной области исследований. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала на основании экспертных оценок рецензентов с учетом соответствия представленных материалов тематической направленности журнала, их научной значимости и актуальности. Рукопись, получившая отрицательные отзывы двух независимых рецензентов, решением редколлегии отклоняется.

Как правило, объем статьи не должен превышать 10-15 страниц машинописного текста (включая таблицы и список литературы на отдельных страницах), количество иллюстраций – не больше четырех. Объем научного обзора не должен превышать 25 страниц.

Статьи должны быть написаны на русском (или английском) языке, отредактированы и оформлены в соответствии с нижеследующими требованиями.

Основной текст статьи

Каждая статья должна представлять собой файл, содержащий текст, набранный в редакторе WinWord, шрифт Cambria, кегль 14 пунктов, 1 интервал. При отсутствии инсталлированного шрифта Cambria допустимо использовать шрифт Times New Roman. Должен быть включен режим автоматического переноса.

Перед текстом статьи отдельной строкой в левом верхнем углу обязательно должен быть приведен код универсальной десятичной классификации (УДК) тематики статьи (шрифт – кегль 12).

Статья начинается с заголовка, который пишется строчными буквами полужирным шрифтом размером 16 пунктов. Далее следует список авторов в формате «фамилия, инициалы», который пишется полужирным шрифтом 14 пунктов. Имена авторов разделяются запятыми.

Текст аннотации в виде абзаца с выравниванием по ширине с отступами 5 мм справа и слева шрифтом 12 пунктов.

Страницы статьи не должны быть пронумерованы. Поля на странице должны быть: левое и правое – по 25 мм, верхнее – 30 мм, нижнее – 32 мм.

Графические иллюстрации

Таблицы, иллюстрации и подписи к ним размещаются в тексте статьи при первом их упоминании. При этом следует избегать использования опции «обтекание текста».

Таблицы снабжаются тематическими заголовками и нумеруются арабскими цифрами в порядке их упоминания в тексте. Все графы в таблицах должны иметь заголовки. Сокращение слов в таблицах не допускается. Все аббревиатуры должны быть расшифрованы в сносках к таблице.

Графики и схемы должны выполняться с помощью графического редактора CorelDraw. Использование графических средств Microsoft Office крайне нежелательно из-за частых искажений рисунков при верстке, преобразовании в pdf-формат и печати. Рисунки следует присылать в виде отдельных файлов с сохранением форматов, использованных для их создания. Недопустимо использовать при создании рисунков «волосяные» линии (1/4 пункта). Эти линии хорошо видны на экране монитора, но исчезают в печатной версии документа.

Фотографии представляются в виде отдельных файлов в форматах jpeg, tiff, bmp, png с разрешением 300-600 dpi.

Штриховые рисунки, выполненные от руки, должны быть отсканированы в режиме bitmap с разрешением не ниже 600 dpi и сохранены в формате tiff.

Формулы

Математические формулы набираются в WinWord встроенным редактором формул, в качестве которого в последних версиях WinWord используется упрощенный вариант редактора формул MathType. В случае недостаточности упрощенного варианта необходимо инсталлировать полную коммерческую версию MathType. Уравнения располагаются по центру строки и нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках в порядке их упоминания в тексте. Номера уравнений выравниваются по правому краю строки. Уравнения отделяются от текста сверху и снизу одной пустой строкой. При написании нескольких уравнений они также разделяются пустой строкой.

В НОМЕРЕ

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ	3
Полумарковская модель многокомпонентной системы на основе характеристик отдельных компонентов <i>Никишенко А.Н., Обжерин Ю.Е.</i>	3
О вкладе термоактивационной составляющей акустической эмиссии при трении <i>Холодилов О.В., Белоногий Д.Ю.</i>	14
Приборы магнитной структуроскопии на основе локального двухполярного импульсного намагничивания <i>Матюк В.Ф.</i>	20
Определение модуля упругости бетона методом динамического индентирования <i>Мацулевич О.В., Рудницкий В.А., Литвиновский Д.А.</i>	46
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СООБЩЕНИЯ	57
Итоги 4-й международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» <i>Мигун Н.П., Сергеев С.С.</i>	57
В ОРГАНИЗАЦИЯХ НК И ТД	65
14-е заседание Рабочей группы по неразрушающему контролю научно-технической комиссии по метрологии МГС <i>Федоров В.В.</i>	65
КОНФЕРЕНЦИИ И ВЫСТАВКИ НК И ТД	67
Авторский указатель	68
Правила для авторов	70



6-я Центральноазиатская
Международная
выставка



МЕТАЛЛУРГИЯ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
СТАНКОСТРОЕНИЕ

8-10 Октября 2013
Узэкспоцентр, Ташкент, Узбекистан

По вопросам участия обращайтесь по адресу:



ITE Uzbekistan
пр-т Мустафелдиқова, 100000, Узбекистан
Тел: (+998 71) 418 08 80, 40401, (+998 71) 287 22 72
E-mail: ite@iteuzbekistan.uz
Web: www.iteuzbekistan.uz

[facebook.com/ITEUzbekistan.uz](https://www.facebook.com/ITEUzbekistan.uz)