



# ИССЛЕДОВАНИЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ НЕОДНОРОДНОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

*Экспериментально исследовано влияние изменений размеров модельных образцов неоднородного сечения на их намагничивание в разомкнутой магнитной цепи. Установлены закономерности формирования остаточной намагниченности образцов. Дана интерпретация полученных результатов и рекомендации по их использованию при магнитном контроле физико-механических свойств стальных болтов массового производства.*

*The experimental investigation revealed how variations in size of sample products with heterogeneous profiles influence their magnetization in an open magnetic circuit. Regularities in formation of the residual magnetization in the specimen were determined. Interpretation of the obtained results and recommendations on their application in magnetic testing of physico-mechanical properties of steel bolts in mass production are provided.*

На металлургических и машиностроительных предприятиях выпускаются массовые партии изделий из сталей и чугунов заданной структуры. Отклонения в химическом составе и режимах термообработки изделий от заданных приводят к недопустимым изменениям их свойств, поэтому необходимо контролировать всю продукцию. Прямые методы определения механических свойств являются разрушающими и не могут быть использованы для контроля качества изделий, предназначенных для эксплуатации. Современный уровень развития науки позволяет прогнозировать возможность магнитного неразрушающего контроля режимов термообработки, химического, структурного и фазового состава изделий из конструкционных ферромагнитных материалов, а современный уровень приборной реализации метода позволяет осуществлять такой контроль в автоматическом режиме в заводских цехах и лабораториях [1–3]. Разработанные аппроксимация изменения намагниченности материалов в магнитном поле и методика расчета [4] позволяют с достаточной для практики точностью по коэрцитивной силе, намагниченности насыщения и остаточной намагниченности материала изделий, их размерам и напряженности  $H_e$  намагничивающего поля рассчитать предельную и частные петли гистерезиса конструкционных сталей, чугунов и изделий из них, остаточную намагниченность  $M_d$  изделий.

Для анализа возможностей магнитного контроля физико-механических свойств изделий из конструкционных ферромагнитных материалов необходимо знать их размагничивающий фактор. Разработанные рекомендации [5–7] по применению формул для расчета центрального коэффициента  $N$  размагничивания могут быть использо-

ваны для анализа процесса и результата намагничивания промышленных изделий, имеющих неоднородное сечение по длине (оси, штифты, nipples, муфты, гайки, шайбы). Однако не все промышленные изделия имеют простую форму. Например, на машиностроительных заводах выпускается широкая номенклатура ответственных болтов, характерной особенностью которых является неоднородность сечения по длине — наличие на торце «головки» большего сечения. На металлургических предприятиях также выпускаются изделия, имеющие неоднородное по длине сечение, например, пробка и муфта переходная, представляющие собой составной полый цилиндр с различными диаметрами и длинами составляющих.

Для теоретического анализа намагничивания таких изделий без дополнительного анализа не могут быть использованы формулы, рекомендованные в работах [5–7] для расчета  $N$  тел неоднородного сечения. Само понятие «центрального» коэффициента размагничивания для изделий неоднородного по длине сечения носит условный характер, так как координата сечения изделия, имеющего при намагничивании максимальную намагниченность, зависит, в общем случае, не только от соотношения длин участков различного сечения, но и от магнитных свойств материала и напряженности намагничивающего поля.

*Целью работы является выявление особенностей намагничивания и формирования остаточной намагниченности изделий неоднородного по длине сечения.*

Для проведения экспериментальных исследований процесса и результата намагничивания изделий неоднородного по длине сечения был изготовлен комплект модельных образцов, внешний вид которых в сопоставлении с реальными изделиями представлен на рис. 1.



Рис. 1. Модельные образцы и промышленные изделия неоднородного по длине сечения

Образцы длиной по 80 мм каждый изготовлены из одного прутка диаметром 18 мм стали 40Х в состоянии поставки. Участок меньшего диаметра (9 мм) получен на токарном станке на режимах резания, не приводящих к изменению свойств металла. Длина участков меньшего диаметра на различных образцах составляла 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 75 и 80 мм. Форма модельных образцов соответствует формам реальных промышленных изделий (рис. 1).

Для экспериментов использовали прибор «Магнитный анализатор качества структуры изделий МАКСИ (АНБ-692)» [3], предназначенный для 100%-го контроля механических свойств и разбраковки изделий в процессе движения, реализующий двухпараметровый метод контроля. Изделие (рис. 2, а), свободно падая вдоль направляющей, проходит через область со стационарным полем намагничивающей катушки, напряженность которого может ступенчато регулироваться в диапазоне от 7,4 до 37 кА/м. Исходная

высота падения изделий установлена такой, чтобы не происходило зависания изделия в намагничивающем поле. Преобразователь, предназначенный для измерения максимального магнитного потока  $\Phi_m$  в изделии при намагничивании, охватывает направляющую и расположен в центральном сечении намагничивающей катушки. Для измерения остаточного магнитного потока  $\Phi_d$  предназначен преобразователь, охватывающий направляющую и расположенный в системе компенсирующих катушек. При движении вдоль направляющей изделие вызывает изменение магнитных потоков  $\Phi_1(t)$  и  $\Phi_2(t)$  (рис. 2, б), сцепленных соответственно с первым и вторым преобразователями, и индуцирует в них ЭДС:

$$E_1(t) = -N_{b1} \frac{d\Phi_1(t)}{dt}, \quad E_2(t) = -N_{b2} \frac{d\Phi_2(t)}{dt}, \quad (1)$$

где  $N_{b1}, N_{b2}$  — количество витков в соответствующих катушках.

ЭДС  $E_1(t)$  и  $E_2(t)$  поступают на входы идентичных измерительных каналов, выделяющих из них однополярные импульсы напряжения (заштрихованные на рис. 2, б) и осуществляющие аналоговое интегрирование выделенных импульсов. В момент времени  $t_1$  начала интегрирования ЭДС  $E_1(t)$  поток  $\Phi_1(t_1) = \Phi_n + \Phi_m$  ( $\Phi_n$  — магнитное потокоцепление намагничивающей и первой измерительной катушек), а в момент времени  $t_3$  окончания интегрирования  $E_1(t)$  поток  $\Phi_1(t_3) = \Phi_n$ . В момент времени  $t_2$  начала интегрирования ЭДС  $E_2(t)$  поток  $\Phi_2(t_2) \approx 0$ , а в момент времени  $t_4$  окончания интегрирования ЭДС  $E_2(t)$  поток  $\Phi_2(t_4) = \Phi_d$ . Для результирующих сигналов  $U_1$  и  $U_2$  первого и второго измерительного каналов получено [3]:

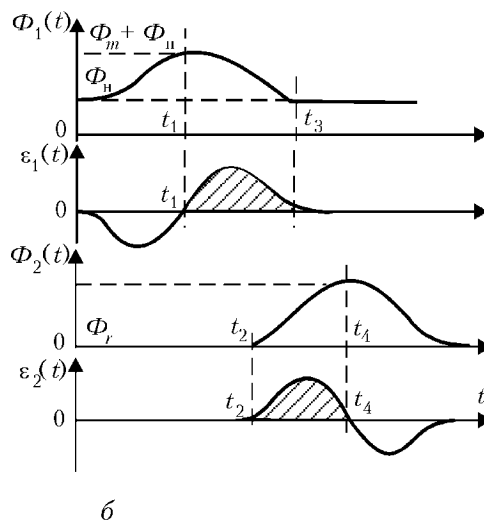
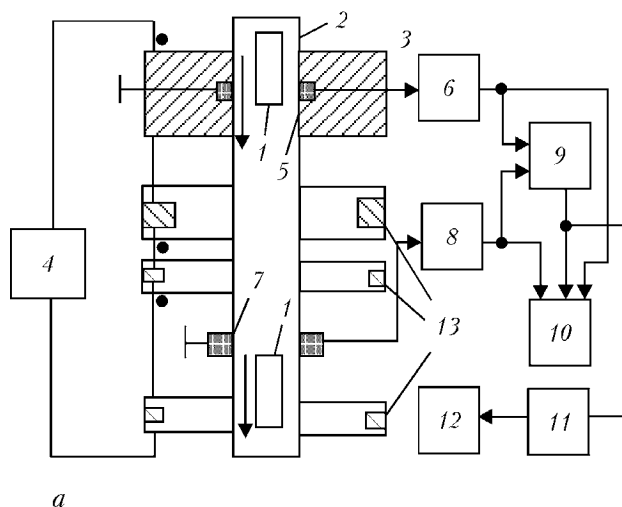


Рис. 2. Функциональная схема (а) и временные диаграммы работы (б) прибора МАКСИ (АНБ-692): 1 — контролируемое изделие; 2 — направляющая; 3 — намагничивающая катушка; 4 — источник тока; 5, 7 — измерительные преобразователи; 6, 8 — измерительные каналы; 9 — блок цифровых компараторов; 10 — блок вывода на печать; 11 — блок разбраковки; 12 — исполнительный механизм; 13 — компенсирующие катушки



$$U_1 = \frac{1}{K_n} \int_{t_1}^{t_3} E_1(t) dt = -\frac{N_{b1}}{K_n} [\Phi_1(t_3) - \Phi_1(t_1)] = \frac{N_{b1}}{K_n} \Phi_m, \quad (2)$$

$$U_2 = \frac{1}{K_n} \int_{t_2}^{t_4} E_2(t) dt = \frac{N_{b2}}{K_n} [\Phi_2(t_2) - \Phi_2(t_4)] = \frac{N_{b2}}{K_n} \Phi_d,$$

где  $K_n$  — постоянная интегрирования.

Сигналы  $U_1$  и  $U_2$  индицируются на цифровых индикаторах « $\Phi_m$ » и « $\Phi_d$ » прибора. Параметры  $N_{b1}$ ,  $N_{b2}$  и  $K_n$  выбраны так, что  $N_{b1}/K_n = 2 \cdot 10^5$  В/Вб, а  $N_{b2}/K_n = 2 \cdot 10^6$  В/Вб. Относительная погрешность измерения прибора составляет не более 2,5 %.

Использование прибора МАКСИ (АНБ-692) позволяет при пролете изделия сквозь преобразователь определить значения наибольших максимального  $\Phi_m$  и остаточного  $\Phi_d$  магнитных потоков в изделии независимо от того, какому сечению изделия эти значения магнитных потоков соответствуют.

Для визуализации сигнала ЭДС измерительной катушки, индуцированного в ней движущимся образцом, использован запоминающий осциллограф С8-13.

**Методика и результаты эксперимента.** Экспериментальные исследования влияния формы экспериментальных образцов (рис. 1) на значения максимального  $\Phi_m$  и остаточного  $\Phi_d$  магнитных потоков в образцах проведены в режиме их свободного падения в преобразователе прибора МАКСИ (АНБ-692). Для предотвращения смещения образцов в канале преобразователя прибора диаметром 40 мм использовали центрирующую трубку внутренним диаметром 20 мм. Исследования проводили при пяти значениях напряженности намагничивающего поля  $H_e$  в намагничивающей катушке прибора:  $H_e \approx 7,4; 14,8; 22,2; 29,6$  и  $37$  кА/м. После каждого измерения образцы тщательно размагничивались. Полученные результаты исследований влияния длины  $X$  участка большего диаметра на величины  $\Phi_m$  и  $\Phi_d$  в модельных образцах представлены на рис. 3. Осциллограммы ЭДС измерительной катушки средним диаметром 32 мм, содержащей 1000 витков, при падении сквозь нее с высоты 17 см экспериментальных образцов (участком большего диаметра вниз) в остаточном намагниченном состоянии после намагничивания в поле  $H_e \approx 37$  кА/м представлены на рис. 4.

**Обсуждение полученных результатов.** Полученные результаты показывают, что в приложенном поле  $H_e$  величина максимального магнитного потока  $\Phi_m$  в образцах монотонно увеличивается (рис. 3, а) с увеличением длины  $X$  области большего диаметра. При этом характер зависимостей  $\Phi_m(X)$  при различных напряженностях  $H_e$  намагничивающего поля свидетельствует, что к техни-

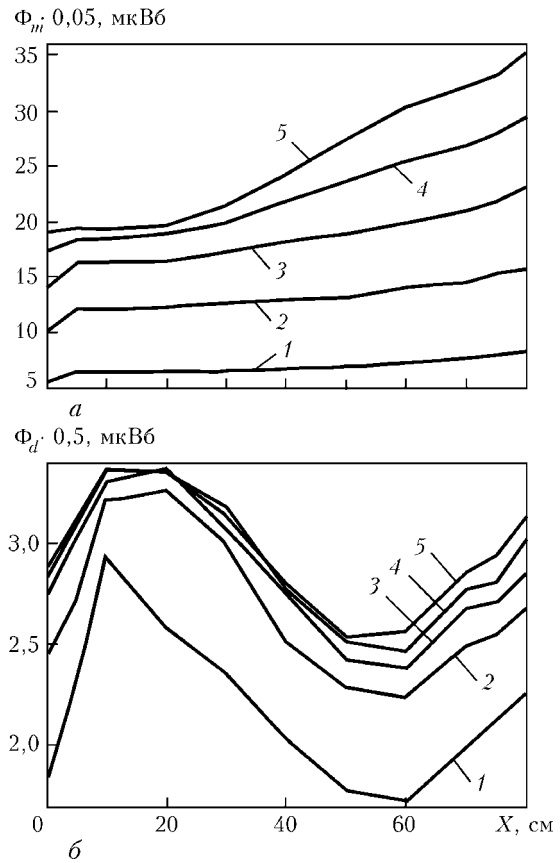


Рис. 3. Влияние длины  $X$  участка большего диаметра на величины максимального  $\Phi_m$  (а) и остаточного  $\Phi_d$  (б) магнитных потоков в экспериментальных образцах из стали 40Х длиной 80 мм. Измерение прибором МАКСИ (АНБ-692) при  $H_e \approx 7,4; 14,8; 22,2; 29,6$  и  $37$  кА/м (соответственно кривые 1–5)

ческому насыщению с увеличением  $H_e$  быстрее приближается образец меньшего диаметра. Это соответствует представлениям [8] о характере изменения  $\Phi_m$  в сплошном цилиндре с увеличением его «среднего» диаметра.

У образцов в остаточном намагниченном состоянии зависимости  $\Phi_d(X)$  имеют немонотонный и неоднозначный характер (рис. 3, б). При крайних значениях  $X = 0$  и  $X = 80$  мм (для сплошных цилиндров длиной 80 мм и диаметром соответственно 9 и 18 мм) характер изменения остаточного магнитного потока  $\Phi_d$  соответствует представлениям [4, 8, 9] о характере изменения  $\Phi_d$  в сплошном цилиндре с увеличением его диаметра. Но при малых значениях  $X = 5 \dots 10$  мм имеет место резкое (особенно после намагничивания в слабом поле) возрастание остаточного магнитного потока в образце. В результате  $\Phi_d$  в образце с длиной области большего диаметра  $X = 10$  мм в  $2 \dots 1,3$  раза (в зависимости от напряженности  $H_e$  намагничивающего поля) превышает  $\Phi_d$  в однородном по длине цилиндре меньшего диаметра и в  $1,4 \dots 1,1$  раза превышает  $\Phi_d$  в однородном по длине цилиндре большего диаметра. При этом, как свидетельствуют осциллограммы рис. 4, общее

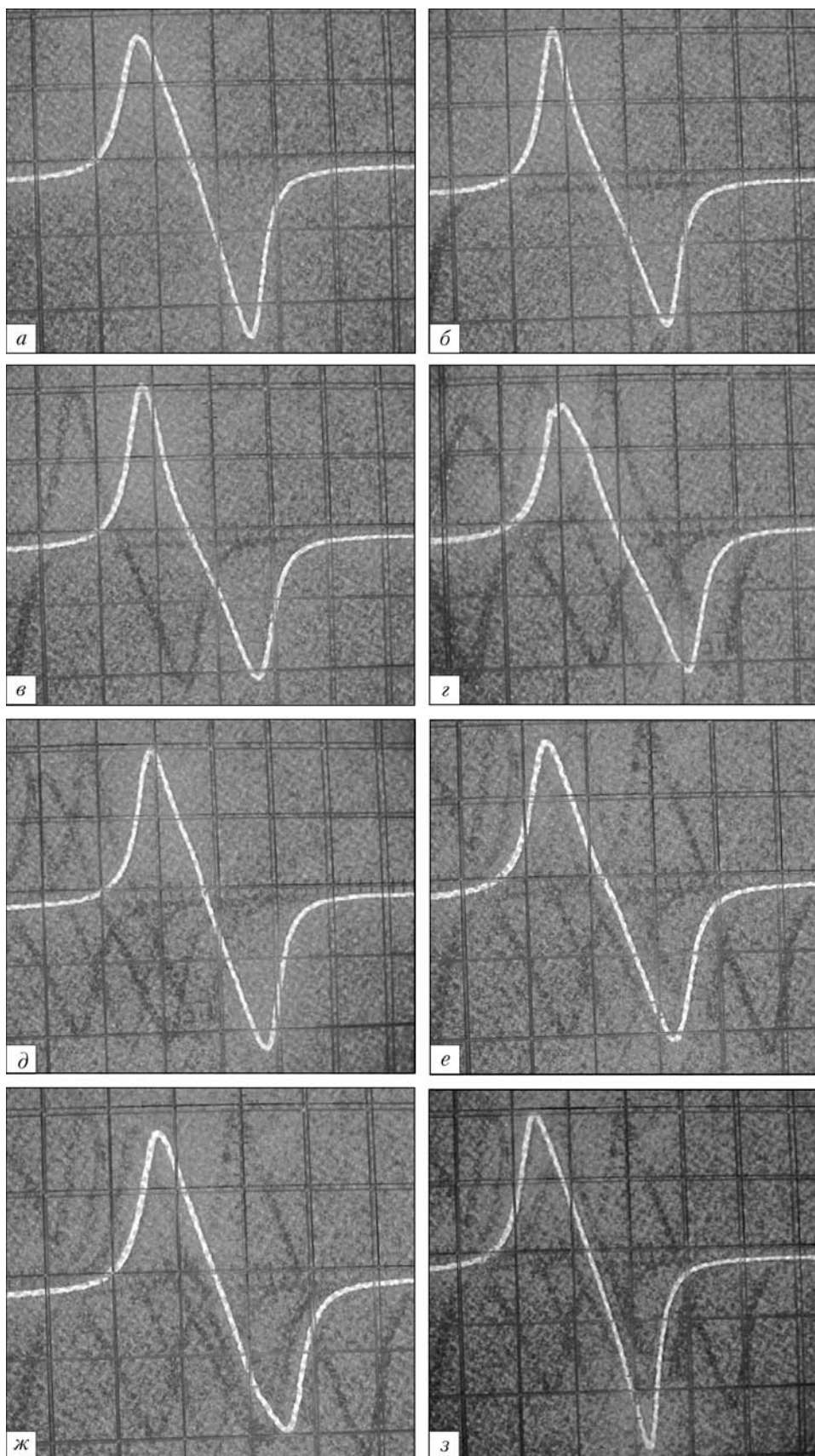


Рис. 4. Осциллограммы (20 мс/дел, 50 мВ/дел) ЭДС измерительной катушки при падении сквозь нее намагниченных образцов с различной длиной  $X$  области большего диаметра (а-з — соответственно для  $X = 0; 5; 10; 20; 40; 60; 70; 80$  мм)

монотонное распределение остаточного магнитного потока вдоль образца не нарушается.

При изменении области большего диаметра экспериментальных образцов в диапазоне  $X =$



$= 10...20$  мм  $\Phi_d$  в образцах практически не изменяется (рис. 3, б), а в диапазоне изменения  $X = 20...50$  мм происходит монотонное и существенное уменьшение  $\Phi_d$  в образцах. При  $X = 50...60$  мм (в этом диапазоне  $\Phi_d$  в образцах практически не меняется) величина  $\Phi_d$  составляет 85...90 %  $\Phi_d$  в однородном по длине цилиндре меньшего диаметра и 70...80 %  $\Phi_d$  в однородном по длине цилиндре большего диаметра. При этом, как свидетельствуют осциллограммы рис. 4, монотонное распределение остаточного магнитного потока вдоль образца не нарушается. В диапазоне изменения  $X = 60...80$  мм происходит монотонное увеличение  $\Phi_d$  в образцах до значения, равного  $\Phi_d$  в образце большего диаметра.

Установленное явление аномального возрастания остаточного магнитного потока  $\Phi_d$  в образце с малой длиной  $X$  области большего диаметра важно учитывать при выборе режима намагничивания промышленных изделий типа «болт» (рис. 1). Это явление может быть интерпретировано как снижение условного «центрального» коэффициента  $N'$  размагничивания таких изделий за счет увеличения их «эффективной» длины, связанной с увеличением площади поверхности образца в области его торца. В соответствии с этим снижением коэффициента  $N'$  должна быть скорректирована требуемая для намагничивания изделия напряженность намагничивающего поля [10] и установлен размагничивающий фактор изделия, используемый при расчете его остаточной намагниченности по методике, описанной в работах [1, 2, 4].

## Выводы

В результате проведенных исследований экспериментально установлено, что увеличение длины области большего диаметра при фиксированной общей длине изделия монотонно увеличивает максимальное значение магнитного потока в изделии, измеренное в приложенном поле, и немонотонно и неоднозначно изменяет величину остаточного магнитного потока в изделии. Явление резкого возрастания остаточного магнитного потока в изделии при малых длинах области большего диа-

метра может быть интерпретировано как снижение условного «центрального» коэффициента  $N'$  размагничивания таких изделий за счет увеличения их «эффективной» длины, связанной с увеличением площади поверхности образца в области его торца. В соответствии с этим снижением  $N'$  изделий должна быть скорректирована требуемая для их магнитного структурного анализа напряженность намагничивающего поля и установлен размагничивающий фактор изделия, используемый при расчете его остаточной намагниченности.

1. Сандомирский С. Г. Магнитный контроль структуры стальных и чугунных изделий. Современное состояние (обзор) // Литье и металлургия. — 2008. — № 2. — С. 33–42.
2. Сандомирский С. Г. Современные возможности магнитного контроля структуры изделий (Обзор) // В мире неразруш. контроля. 2009. — № 1.
3. Сандомирский С. Г. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (Обзор) // Дефектоскопия. — 1996. — № 7. — С. 24–46.
4. Сандомирский С. Г. Остаточная намагниченность ферромагнитного тела, намагниченного в разомкнутой магнитной цепи // Там же. — 1997. — № 8. — С. 50–59.
5. Сандомирский С. Г. Рекомендации по применению в технических расчетах формул для центрального коэффициента размагничивания сплошных и полых цилиндров, стержней и пластин из материала с высокой магнитной проницаемостью (Обзор) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 3. — С. 38–46.
6. Сандомирский С. Г. Анализ формул для расчета центрального коэффициента размагничивания полых цилиндров из материала с высокой магнитной проницаемостью при намагничивании ортогонально образующей // Электротехника. — 2008. — № 3. — С. 45–51.
7. Сандомирский С. Г. Интерполяционная формула для расчета центрального коэффициента размагничивания коротких полых цилиндров при намагничивании параллельно образующей // Там же. — 2009. — № 2. — С. 52–55.
8. Сандомирский С. Г. Изменение чувствительности магнитного метода контроля физико-механических свойств сталей при намагничивании изделий в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможностей метода) // Дефектоскопия. — 1998. — № 7. — С. 72–81.
9. Сандомирский С. Г. Чувствительность остаточной намагниченности ферромагнитных изделий к магнитным характеристикам их материалов и геометрическим параметрам // Там же. — 1990. — № 12. — С. 53–59.
10. Сандомирский С. Г. Выбор величины намагничивающего поля при магнитоструктурном анализе ферромагнитных изделий // Там же. — 1991. — № 7. — С. 42–48.