

---

# МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ

---

УДК 620.179.14

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДВУХПОЛЯРНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ

*Матюк В.Ф., Бурак В.А.*

Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь  
e-mail: veronika.burak@gmail.com

*Рассмотрены особенности двухполярного импульсного перемагничивания изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей для контроля качества проведенной термообработки и структурного состояния этих изделий. Предложены способы двухполярного импульсного перемагничивания, обеспечивающие однозначный контроль изделий из рассматриваемых марок сталей.*

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, намагничивание, импульсный магнитный метод, градиент поля остаточной намагниченности.

### Введение

Важнейшей проблемой машиностроения является обеспечение необходимых эксплуатационных свойств выпускаемой продукции, в том числе и изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей, подвергнутых термообработке – закалке и последующему отпуску – для получения необходимых механических свойств. Основным методом контроля качества термообработки изделий из среднеуглеродистых конструкционных сталей является измерение твердости, повреждающее поверхность контролируемого изделия, и вследствие выборочного контроля не гарантирующее качество всех изделий в партии.

Среди методов неразрушающего контроля структурного состояния ферромагнитных материалов и изделий, определяемых качеством проведенной термообработки, широкое распространение получили магнитные методы. Например, при наличии однозначности между механическими и магнитными свойствами фер-

ромагнитных сталей хорошо зарекомендовал себя импульсный магнитный метод неразрушающего контроля механических свойств и структуры ферромагнитных изделий [1–5]. В общей формулировке импульсный магнитный метод [1] заключается в локальном импульсном намагничивании контролируемого изделия неоднородным магнитным полем накладного соленоида и измерении градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, по величине которого и заранее установленным корреляционным связям в соответствии с ГОСТ 30415-96 определяют механические свойства или соответствующую температуру проведенной термообработки. Измерение градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности при однополярном импульсном намагничивании для конструкционных среднеуглеродистых и других марок сталей не обеспечивает однозначности и требуемой точности контроля (рисунок 1), однако обладает большой производительностью и помехоустойчивостью.

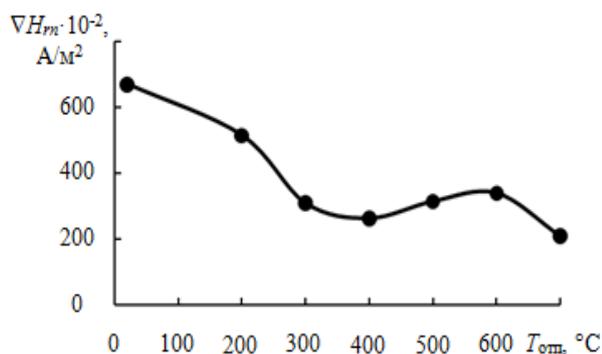


Рисунок 1 – Зависимость градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности от температуры отпуска дисков из стали 45 при импульсном намагничивании

Учитывая все преимущества и недостатки, для решения задачи обеспечения однозначности контроля качества термообработки изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей и их структурного состояния является целесообразным дальнейшее развитие импульсного магнитного метода.

Целью работы являлся поиск новых способов импульсного магнитного метода, обеспечивающих однозначность и достаточную точность неразрушающего контроля качества термообработки и структурного состояния изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей, основанных на применении схем двухполярного перемагничивания.

**Способы импульсного магнитного контроля с применением двухполярного импульсного перемагничивания и информативные параметры контроля**

Двухполярное перемагничивание [6], когда один из импульсов магнитного поля намагничивает контролируемое изделие до состояния технического насыщения, а второй, противоположный по направлению первому импульсу и меньший по амплитуде, осуществляет его частичное размагничивание, позволяет повысить точность неразрушающего контроля как за счет изменения хода кривой зависимости информативного параметра (градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности), так и благодаря возможности контроля по двум магнитным параметрам, измеренным после окончания намагничивающего и размагничивающего импульсов определенной амплитуды.

В работе [7] показано, что чувствительность контроля качества термообработки изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей существенно зависит от формы, длительности и амплитуды намагничивающего и размагничивающего импульсов. Также в указанной работе установлено, что для повышения чувствительности и уменьшения влияния мешающих факторов, в особенности вклада в величину градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности поля вихревых токов, возникающих при спаде намагничивающего импульса, необходимо, чтобы намагничивающий и размагничивающий импульсы имели форму апериодического разряда конденсаторов (рисунок 2) длительностью не менее 3,5 мс, а амплитуда намагничивающего импульса превышала коэрцитивную силу изделия. Методики выбора амплитуды размагничивающего импульса, позволяющие однозначно контролировать качество термообработки изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей, более подробно рассмотрены ниже.

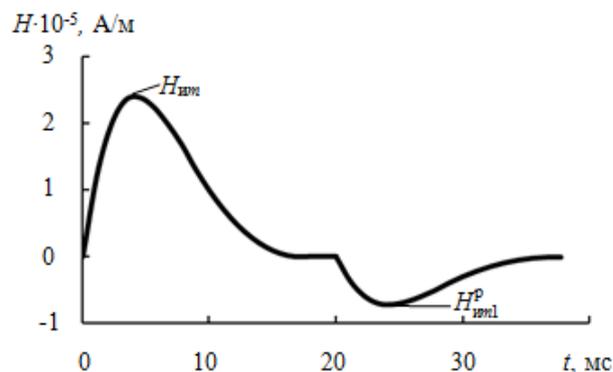


Рисунок 2 – Намагничивающий и размагничивающий импульсы при двухполярном импульсном намагничивании и перемагничивании

Одним из способов повышения точности импульсного магнитного метода с применением двухполярного перемагничивания применительно к контролю качества отпуска изделий из среднеуглеродистых сталей является намагничивание и размагничивание с выбором амплитуды размагничивающего импульса, обеспечивающей полное размагничивание самого мягкого из числа контролируемых изделий [8]. На изделие воздействуют импульсным магнитным полем  $H$  одного направления с амплитудой  $H_{им}$ , превышающей коэрцитивную силу изделия. Затем изделие частично размагничивают импульсным магнитным полем противоположно-

го направления с амплитудой  $H_{\text{ит}}^p$ , недостаточной для перемагничивания изделия, и после частичного размагничивания измеряют градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности  $\nabla H_m$  в центре намагниченного участка, по величине которого судят о температуре проведенной термообработки. Амплитуда размагничивающего импульса должна быть такой, чтобы после его воздействия величина градиента на изделии, подвергнутом отпуску при максимальной для данного типа изделий температуре, равнялась нулю. Зависимость градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности частично размагниченных изделий из стали 45 от температуры их отпуска при привязке амплитуды размагничивающего импульса к результатам изменений на эталонном изделии, подвергнутом отпуску при 700 °С, представлена на рисунке 3.

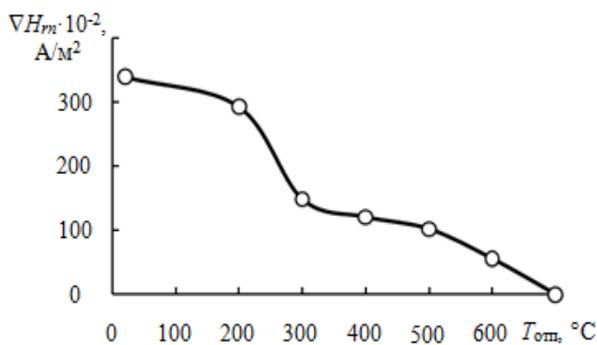


Рисунок 3 – Зависимость градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности от температуры отпуска при привязке амплитуды размагничивающего импульса к изделию с максимальной температурой отпуска закаленных от 850 °С дисков стали 45

Чувствительность импульсного магнитного метода с двухполярным перемагничиванием изделия по описанному выше способу можно существенно повысить. Для этого в качестве информативного параметра следует использовать не градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренный после окончания размагничивающего импульса, а сумму градиентов, измеренных после намагничивания и после частичного размагничивания, т.е. вести контроль температуры отпуска по двум параметрам, при условии, что амплитуда размагничивающего импульса такова, что градиент нормальной составляющей напряженности поля

остаточной намагниченности в центре намагниченного участка равен нулю на изделиях испытываемого сортамента, подвергнутых отпуску при минимальной температуре [9].

Повышение чувствительности достигается за счет разного хода зависимостей градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности в центре намагниченного участка от температуры при низкотемпературном, среднетемпературном и высокотемпературном отпуске после намагничивающего и после размагничивающего импульсов. Так, градиент  $\nabla H_{m_0}$  (рисунок 4, кривая 1) нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после окончания намагничивающего импульса более чувствителен к изменению температуры при низкотемпературном и при среднетемпературном отпуске и очень слабо (причем неоднозначно) зависит от температуры при высокотемпературном отпуске. В то же время градиент  $\nabla H_{m_1}$  нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после размагничивающего импульса (рисунок 4, кривая 2) более чувствителен к изменению температуры при высокотемпературном отпуске. Сумма этих градиентов  $\nabla H_{m_0} + \nabla H_{m_1}$  (рисунок 4, кривая 3) обеспечивает хорошую чувствительность (увеличение составляет 1,5–2 раза) во всем интервале изменения температуры отпуска (от 0 до 700 °С).

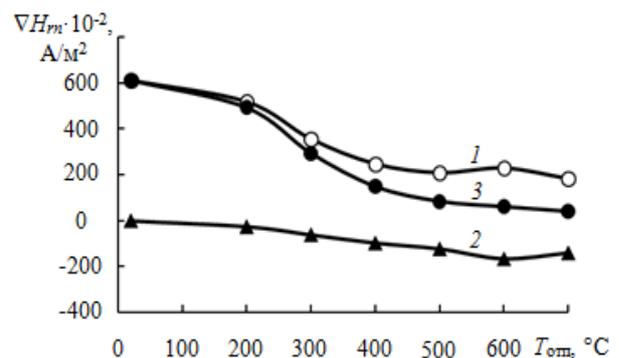


Рисунок 4 – Зависимость градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после окончания намагничивающего (1) и размагничивающего (2) импульсов и их суммы (3) от температуры отпуска закаленных от 850 °С дисков стали 45

По чувствительности этот способ сравним с многопараметровым импульсным магнитным методом [10], но обладает повышенной произ-

водительностью (только по одному намагничивающему и размагничивающему импульсу вместо пяти серий импульсов).

Хорошие результаты получаются и при использовании в качестве информативного параметра при импульсном магнитном контроле с двухполярным перемагничиванием суммы градиентов, измеренных после локального размагничивания намагниченного изделия импульсами разной амплитуды, первая из которых привязана к закаленному изделию (изделию с максимальной коэрцитивной силой), а вторая – к изделию, отпущенному при максимальной для испытуемого типа изделий температуре (изделию с минимальной коэрцитивной силой) [11].

При реализации такого варианта повышения чувствительности рассматриваемого метода контроля изделие сначала намагничивают импульсным магнитным полем в одном направлении с амплитудой  $H_{им}$ , доводящей его до локального технического насыщения. Затем изделие размагничивают импульсным магнитным полем противоположного направления с амплитудой  $H_{им}^p$ . Она выбирается заранее такой, чтобы после локального импульсного размагничивания эталонного изделия из числа контролируемых, подвергнутого отпуску при максимальной температуре, градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности в центре намагниченного участка этого изделия был бы равен нулю. После окончания размагничивания измеряют величину градиента  $\nabla H_{m1}$  на контролируемом изделии (рисунок 5, кривая 1). Затем контролируемое изделие повторно намагничивают в первом направлении импульсом с амплитудой  $H_{им}$  и частично размагничивают импульсом противоположного направления с амплитудой  $H_{им}^p$ . Амплитуда  $H_{им}^p$  выбирается заранее из условия, чтобы после размагничивания импульсом с такой амплитудой второго эталонного изделия из числа контролируемых, подвергнутого отпуску при минимальной для них температуре, градиент  $\nabla H_{m2}$  нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности в центре намагниченного участка этого изделия был бы равен нулю. После окончания второго частичного размагничивания контролируемого изделия измеряют величину градиента  $\nabla H_{m2}$  (рисунок 5, кривая 2), а о температуре отпуска судят по сумме изме-

ренных градиентов  $\nabla H_{m1} + \nabla H_{m2}$  (рисунок 5, кривая 3).

Повышение чувствительности контроля обусловлено тем, что градиент  $\nabla H_{m1}$ , измеренный после размагничивающего импульса с привязкой его амплитуды к отпущенному при максимальной для изделий данного типа температуре, более чувствителен к изменению температуры отпуска в диапазонах 200–300 °С и 550–700 °С. В то же время градиент  $\nabla H_{m2}$ , измеренный после размагничивающего импульса с привязкой его амплитуды к закаленному изделию, более чувствителен к изменению температуры отпуска от 200 до 600 °С. Сумма этих градиентов повышает чувствительность к температуре отпуска каждого из них в отдельности во всем диапазоне изменений температур отпуска.

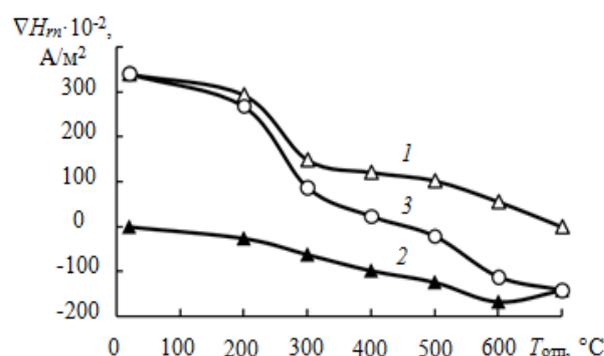


Рисунок 5 – Зависимость градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности локально намагниченного изделия после окончания первого (1) и второго (2) размагничивающего импульсов и их суммы (3) от температуры отпуска закаленных от 850 °С дисков стали 45

Таким образом, при контроле по сумме градиентов, измеренных после локального размагничивания импульсами разной амплитуды, первая из которых привязана к закаленному изделию (изделию с максимальной коэрцитивной силой), а вторая – к изделию, отпущенному при максимальной для испытуемого типа изделий температуре (изделию с минимальной коэрцитивной силой), удастся существенно повысить чувствительность измеряемого параметра к изменению температуры отпуска закаленных изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей. Это обеспечивает надежный контроль режима термообработки изделий машиностроения из сталей данного класса.

Экспериментально предложенные способы импульсного магнитного метода контроля были опробованы и показали высокую чувствительность (не ниже  $50 \text{ A}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ) и однозначность (коэффициенты корреляции не менее 0,93) на изделиях как из конструкционных среднеуглеродистых марок сталей, так и из конструкционных легированных сталей и инструментальных углеродистых и быстрорежущих марок сталей.

На основе предложенных способов импульсного магнитного метода с использованием двухполярного импульсного перемагничивания применительно к контролю качества проведенной термообработки изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей разработан импульсный магнитный анализатор ИМА-6 [12], который предназначен для неразрушающего контроля твердости изделий машиностроения, подвергаемых закалке с последующим средне- и высокотемпературным отпуском.

### **Заключение**

Предложены способы двухполярного перемагничивания при импульсном магнитном контроле изделий машиностроения, заключающиеся в импульсном намагничивании контролируемого изделия до состояния технического насыщения и последующем размагничивании импульсами с амплитудой, выбранной из условия полного размагничивания самого мягкого или самого твердого образца, позволяющие решить задачу неразрушающего контроля качества термообработки и структурного состояния изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей, подвергаемых закалке с последующим отпуском. На основе предложенных способов разработан импульсный магнитный анализатор ИМА-6.

### **Список использованных источников**

1. Мельгуй, М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М.А. Мельгуй. – Минск : Наука и техника, 1980. – 184 с.
2. Михеев, М.Н. Магнитные методы структурного

анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – М. : Наука, 1993. – 252 с.

3. Щербинин, В.Е. Магнитный контроль качества материалов / В.Е. Щербинин, Э.С. Горкунов. – Екатеринбург : УрО РАН, ИФМ, 1996. – 265 с.
4. Бида, Г.В. Магнитный контроль механических свойств проката / Г. Бида, Э. Горкунов, В. Шевнин. – Екатеринбург : УрО РАН, 2002. – 252 с.
5. Матюк, В.Ф. Импульсный магнитный контроль прочностных характеристик ферромагнитных изделий / В.Ф. Матюк // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1998, № 4. – С. 114–118.
6. Способ контроля механических свойств изделий из ферромагнитных материалов: а. с. 728068 СССР, МКИ G 01 № 27/80; G 01 № 27/82 / М.А. Мельгуй, В.Д. Пиунов, В.Б. Кратиров ; Отдел физики неразрушающего контроля АН БССР. – № 2082771/25–28; заявл. 09.12.74; опубл. 07.06.1981 // Открытия. Изобрет. – 1981. – № 21. – С. 261.
7. Матюк, В.Ф. Контроль качества отпуска улучшаемых среднеуглеродистых марок сталей / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008. – № 3. – С. 105–110.
8. Патент Республики Беларусь № 11395. Способ импульсного магнитного контроля температуры отпуска изделия из улучшаемой ферромагнитной стали после его окончания / В.Ф. Матюк, В.Б. Кратиров, В.А. Бурак // Афіцыйны бюлетэнь. – 2008. – № 6.
9. Патент Республики Беларусь № 12447. Способ импульсного магнитного контроля температуры отпуска изделия из среднеуглеродистой стали / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак, М.Н. Делендик // Афіцыйны бюлетэнь. – 2009. – № 5.
10. Матюк, В.Ф. Прибор для импульсного магнитного многопараметрового контроля твердости изделий машиностроения после их закалки и отпуска / В.Ф. Матюк, М.А. Мельгуй, Д.А. Пинчуков // Химическая техника. – 2007, № 7. – С. 17–18.
11. Патент Республики Беларусь № 12446. Способ импульсного магнитного контроля температуры отпуска изделия из улучшаемой ферромагнитной стали / В.Ф. Матюк, В.Б. Кратиров, В.А. Бурак // Афіцыйны бюлетэнь. – 2009. – № 5.
12. Импульсный магнитный анализатор ИМА-6 / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак, А.А. Осипов, Д.А. Пинчуков // Дефектоскопия. – 2009. – № 7 – С. 62–74.

**QUALITY TESTING OF HEAT TREATMENT OF MEDIUM-CARBON STEEL  
CONSTRUCTION ITEMS BASED ON THE BIPOLAR PULSED REMAGNETIZATION**

*Matyuk V.F., Burak V.A.*

Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus  
e-mail: veronika.burak@gmail.com

**Abstract.** The features of bipolar pulsed remagnetization of construction medium-carbon steel items for testing the heat treatment temperature and structure of these items are discussed, the methods of bipolar pulse remagnetization providing testing of items of considered steels are suggested.

**Keywords:** non-destructive testing, magnetization, pulsed magnetic analyzer, gradient of residual magnetization field.

**References**

1. Mel'guy M.A. *Magnitnyy kontrol' mekhanicheskikh svoystv staley* [Magnetic testing of steel mechanical properties]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1980. 184 p. (in Russian).
2. Micheyev M.N., Gorkunov E.S. *Magnitnyye metody strukturnogo analiza i nerazrushaiushchego kontrolya* [Magnetic methods of structural analysis and non-destructive testing]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 252 p. (in Russian).
3. Scherbinin V.E., Gorkunov E.S. *Magnitnyy kontrol' kachestva materialov* [Magnetic testing of material quality]. Ekaterinburg, URO RAN, IFM Publ., 1996. 265 p. (in Russian).
4. Bida G.V., Gorkunov E.S., Shevnin V.M. *Magnitnyy kontrol' mekhanicheskikh svoystv prokata* [Magnetic testing of rolling mechanical properties]. Ekaterinburg, URO RAN, IFM Publ., 2002. 252 p. (in Russian).
5. Matiuk V.F. [The pulsed magnetic testing of the ferromagnetic articles strength characteristics]. *Vestsi NAN Belarusi, ser. fiz.-tehn. navuk*, 1998, no. 4, pp. 114–118 (in Russian).
6. Mel'guy M.A., Piunov V.D., Kratirov V.B. *Sposob kontrolya mekhanicheskikh svoystv izdeliy iz ferromagnitnykh materialov* [The method of mechanical properties testing of ferromagnetic material articles]. Patent SSSR, no. 728068, 1981.
7. Matyuk V.F., Burak V.A. [Quality testing of upgradable medium-carbon steels tempering]. *Vestsi NAN Belarusi, ser. fiz.-tekh. navuk*, 2008, no. 3, pp.105–110 (in Russian).
8. Matyuk V.F., Kratirov V.B., Burak V.A. *Sposob impul'snogo magnitnogo kontrolya temperatury otpuska izdeliya iz uluchshayemoy ferromagnitnoy stali posle ego okonchaniya* [The method of pulsed magnetic tempering temperature testing of upgradable ferromagnetic steel article after tempering ending]. Patent RB, no. 11395, 2008.
9. Matyuk V.F., Burak V.A., Delendik M.N. *Sposob impul'snogo magnitnogo kontrolya temperatury otpuska izdeliya iz sredneuglerodistoy stali* [The method of pulsed magnetic tempering temperature testing of middle-carbon steel article]. Patent RB, no. 12447, 2009.
10. Matyuk V.F., Mel'guy M.A., Pinchukov D.A. [The instrument for pulsed magnetic multiparameter testing of mechanical engineering articles hardness after hardening and tempering]. *Chimicheskaya tekhnika*, 2007, no. 7, pp. 17–18 (in Russian).
11. Matyuk V.F., Kratirov V.B., Burak V.A. *Sposob impul'snogo magnitnogo kontrolya temperatury otpuska izdeliya iz uluchshayemoy ferromagnitnoy stali* [The method of pulsed magnetic tempering temperature testing of upgradable ferromagnetic steel article]. Patent RB, no. 12446, 2009.
12. Matyuk V.F., Burak V.A., Osipov A.A., Pinchukov D.A. [Pulsed magnetic analyzer IMA-6]. *Defektoskopiya*, 2009, no. 7, pp. 62–74 (in Russian).

*Поступила в редакцию 04.10.2013.*