

**А. В. Алифанов<sup>1</sup>, Д. А. Ционенко<sup>2</sup>, А. М. Милукова<sup>1</sup>, Н. М. Ционенко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,*

<sup>2</sup>*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,*

<sup>3</sup>*Белорусский государственный педагогический университет им. Максима Танка, Минск, Беларусь*

### **МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ СТРУКТУРЫ В СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Показано, что при магнитно-импульсном воздействии на ферромагнитный образец реализуются условия, способствующие образованию мелкодисперсной структуры при приближении температуры поверхности образца к температуре Кюри. При наличии сильного магнитного поля вследствие магнитоstriction происходит деформация ферромагнитных участков, которые сдвигаются относительно парамагнитных областей, локализованных вблизи границ зерен и границ доменов. В результате возникающих механических напряжений может происходить дробление зерен. Магнитоstriction приводит не только к измельчению зерен феррита, но и к образованию упорядоченной структуры, поскольку дроблению подвергаются участки с определенной ориентацией кристаллических плоскостей.

*Ключевые слова:* стальные изделия, магнитно-импульсное воздействие, температура Кюри, магнитоstriction, мелкодисперсная структура.

**A. V. Alifanov<sup>1</sup>, D. A. Tsionenko<sup>2</sup>, A. M. Miliukova<sup>1</sup>, N. M. Tsionenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,*

<sup>2</sup>*Belarusian state university of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,*

<sup>3</sup>*Belarusian State Pedagogical University, named after Maxim Tank, Minsk, Belarus*

### **A MODEL OF SMALL-DISPERSED STRUCTURE FORMATION IN STEEL PRODUCTS BY MAGNETIC-PULSE ACTION DUE TO MAGNETOSTRICTION**

It is established that in magneto static fields, which can really be used in industrial equipment, the magnitude of electromagnetic energy is not sufficient for phase equilibrium changing. However, in pulse magnetic field, ones can obtain the changing of phase equilibrium for surface layer of ferromagnetic work material. The thickness of material layers is comparable with skin depth. It is shown, that the magnetic-pulse action on ferromagnetic sample surface provides conditions for formation of small-dispersed structure when the temperature approaches to the Curie temperature. In the presence of strong magnetic field, deformations of ferromagnetic regions arise due to magnetostriction, which are displaced relative to paramagnetic regions localized near the grain and domain boundaries. It leads to a disintegration of ferrite grains and to formation of an anisotropic structure since the regions with specific orientation of crystal planes are disintegrated by magnetostriction.

*Keywords:* steel products, magnetic-pulse action, the Curie temperature, magnetostriction, small-dispersed structure.

**Введение.** Известно, что значимые структурные изменения и улучшение свойств стали при термической обработке в магнитном поле обусловлены каталитическим действием поля на развитие превращений в случае, если исходная фаза парамагнитна, а продукты превращения обладают ферромагнитными свойствами [1–3].

При магнитно-импульсном воздействии на стальные изделия происходит локальное выделение теплоты вследствие протекания индукционных токов. Установлено [1], что локальность нагрева определяется неоднородностью структуры стального изделия. Максимальная температура в процессе обработки в области границ зерен может достигать 1100 °С, что достаточно для осуществления процессов рекристаллизации. Вследствие адиабатического характера тепловыделения, связанного с малой скоростью отвода тепла, в области зерна вблизи его границы температура ферромагнитного материала близка к температуре Кюри и на самой границе превосходит ее [1]. С этой точки зрения процесс магнитно-импульсной обработки подобен термической обработке металлических сплавов в магнитном поле [4–7].

Внешнее импульсное магнитное поле определяет термодинамику и кинетику фазовых переходов, что приводит к формированию мелкодисперсной структуры на поверхности образца.

При этом устойчивые изменения структуры вызывают модификацию свойств, полезных для эксплуатации [8–10].

**Результаты исследований и их обсуждение.** Известно [2–4], что технология термической обработки сплавов в магнитном поле напряженностью до 2,4 МА/м способствует аналогичной модификации доменной и кристаллической структур ферромагнетика, как и магнитно-импульсная обработка при максимальной напряженности магнитного поля порядка  $10^8$  А/м и времени импульса  $10^{-3}$  с [11]. Указанные характеристики импульса реализуются в разработанных и изготовленных в Физико-техническом институте НАН Беларуси магнитно-импульсных установках. Отличительной особенностью технологии термической обработки сплавов в магнитном поле является то, что модификация структуры стального образца происходит по всему объему, в то время как для магнитно-импульсной обработки характерно воздействие только на поверхность. Глубина обработки составляет 10–100 мкм и определяется толщиной  $\delta$  скин-слоя ферромагнитного образца:

$$\delta = \sqrt{2\rho/\mu\mu_0\omega}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление образца, Ом·м;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды, Гн/м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная в единицах СИ;  $\omega = (\sqrt{LC})^{-1}$  – циклическая частота колебаний контура, определяемая индуктивностью магнитного поля  $L$  и емкостью  $C$  конденсаторов магнитно-импульсной установки при малом значении сопротивления цепи, с $^{-1}$ .

Подстановка численных величин, входящих в формулу (1), усредненных по объему образца и характерных для стали ( $\rho = 10^{-7}$  Ом·м,  $\mu = 10^3$ ), и значения  $\omega \approx 10^4$  с $^{-1}$ , определяемого параметрами установки, дает толщину упрочненного слоя порядка  $10^{-4}$  м.

Магнитное поле может существенно влиять на фазовые переходы первого рода, если исходные фазы, подвергаемые обработке и расположенные в непосредственной близости друг от друга ( $10^{-11}$ – $10^{-10}$  м), значительно отличаются по намагниченности (например, как парамагнетик от ферромагнетика). Именно такая структура возникает в зерне феррита при магнитно-импульсном воздействии на стальные заготовки [12, 13].

Влияние магнитного поля проявляется, главным образом, в увеличении значений равновесной температуры перехода, связанного с рекристаллизацией, а также объемной скорости превращения. Изменение температуры равновесия фаз при воздействии магнитного поля может быть найдено так же, как в соотношении Клайперона – Клаузиуса [2, 3]. Если фазовый переход осуществляется в однокомпонентной системе (полиморфное превращение) или в твердом растворе по бездиффузионному механизму (мартенситное превращение в стали), термодинамический потенциал замкнутой системы определяется из следующего соотношения:

$$\Phi = U - TS + \sum_i F_i dx_i, \quad (2)$$

где  $U$ ,  $T$ ,  $S$  – соответственно внутренняя энергия, абсолютная температура, энтропия;  $F_i$ ,  $x_i$  – обобщенные сила и координата;  $\sum F_i dx_i$  – работа, совершаемая системой против внешнего давления. Вводятся следующие обозначения обобщенных сил и координат:  $F_1 = P$  (давление);  $x_1 = V$  (объем); поверхностные силы:  $F_2 = \gamma$  (коэффициент поверхностного натяжения);  $x_2 = A$  (площадь поверхности);  $F_3 = H$  (напряженность магнитного поля),  $x_3 = I$  (намагниченность). Если одна из фаз, участвующих в превращении, обладает ферромагнитными свойствами, то внешнее магнитное поле снижает термодинамический потенциал данной фазы на величину  $\delta\Phi = H\delta I$ . В результате система становится более стабильной:

$$\Phi_H = U - TS + PV - HI. \quad (3)$$

Условия равновесия фаз в однокомпонентной системе (или в растворах при отсутствии диффузии примесей) с учетом переменных  $T$ ,  $P$  и  $H$  можно записать в виде

$$\Phi_1(T, P, H) = \Phi_2(T, P, H). \quad (4)$$

Продифференцируем правую и левую части равенства (4) по изменениям  $T$  и  $H$  при  $P = \text{const}$ :

$$\partial\Phi_1/\partial T + (\partial\Phi_1/\partial H)(\partial H/\partial T) = \partial\Phi_2/\partial T + (\partial\Phi_2/\partial H)(\partial H/\partial T). \quad (5)$$

Поскольку  $\partial\Phi/\partial T = -S$ ,  $\partial\Phi/\partial H = -M = -IV$ , где  $M$  – полный дипольный магнитный момент, то

$$dT/dH = (M_1 - M_2)/(S_2 - S_1). \quad (6)$$

Учитывая, что  $S_2 - S_1 = q/T_0$ , где  $q$  – теплота превращения, а  $T_0$  – равновесная температура рекристаллизации, получаем

$$dT = [(I_1V_1 - I_2V_2) T_0/q] dH. \quad (7)$$

Изменение температуры фазового перехода  $\Delta T$  при воздействии внешнего поля напряженностью  $H$  определяется интегрированием дифференциального соотношения (7). Условия такого интегрирования для случая, когда одна или обе фазы находятся в ферромагнитном состоянии, определены в [2] и сводятся к тому, что значения  $T_0$ ,  $q$ ,  $V_1$  и  $V_2$  могут считаться постоянными и не зависящими от поля, при условии  $\Delta T < T_0$  и любая температура от  $T_0(H = 0)$  до  $T_0(H)$  не превышает точку Кюри [3]. Условие равенства объемов позволяет учитывать магнитоэстроикционные явления как малые поправки к изменению температуры рекристаллизации. В связи с этим можно пренебречь также полем анизотропии и полем размагничивания (для тел малого размера или с малым размагничивающим фактором) и полагать при этом, что величина  $M = IV$  и не зависит от  $H$ . Тогда, например, для фазового превращения исходной парамагнитной ( $M_2 = 0$ ) фазы (аустенит) в ферромагнитную фазу (мартенсит) воздействие внешнего поля  $H$  должно привести к повышению температуры равновесия  $T_0$  на величину [12]

$$\Delta T = T_0V_1I_1H/q. \quad (8)$$

Соотношение (8) показывает, что для принятых условий значение  $\Delta T$  линейно зависит от величины напряженности магнитного поля. Так, для углеродистой стали при  $T_0 = 500$  К,  $I_1 = 0,17$  Тл,  $q/V_1 = 420$  МДж/м<sup>3</sup> воздействие магнитного поля ( $H = 1,6$  МА/м) во время мартенситного превращения дает  $\Delta T = 4$  К [12]. Ввиду этого существенных изменений фазового состава, морфологии и свойств продуктов превращения не происходит. Например, по приближенной оценке уменьшение количества остаточного аустенита, вызванное повышением температуры на 8 °С, для стали с 1,0% С составляет около 1,2%. Зависимость (8) показывает, что существенные изменения в термодинамике фазовых превращений могут быть обеспечены при использовании магнитных полей на порядок более высоких, чем поле напряженностью 1,6–2,0 МА/м, что достигается при магнитно-импульсном воздействии.

В соответствии с соотношением (8) фазовый переход от ферромагнитной к парамагнитной фазе под воздействием внешнего магнитного поля приводит к расширению области существования фазы, обладающей парамагнитными свойствами. В общем случае перехода между двумя ферромагнитными фазами расширяется область существования той фазы, у которой больше величина намагниченности.

Сдвиг температуры равновесия в сверхсильных полях ( $H \approx 25$  МА/м) может достигать 30–60 °С ввиду того, что наибольшая из составляющих полной магнитной энергии  $E = IH$  имеет значение 50 МДж/м<sup>3</sup> и обуславливает более заметное уменьшение термодинамического потенциала ферромагнитной фазы.

Таким образом, в постоянных магнитных полях, которые реально можно использовать в установках промышленного типа, величины магнитной энергии недостаточно для существенного изменения условий фазового равновесия. Однако при импульсном магнитном поле можно достигнуть изменения фазового равновесия для поверхностного слоя, сравнимого с толщиной скин-слоя.

Полная энергия ферромагнетика определяется не только взаимодействием вектора спонтанной намагниченности с внешним полем, но и представляет собой сумму нескольких компонент. К ним относятся: энергия кристаллографической магнитной анизотропии  $E_K$ , магнитоупругая

энергия магнитоэластических деформаций  $E_\lambda$ , энергия индуцированной одноосной анизотропии  $E_n$ , магнитоэластическая энергия (энергия ориентации ферромагнитных частиц по отношению к внешнему полю)  $E_o$ . Расчеты, выполненные в [12], показывают, что из составляющих полной энергии ферромагнетика в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м наибольшими являются собственно магнитная энергия  $E_1 = IH$  и разность магнитоэластических энергий  $\Delta E_o = I^2 \Delta N_p$  (где  $\Delta N_p$  – размагничивающий фактор), приводящая к увеличению вероятности ориентированного расположения ферромагнитных тел во внешнем магнитном поле. Величина полной энергии ферромагнетика имеет диапазон 1,5–3,0 МДж/м<sup>3</sup> и на два порядка меньше величины движущей силы основных фазовых превращений. Очевидно, что внешнее магнитное поле напряженностью 1,6–2,0 МА/м не может коренным образом повлиять на условия равновесия при фазовых превращениях.

Однако полученные в [13–17] экспериментальные данные дают основание полагать, что влияние слабых постоянных магнитных полей в процессе фазовых превращений более значительно, чем этого можно было ожидать из термодинамических оценок изменения равновесных температур переходов. Структурные исследования [9, 10], иллюстрирующие влияние магнитного поля на мартенситное превращение, показали, что количество остаточного аустенита при закалке в магнитном поле напряженностью 1,76 МА/м в среднем на 10–15% меньше, чем после закалки без поля.

Данные рентгеноструктурного анализа [9] свидетельствуют об увеличении степени распада твердого раствора в процессе закалочного охлаждения в магнитном поле. При закалке в поле напряженностью 2 МА/м фиксируется структурное состояние, свойственное стали после обычной закалки и отпуска при 150 °С. Изучение структуры мартенсита показывает заметное увеличение дисперсности кристаллов  $\alpha$ -фазы. Таким образом, результаты [13–17] позволяют считать влияние постоянного магнитного поля напряженностью до 2,4 МА/м в процессе фазовых переходов достаточным для заметных структурных изменений в углеродистых сталях.

Вклад энергии магнитного поля должен прежде всего влиять на критическую стадию зарождения и роста мартенсита, поскольку вероятность зарождения обычно зависит от разности термодинамических потенциалов фаз как  $\exp(-\Delta F/RT)$ , и малые различия в энергии критического зародыша могут существенно изменить эту вероятность в условиях, когда процесс термодинамически возможен. По этой причине рассмотрение вопроса только с термодинамических позиций недостаточно, поскольку при таком подходе упускается из виду влияние поля на механизм образования ферромагнитных зародышей и кинетику фазовых реакций, которые определяют строение и свойства конечного состояния. В условиях, при которых превращение термодинамически возможно, даже небольшой энергетический стимул может оказать каталитическое влияние на кинетику. В связи с этим в дальнейшем целесообразно выявить особенности механизма образования ферромагнитных зародышей под действием внешнего магнитного поля при фазовых переходах [18].

**Заключение.** В результате магнитно-импульсной обработки отдельные участки зерна феррита нагреваются до температур, близких к температуре Кюри, при которой происходит магнитное превращение стали, связанное с переходом из ферромагнитного в парамагнитное состояние. Этот процесс является фазовым переходом второго рода, следовательно, при приближении температуры к точке Кюри происходит уменьшение размеров доменов ферромагнетика до полного их исчезновения. Однако при температурах, близких к температуре Кюри, возникает неоднородная структура, в которой малые по размеру домены окружены парамагнитными областями. При наличии сильного магнитного поля в области обработки вследствие магнитоэластики происходит существенная деформация ферромагнитных участков, которые сдвигаются относительно областей с малым значением магнитной проницаемости. Если размеры остаточных доменов составляют порядка  $10^{-5}$  м, то дислокационные и сдвиговые деформации ферромагнитной области относительно парамагнитной могут составлять  $10^{-10}$  м. Смещение может привести к разрыву связей между атомами на границе областей с различными магнитными свойствами и образованию межзеренной границы. Этот процесс может быть наиболее эффективным, когда в пределах зерна существуют домены с различной намагниченностью.

Магнитострикция обладает существенной анизотропией. Следовательно, изменение размеров определяется ориентацией кристаллической решетки относительно направления вектора намагниченности. Вследствие этого фактора могут происходить образование дополнительной границы и деление зерен по линии раздела объемных дефектов. В частности, наличие фрагментов, ориентация которых отличается от ориентации кристаллической решетки основной части зерна, играет существенную роль при образовании мелкозернистой структуры в процессе импульсной обработки. Таким образом, магнитострикция приводит не только к измельчению зерен феррита, но и к образованию упорядоченной структуры, поскольку дроблению будут подвергаться только участки с определенной ориентацией кристаллических плоскостей. Последнее может привести к возникновению анизотропии материала на поверхности обрабатываемого образца.

### Список использованных источников

1. Алифанов, А. В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 4. – С. 28–35.
2. Кривоглаз, М. А. Закалка стали в магнитном поле / М. А. Кривоглаз, В. Д. Садовский, Л. В. Смирнов, Е. А. Фокина. – М.: Наука, 1977. – 119 с.
3. Бернштейн, М. Л. Термомангнитная обработка стали / М. Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1968. – 95 с.
4. Пустовойт, В. Н. Физические и технологические основы термической обработки в магнитном поле: автореф. дис... д-ра техн. наук / В. Н. Пустовойт, ФТИ АН БССР. – Минск, 1980. – 40 с.
5. Домбровский, Ю. М. Структура и свойства чугунов после термической обработки в магнитном поле: автореф. ... канд. техн. наук / Ю. М. Домбровский. – Ростов н/Д, 1975. – 20 с.
6. Блиновский, В. А. Исследование превращений, особенностей структуры и остаточных напряжений при закалке и отпуске железоуглеродистых сплавов в магнитном поле: автореф. ... канд. техн. наук / В. А. Блиновский. – Ростов н/Д, 1978. – 28 с.
7. Корнилов, Ю. А. Исследование процессов термической обработки инструмента в магнитном поле: автореф. ... канд. техн. наук / Ю. А. Корнилов. – Новочеркасск, 1984. – 16 с.
8. Гришин, С. А. Влияние термической обработки в магнитном поле на характеристики разрушения стали: автореф. ... канд. техн. наук / С. А. Гришин. – Новочеркасск, 1983. – 21 с.
9. Сорочкина, О.Ю. Структура и свойства инструментальных сталей после термической обработки в магнитном поле: автореф. ... канд. техн. наук / О. Ю. Сорочкина. – Ростов н/Д, 2005. – 24 с.
10. Бернштейн, М. Л. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле / М. Л. Бернштейн, В. Н. Пустовойт. – М.: Машиностроение, 1987. – 255 с.
11. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий / А. В. Алифанов [и др.] // *Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, инструмента и технологической оснастки*: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 10–13 апр. 2007. – СПб, 2007. – Ч. 2. – С. 9–15.
12. Пустовойт, В. Н. О влиянии магнитного поля на мартенситное превращение в чугуне / В. Н. Пустовойт // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1975. – № 12.
13. Пустовойт, В. Н. Особенности строения  $\alpha$ -мартенсита при закалке в постоянном магнитном поле / В. Н. Пустовойт // *Изв. АН СССР. Металлы*. – 1978. – № 6.
14. О возможностях и области использования закалки в постоянном магнитном поле / В. Н. Пустовойт [и др.] // *Изв. СКНЦ ВШ. Технические науки*. – 1979. – № 1.
15. Пустовойт, В. Н., Влияние термической обработки в магнитном поле на механические свойства углеродистых сталей / В. Н. Пустовойт, П. И. Русин, С. А. Гришин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1982. – № 7.
16. Пустовойт, В. Н. Особенности процесса образования аустенита при высокочастотном нагреве в магнитном поле / В. Н. Пустовойт // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1983. – № 4.
17. Пустовойт, В.Н. Структурные эффекты при термической обработке сталей в магнитном поле / В. Н. Пустовойт, С. Н. Холодова // *Изв. ВоГТУ. Сер.2 «Прогрессивные технологии в машиностроении»*. – 2003. – Вып. 6.
18. Об одной модели образования зародышей мартенсита в магнитном поле / В. Н. Пустовойт [и др.] // *Изв.СКНЦ ВШ. Технические науки*. – 1974. – №4.

### References

1. Alifanov, A. V., Popova, Zh. A. and Tsionenko, N. M. (2012), "The mechanism of hardening of alloy steels in pulsed magnetic field", *Lit'e i metallurgiya* [Casting and metallurgy], no. 4, pp. 28–35.
2. Krivoglaz, M. A., Sadovskii, V. D., Smirnov, L. V. and Fokina, E. A. (1977), *Zakalka stali v magnitnom pole* [Quenching of steel in magnetic field], Nauka, Moscow, RU.
3. Bernshtein, M. L. (1968), *Termomagnitnaya obrabotka stali* [Thermomagnetic treatment of steel], Metallurgiya, Moscow, RU.
4. Pustovoit, V. N. (1980), "Physical and technological bases of thermal treatment in a magnetic field", Abstract of D. Sc. Dissertation, Metallurgy and heat treatment of metals, FTI AN BSSR, Minsk, BY.

5. Dombrovskii, Yu. M. (1975), "Structure and properties of cast irons after heat treatment in a magnetic field", Abstract of Ph. D. dissertation, Metallurgy and heat treatment of metals, Rostovskii-na-Donu institut sel'skokhozyaistvennogo mashinostroeniya, Rostov n/D, RU.
6. Blinovskii, V. A. (1978), "The study of transformations, structure and residual stresses during quenching and tempering of iron-carbon alloys in a magnetic field", Abstract of Ph. D. dissertation, Metallurgy and heat treatment of metals, Rostov n/D, RU.
7. Kornilov, Yu. A. (1984), "Research of processes of heat treatment of the tools in a magnetic field", Abstract of Ph. D. dissertation, Materials Science, Novocherkassk, RU.
8. Grishin, S. A. (1983), "The effect of heat treatment in magnetic field on fracture characteristics of steel", Abstract of Ph. D. dissertation, Materials Science, Novocherkassk, RU.
9. Sorochkina, O. Yu. (2005), "Structure and properties of tool steels after heat treatment in a magnetic field", Abstract of Ph. D. dissertation, Materials Science, Donskoi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, Rostov n/D, RU.
10. Bernshtein, M. L. and Pustovoi, V. N. (1987), *Termicheskaya obrabotka stal'nykh izdelii v magnitnom pole* [Heat treatment of steel products in a magnetic field], Mashinostroenie, Moscow, RU.
11. Alifanov, A. V., Anisovich, A. G., Amelyanchik, S. A. and Krivonos, Yu. I. (2007), "Magnetic pulse hardening treatment of metal products", *Tekhnologiya remonta, vosstanovleniya i uprochneniya detalei mashin, mekhanizmov, instrumenta i tekhnologicheskoi osnastki: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg, 10–13 apr. 2007* [The technology of repair, restoration and strengthening of machine parts, machinery, tools and tooling: Materials Intern. scientific-practical. Conf., St. Petersburg, 10–13 April. 2007], SPb, RU, Ch. 2, pp. 9–15.
12. Pustovoi, V. N. (1975), "On the influence of magnetic field on martensitic transformation in cast iron", *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], no. 12.
13. Pustovoi, V. N. (1978), "The structural features of  $\alpha$ -martensite in quenching in a constant magnetic field", *Izv. AN SSSR. Metally* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals], no. 6.
14. Pustovoi, V. N., Rusin, P. I., Dombrovskii, Yu. M. and Blinovskii, V. A. (1979), "About the possibilities and the use of annealing in a constant magnetic field", *Izv. SKNC VSH. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the North Caucasian scientific center of high school. Technical science], no. 1.
15. Pustovoi, V. N., Rusin, P. I. and Grishin, S. A. (1982), "The effect of heat treatment in magnetic field on the mechanical properties of carbon steels", *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], no. 7.
16. Pustovoi, V. N. (1983), "Features of formation of austenite in the high-frequency heating in a magnetic field", *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of the higher educational institutions. Ferrous metallurgy], no. 4.
17. Pustovoi, V. N. and Holodova, S. N. (2003), "Structural effects during heat treatment of steels in a magnetic field", *Izv. VoGTU. Ser.2 "Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii"* [News of Volgograd State Technical University. Series 2 "Progressive Technologies in Mechanical Engineering"], issue 6.
18. Pustovoi, V. N., Rusin, P. I., Dombrovskii, Yu. M. and Blinovskii, V. A. (1974), "A model of the nucleation of martensite in magnetic field", *Izv. SKNC VSH. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the North Caucasian scientific center of high school. Technical science], no. 4, pp. 56–58.

### Информация об авторах

Алифанов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом объемных гетерогенных систем. Физико-технический институт НАН Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Беларусь). E-mail: alifanov\_aav@mail.ru

Ционенко Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, Беларусь). E-mail: tsiond@tut.by

Милиукова Анна Михайловна – кандидат технических наук, заведующий лабораторией. Физико-технический институт НАН Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Беларусь). E-mail: annart@mail.ru

Ционенко Наталья Михайловна – преподаватель, Белорусский государственный педагогический университет им. Максима Танка, (220030, г. Минск, ул. Советская, 18). E-mail: tsionn@tut.by

### Для цитирования

Алифанов, А. В. Магнотриксционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милиукова, Н. М. Ционенко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – №4. – С. 31–36.

### Information about the authors

Alifanov Alexandr Viktorovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of the volumetric heterogeneous systems. Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich str., 220141, Minsk, Belarus). E-mail: alifanov\_aav@mail.ru

Tsionenko Dmitry Alexandrovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovkiy str., 220013, Minsk, Belarus). E-mail: tsiond@tut.by

Miliukova Anna Michailovna – Ph. D. (Engineering), Head of laboratory, Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich str., 220141, Minsk, Belarus). E-mail: annart@mail.ru

Tsionenko Natalia Michailovna – lecturer. Belarusian State Pedagogical University, named after Maxim Tank (18, Sovetskaya street, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: tsionn@tut.by.

### For citation

Alifanov A. V., Tsionenko D. A., Miliukova A. M., Tsionenko N. M. Model of small-dispersed structures formation in steel products by magnetic-pulse action due to magnetostriction. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 31–36.