



УДК 621.983.044

Поступила 01.03.2017

## ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

### SPECIAL FEATURES OF MAGNETIC PULSE HARDENING PROCESSING OF STEEL CYLINDRICAL PRODUCTS OF VARIABLE CROSS-SECTION

А. В. АЛИФАНОВ<sup>1</sup>, Д. А. ЦИОНЕНКО<sup>2</sup>, А. М. МИЛЮКОВА<sup>1</sup>, А. И. ГОРЧАНИН<sup>1</sup>, В. В. МАЛЕРОНОК<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10.

E-mail: alifanov\_aav@mail.ru

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, ул. П. Бровки, 6

<sup>3</sup> Барановичский государственный университет, г. Барановичи, Беларусь, ул. Войкова, 21

A. V. ALIFANOV<sup>1</sup>, D. A. TSIONENKO<sup>2</sup>, A. M. MILIUKOVA<sup>1</sup>, A. I. HARCHANIN<sup>1</sup>, V. V. MALERONAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Physicals Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str.

E-mail: alifanov\_aav@mail.ru

<sup>2</sup> Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus, 6, P. Brovki str.

<sup>3</sup> Baranovichi State University, Baranovichi City, Belarus, 21, Voikova str.

Посредством метода конечных элементов с использованием программы FEMM произведены расчеты индукции магнитного поля, создаваемого цилиндрическим индуктором в магнитно-импульсной установке, и соответствующей напряженности магнитного поля вблизи поверхности цилиндрических заготовок постоянного и переменного сечения. Показано, что при обработке изделий сложного профиля упрочнению подвергаются в основном участки, расположенные на минимальном расстоянии от спирали индуктора. Для обеспечения упрочнения удаленных от индуктора участков необходимо либо увеличивать силу максимального импульса тока, либо использовать разъемный индуктор переменного внутреннего диаметра, повторяющий профиль изделия. Боковые поверхности выступов, расположенные перпендикулярно оси системы, не подвергаются упрочнению вследствие малого градиента плотности энергии магнитного поля вблизи их поверхности. При близком расположении выступов (менее 1 см) на поверхности изделия материал поверхности в пространстве между ними не испытывает достаточного упрочняющего воздействия.

The calculations of the magnetic field induction and the magnetic field intensity were carried out by the Finite Element Method (FEM) with the use of the software FEMM. The cylindrical inductor of the Magnetic-Pulse Installation (MPI) generates the magnetic field near the surface of the cylindrical steel product as of the uniform as well as variable cross section. It is shown that the regions of the products of the complex cross-section located at the minimal distance to the helix inductor are exposed to highest level of hardening. It is necessary to increase the current pulse in the inductor or to use a split inductor with the variable inner diameter repeating the product profile for hardening of the product regions located at large distances from inductor. The side surfaces of protrusions that are perpendicular to the axis of the system are not exposed to hardening due to the low gradient of the energy density of magnetic field near its surface. In the case of close proximity of the protrusions (for distance less than 1 cm), the material on the product surface in the space between protrusions is not exposed to sufficient hardening.

**Ключевые слова.** Стальные изделия, постоянное сечение, переменное сечение, магнитно-импульсная обработка, вектор магнитной индукции, вектор напряженности магнитного поля, силовые линии.

**Keywords.** Steel products, uniform cross section, variable cross section, magnetic-pulse processing, the magnetic induction vector, the magnetic field intensity vector, the magnetic field lines.

#### Введение

При магнитно-импульсной обработке (МИО) внешней поверхности стального изделия, обладающей аксиальной симметрией, используется цилиндрический индуктор. Токпроводящее изделие помещается внутрь цилиндрического индуктора и в нем возникает индукционный ток, пропорциональный скорости из-

менения магнитного потока через площадь его сечения в плоскости, перпендикулярной оси системы «индуктор-изделие», при возбуждении импульса электрического тока в индукторе. Магнитное поле индукционного тока направлено таким образом, чтобы уменьшить изменение магнитного потока, создаваемого током индуктора. В результате возникает разность плотностей энергии магнитного поля внутри изделия и вблизи поверхности [1]. Эта разность плотностей энергии равна плотности поверхностных сил, действующих на поверхность изделия. Поверхностная плотность  $f_m$  электромагнитных сил определяется соотношением [1]:

$$f_m = 0,5(B_{\text{out}}H_{\text{out}} - B_{\text{in}}H_{\text{in}}), \quad (1)$$

где  $B_{\text{out}}$  – модуль вектора магнитной индукции на внешней стороне изделия, Тл;  $H_{\text{out}}$  – напряженность магнитного поля на внешней стороне изделия, А/м;  $B_{\text{in}}$  – модуль вектора магнитной индукции внутри изделия вблизи ее поверхности;  $H_{\text{in}}$  – напряженность магнитного поля внутри изделия вблизи обрабатываемой поверхности.

Для упрочнения поверхностного слоя изделия необходимо, чтобы плотность поверхностных сил  $f_m$  превышала предел текучести материала  $\sigma_t$ , т. е. должно выполняться неравенство [2]:

$$f_m \geq \sigma_t. \quad (2)$$

Поскольку длительность процесса МИО определяется временем нарастания тока в индукторе, то поверхность заготовки подвергается ударной нагрузке. Равномерность воздействия на поверхность изделия, помещенного внутрь индуктора, существенно зависит от точности его обработки на предыдущих стадиях техпроцесса и точности установки внутри индуктора. В дальнейшем при моделировании полагается, что внутренняя поверхность индуктора имеет идеальную цилиндрическую форму и ось заготовки совпадает с осью индуктора.

К процессам, приводящим к упрочнению поверхности стальных изделий под воздействием магнитного импульса, кроме деформаций, приводящих к уплотнению структуры вблизи поверхности, относятся также явления фазовых превращений аустенит–мартенсит, миграции примесей и дефектов вблизи границ зерен, возникновение мелкодисперсной структуры на поверхности заготовки, связанное с образованием новых границ между зернами и дроблением пластинок цементита [3–5]. Осуществление этих процессов непосредственно связано с неоднородностью материала стали, локальным выделением теплоты вблизи границ зерен при протекании индукционных токов и магнитострикционными эффектами (в случае изделий, выполненных из магнитных сталей).

Необходим комплексный подход к рассмотрению процессов, приводящих к упрочнению, на основе анализа вероятности их реализации.

Приведенные в данной работе результаты моделирования позволяют проанализировать только вклад процессов, связанных с возникновением механического давления на поверхность.

### Магнитно-импульсная обработка цилиндрических стальных изделий постоянного профиля

Расчет индукции магнитного поля, создаваемого цилиндрическим индуктором, и соответствующей напряженности магнитного поля вблизи поверхности изделия с ее внешней стороны и внутри материала осуществляли методом конечных элементов с помощью программы FEMM.

Использование методов компьютерного моделирования позволяет подобрать необходимые параметры установки для магнитно-импульсного упрочнения, соответствующие выполнению условия (2). Подбор осуществляли путем варьирования следующих параметров: длительность и амплитуда импульса тока, количество витков индуктора, внутренний диаметр индуктора, размеры и форма заготовки, материал заготовки.

Результаты численного расчета вектора магнитной индукции (пространственного распределения силовых линий) и параметров цепи, произведенного при помощи программы FEMM для импульса тока длительностью 1 мс (время нарастания импульса тока 0,25 мс, амплитуда тока в индукторе 10 кА, количество витков в индукторе 10, внутренний радиус индуктора 10 см, радиус цилиндрической заготовки 9,5 см, материал изделия сталь 10), представлены на рис. 1.

Зависимости модуля вектора напряженности магнитного поля и модуля вектора магнитной индукции, рассчитанные вдоль линии, проходящей через центр системы «индуктор-изделие» перпендикулярно ее оси, от расстояния до оси системы показаны на рис. 2.

Из рисунка видно, что всплеск как модуля вектора индукции, так и модуля напряженности происходит в пределах расстояния от оси системы «индуктор-изделие» 8–11 см, т. е. в области внутренней поверхности индуктора и внешней поверхности изделия.

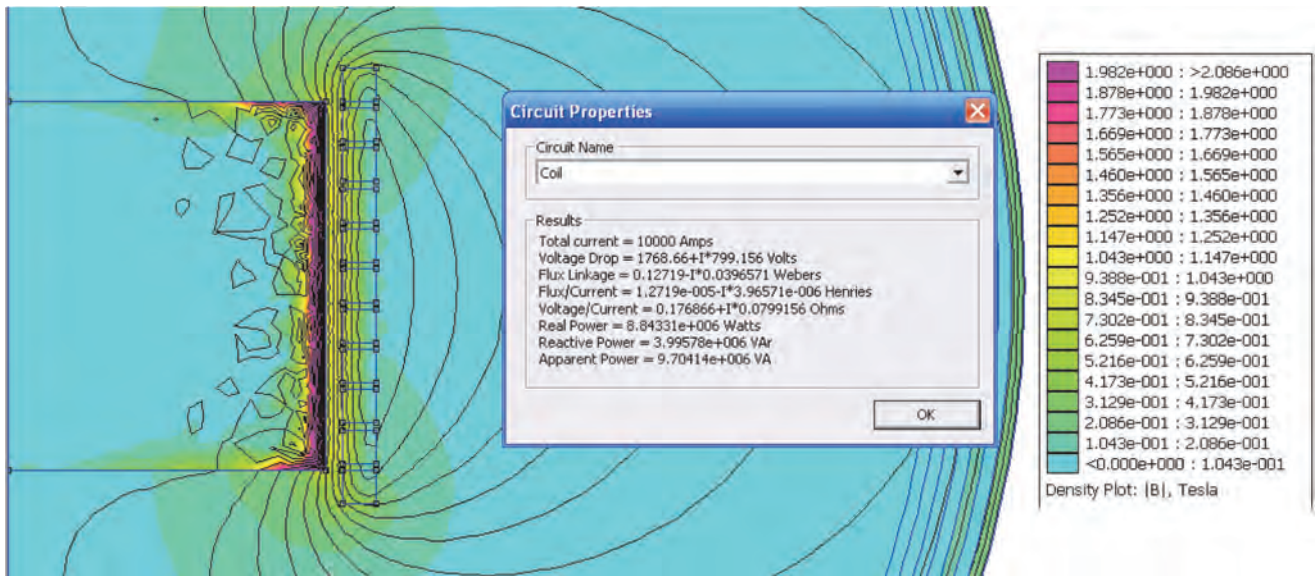


Рис. 1. Распределение силовых линий вектора магнитной индукции в цилиндрическом изделии из стали 10 при указанных выше параметрах

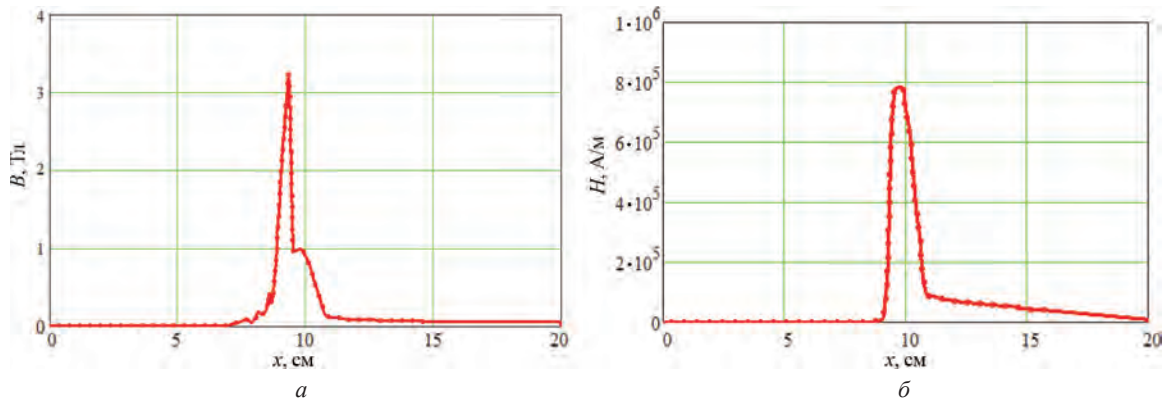


Рис. 2. Характер изменения модуля вектора индукции (а) и модуля вектора напряженности магнитного поля (б) в зависимости от расстояния до оси системы «индуктор-изделие»

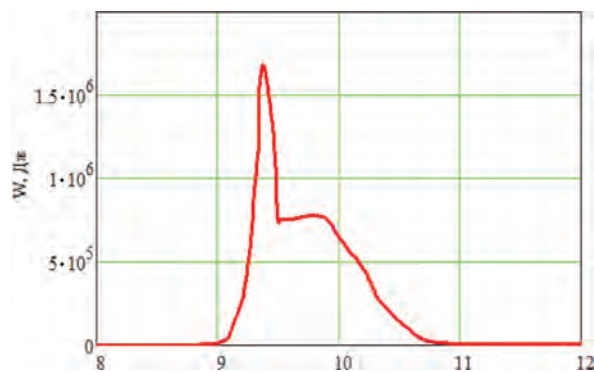


Рис. 3. Зависимость плотности энергии магнитного поля от расстояния до оси системы для магнитного поля, приведенного на рис. 1

Зависимость плотности энергии магнитного поля  $w$  от расстояния  $r$  до оси системы, определенная по формуле [1]:

$$w(r) = 0,5 B(r)H(r), \quad (3)$$

представлена на рис. 3.

Из рисунка можно сделать вывод, что максимальное значение плотности энергии приходится на поверхность упрочняемого изделия радиусом 9,5 см, что обеспечивает максимальную степень упрочнения этой поверхности.

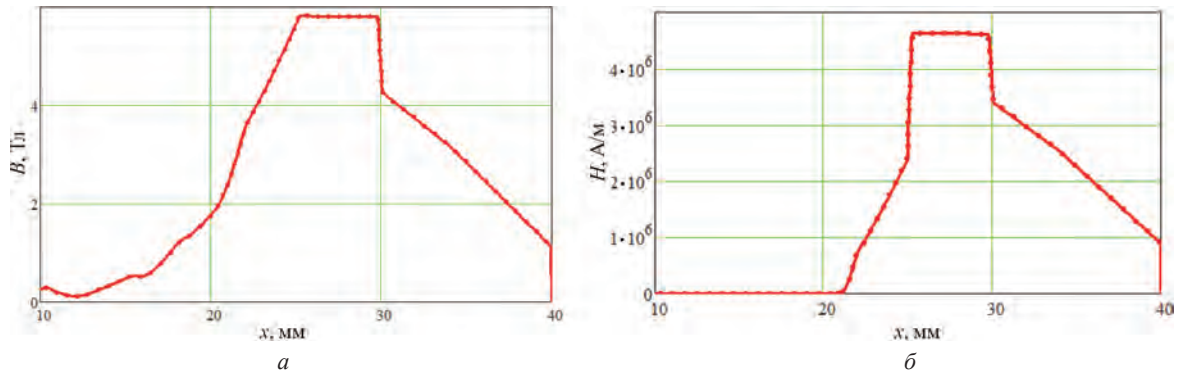


Рис. 4. Модуль вектора индукции (а) и модуль вектора напряженности магнитного поля (б) для индуктора диаметром 6 см изделия из стали 10 диаметром 5 см и параметрами импульса, указанными выше

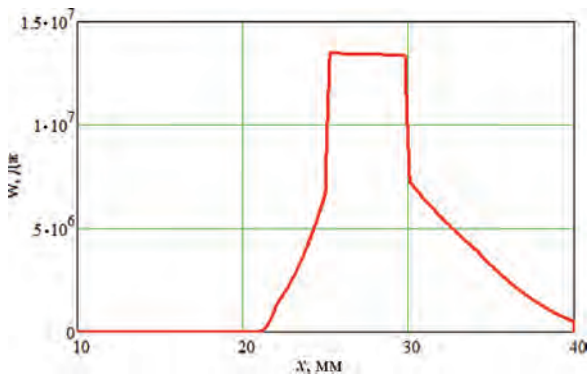


Рис. 5. Зависимость плотности энергии магнитного поля от расстояния до оси системы для магнитного поля с индукцией и напряженностью, представленными на рис. 4

Рассчитанное в рамках модели максимальное значение разности плотностей энергии на поверхности и внутри изделия равно  $1,7 \cdot 10^6$  Па. Считая, что в процессе магнитно-импульсной обработки материал вблизи поверхности изделия нагревается в среднем до температуры около  $70^\circ\text{C}$ , значение предела текучести для стали 10 примем равным  $1,9 \cdot 10^6$  Па. Таким образом, при указанных выше параметрах системы давление, необходимое для упрочнения поверхности материала, не достигается, так как  $1,7 \cdot 10^6 < 1,9 \cdot 10^6$ , следовательно, вероятность реализации процессов, приводящих к упрочнению, мала.

Увеличение плотности энергии магнитного поля может быть достигнуто как за счет локализации объема, в котором сконцентрировано магнитное поле, так и за счет увеличения величин вектора магнитной индукции

и модуля вектора напряженности. В свою очередь, локализация воздействия может быть достигнута за счет уменьшения размеров обрабатываемой части изделия (по ее длине) и увеличения частоты тока в индукторе (уменьшении времени импульса). Увеличение амплитудных значений вектора напряженности и вектора индукции магнитного поля достигается за счет увеличения амплитуды тока в индукторе.

При уменьшении времени импульса до 0,2 мс и увеличении амплитуды тока до 50 кА, а также выборе индуктора радиусом 3 см и изделия радиусом 2,5 см позволяет увеличить количество витков от 10 до 15 без существенного уменьшения площади поперечного сечения (которое ограничено максимально допустимой плотностью тока в меди). Результаты расчетов приведены на рис. 4, 5.

Из рисунков видно, что увеличение частоты до 5 кГц и амплитуды тока до 50 кА, а также уменьшение габаритов изделия привело к появлению горизонтальной площадки в районе максимальных значений параметров от 2,5 до 3,0 см, что соответствует наружной поверхности изделия и внутренней поверхности индуктора. Такая форма графиков указывает на постоянство исследуемых параметров в области между поверхностями индуктора и изделия. При этом значения градиента плотности энергии магнитного поля сравнимы со значением предела текучести стали 10, это следует из результатов расчета по формуле (3). При этом существенно возрастает вероятность локальных процессов упрочнения, обусловленная измельчением зерен феррита.

### Магнитно-импульсное упрочнение цилиндрических стальных изделий переменного профиля

Рассмотрим процесс обработки стального цилиндрического изделия, у которого на поверхности имеется выступ в виде пояска. Распределение силовых линий магнитного поля для этого случая представлено на рис. 6.

Зависимости модуля вектора индукции магнитного поля и модуля вектора напряженности от расстояния до центра системы вдоль линии, проходящей перпендикулярно оси системы через центр изделия, представлены на рис. 7, а зависимость плотности энергии – на рис. 8.

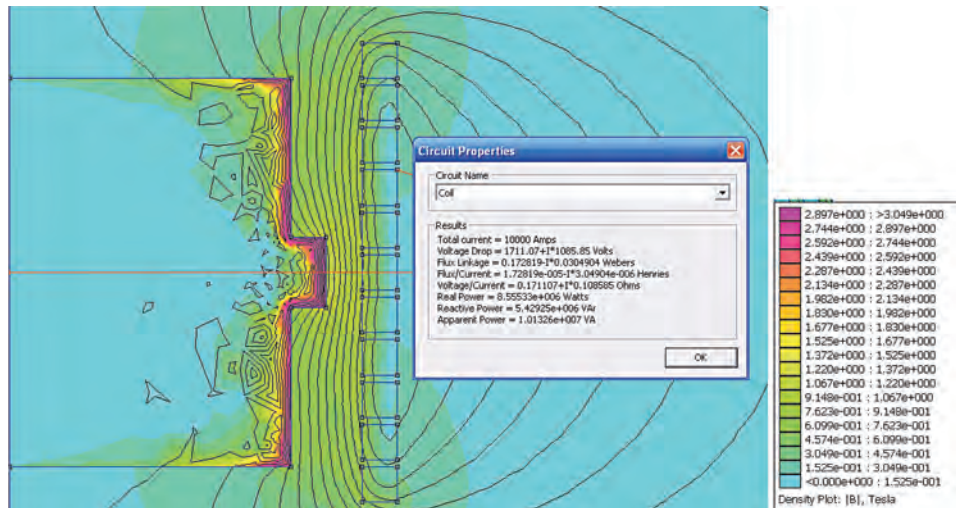


Рис. 6. Распределение силовых линий магнитного поля в изделии переменной сечении: радиус основной части изделия 8 см; радиус выступа 9 см; ширина выступа 2 см; радиус индуктора 10 см; длительность импульса 1 мс; амплитуда тока 10 кА

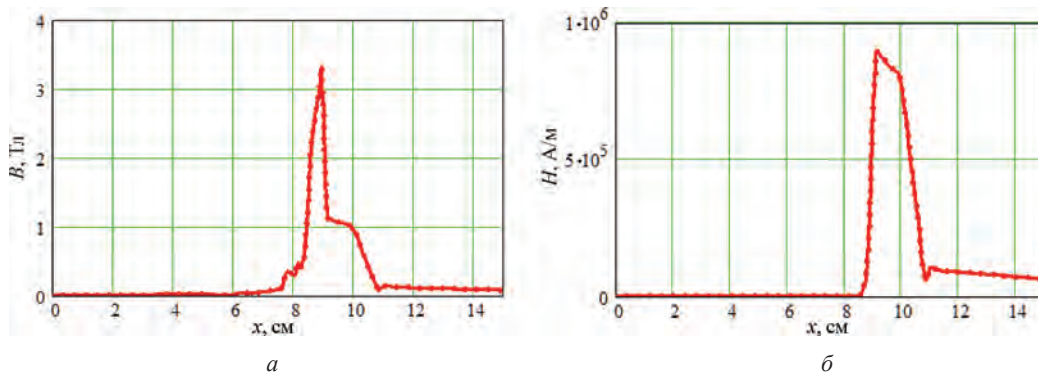


Рис. 7. Зависимость модуля вектора индукции (а) и напряженности магнитного поля (б) от расстояния до оси системы с параметрами, указанными на рис. 6

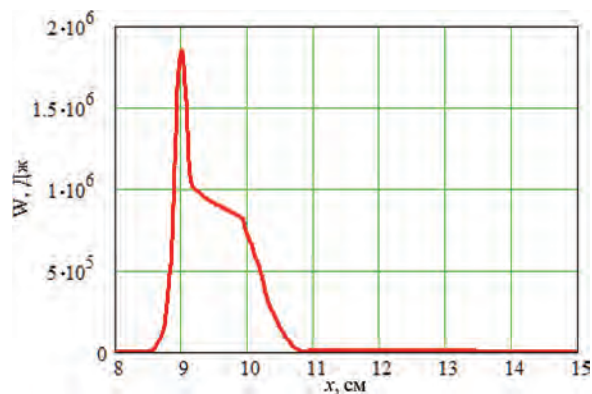


Рис. 8. Зависимость модуля вектора индукции магнитного поля от расстояния до оси системы

Распределение силовых линий магнитного поля в случае упрочнения изделия более сложной формы, имеющей два выступа шириной 1 см и расстояние 3 см между ними, показано на рис. 9. Так же, как и на рис. 6, радиус основной цилиндрической части изделия равен 8 см, радиус каждого из выступов 9 см, расстояние между поясками 3 см, толщина каждого пояска 1 см, материал изделия – сталь 10, сила тока в индукторе 10 кА, длительность импульса 1 мс.

На рис. 10 показаны зависимости модуля вектора магнитной индукции и модуля вектора напряженности магнитного поля вдоль линии, проходящей параллельно оси симметрии системы на расстоянии 8,5 см от нее, а на рис. 11 – зависимость плотности энергии вдоль этой линии.

Для анализа влияния расстояния между поясками на упрочнение части изделия, расположенной между ними, было проведено моделирование системы (рис. 12), отличающейся от представленной на

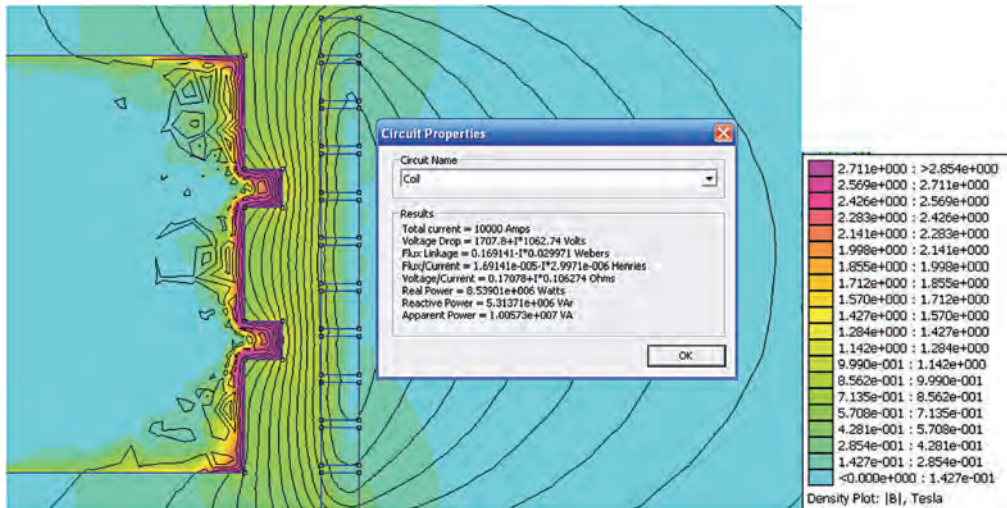


Рис. 9. Распределение силовых линий магнитного поля в изделии с двумя выступами на поверхности

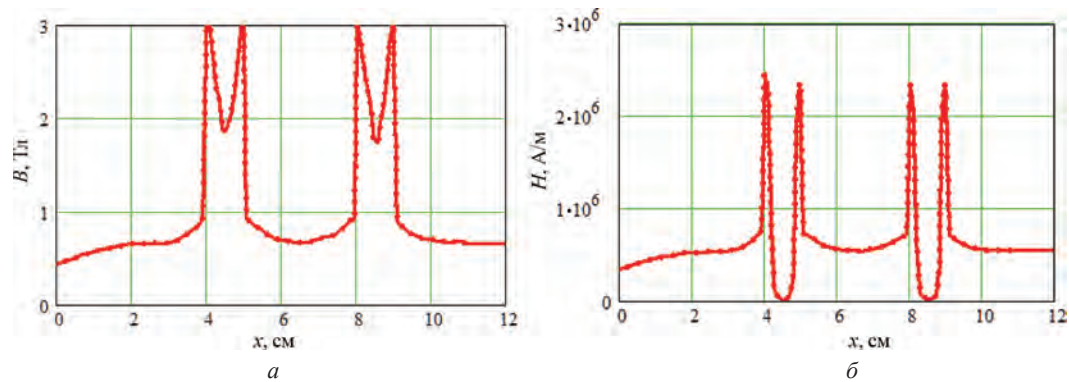


Рис. 10. Зависимость модуля вектора индукции (а) и напряженности магнитного поля (б) вдоль линии, проходящей параллельно оси системы, представленной на рис. 9

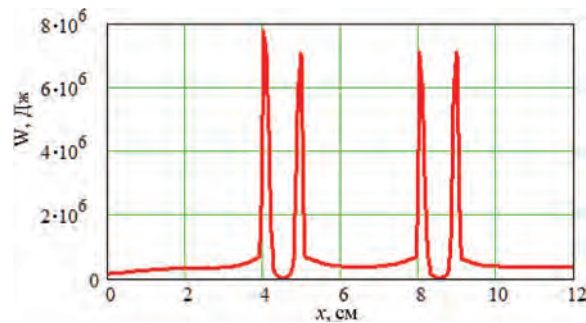


Рис. 11. Плотность энергии магнитного поля, представленного на рис. 9

рис. 9 тем, что расстояние между выступами равно 1 см и их ширина 2 см. Характеристики магнитного поля приведены на рис. 13, 14.

Анализ распределения характеристик магнитного поля вдоль линии, параллельной оси системы, в изделиях переменного профиля поверхности указывает на то, что уменьшение расстояния между выступами от 3 до 1 см приводит к уменьшению модуля вектора магнитной индукции и модуля вектора напряженности, а, следовательно, и к уменьшению плотности энергии магнитного поля в пространстве между ними.

Радиус основной части изделия равен 2 см, высота выступа – 0,5 см, радиус внутренней части цилиндрического индуктора – 3 см. Параметры моделирования: длительность импульса – 0,2 мс, амплитуда тока – 50 кА, количество витков спирали индуктора – 15.

На рис. 15 приведены результаты моделирования магнитно-импульсной обработки изделия переменного профиля поверхности, имеющего вид треугольных выступов с углом 60° при вершине (модель метрической резьбы).

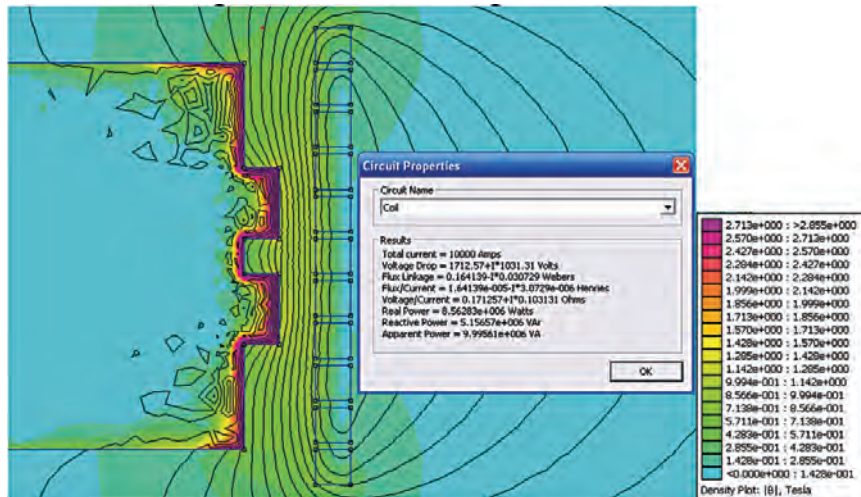


Рис. 12. Распределение силовых линий магнитного поля на поверхности изделия с выступами-поясками шириной 2 см, расположенными на расстоянии 1 см друг от друга

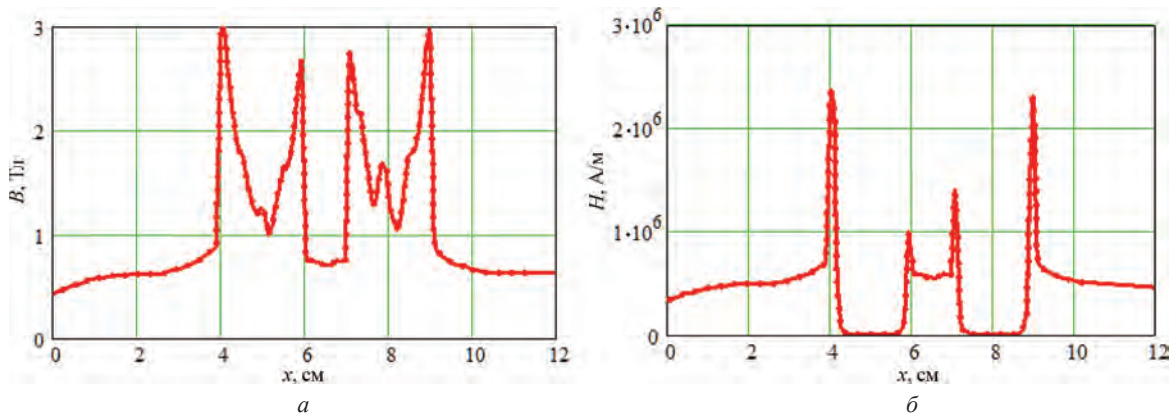


Рис. 13. Модуль вектора магнитной индукции (а), модуль вектора напряженности магнитного поля (б) в системе, представленной на рис. 12, вдоль линии, проходящей на расстоянии 8,5 см от оси системы

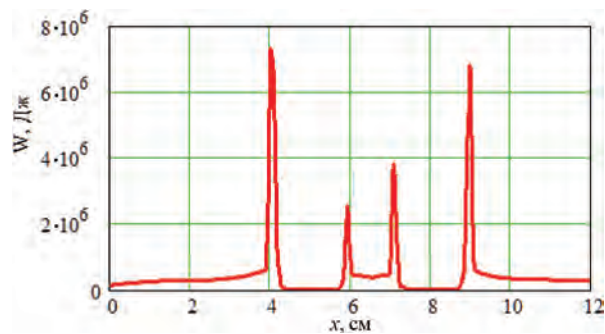


Рис. 14. Плотность энергии магнитного поля, представленного на рис. 13

Результаты расчета указывают на возможность упрочнения вершин треугольных выступов, а частично, и наклонных поверхностей.

### Выводы

В рамках проведенного анализа распределения векторов магнитной индукции и напряженности магнитного поля вблизи цилиндрической поверхности стального изделия, а также плотности энергии получены следующие результаты.

При МИО цилиндрического изделия постоянного профиля, изготовленного из мягкого магнитного материала (сталь 10), разность плотностей энергии магнитного поля внутри изделия и вне ее недостаточна для упрочнения поверхности в случае, когда величина зазора между внутренней поверхностью индуктора и внешней поверхностью образца превосходит 1 см, а длительность импульса составляет 1 мс при максимальной силе тока (амплитуде) в индукторе 1 кА.

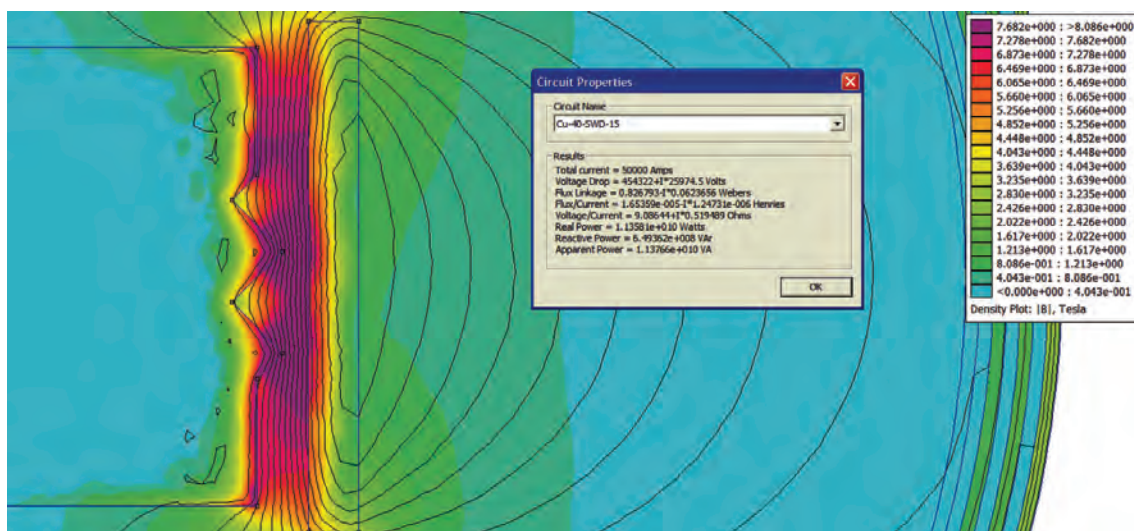


Рис. 15. Распределение силовых линий вектора магнитной индукции вблизи поверхности изделия с треугольными выступами

Вероятность реализации упрочняющих эффектов на поверхности стального изделия из низкоуглеродистой стали возрастает при длительности импульса 0,2 мс, амплитуды силы тока в импульсе 50 кА.

Увеличение количества витков индуктора приводит к увеличению эффективности процесса МИО.

При обработке изделий переменного профиля эффективно упрочнению подвергаются в основном участки, расположенные на минимальном расстоянии к индуктору [6]. Для упрочнения удаленных от индуктора участков необходимо либо повысить амплитуду силы тока, либо использовать разъемный индуктор переменного внутреннего диаметра, повторяющий профиль изделия.

Боковые поверхности выступов, расположенные перпендикулярно оси системы, не подвергаются упрочнению вследствие малого градиента плотности энергии магнитного поля вблизи их поверхности.

При близком расположении выступов на поверхности изделия ( $\leq 1$  см) при указанных выше параметрах материал поверхности в пространстве между ними не испытывает упрочняющего воздействия.

Представленная в работе модель не учитывает неоднородность материала обрабатываемого изделия, в связи с этим не учтено влияние участков, обладающих повышенной (по сравнению с усредненным по объему значением) магнитной проницаемостью. Если магнитная проницаемость этих участков превосходит усредненное значение в 10 раз, то механические напряжения, локально возникающие вблизи них, будут в 2,5 раза превосходить напряжения, достаточные для реализации сдвиговых деформаций, что может приводить к дроблению зерен по границам этих участков и к дополнительному упрочнению вследствие образования мелкодисперсной структуры на поверхности изделия, изготовленного из магнитного материала (например, сталь 10).

### Литература

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. 151–155.
2. Малыгин Б. В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. М.: Машиностроение, 1998. 130 с.
3. Алифанов А. В. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милукова, Н. М. Ционенко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2016. № 4. С. 31–36.
4. Alifanov A. Modeling of non-stationary diffusion of alloying elements on exposure of steel samples to magnetic pulses / A. Miliukova, Zh. Popova, D. Tsionenko. 15-th International Scientific Conference «TRANSFER 2014». Alexander Dubcek University of Trencin, 23–24.10.2014, Trencin, Slovakia. 2014. P. 10–14.
5. Импульсные методы обработки материалов. Мн.: Наука и техника, 1977. 216 с.
6. Алифанов А. В. Расчет давлений в системе «индуктор-заготовка» при магнитно-импульсной обработке металлов / А. В. Алифанов, А. В. Акулов, Ж. А. Попова, А. С. Демяничук // Вестн. БарГУ. Сер. физ.-мат. наук. Техн. науки. 2013. Вып. 1(4). С. 31–37.

### References

1. Alifanov A. V., Popova Zh. A., Tsionenko N. M. Mechanism of hardening of alloyed steels in impulse magnetic field [The mechanism of hardening of alloyed steels in impulse magnetic field]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 4, pp. 151–155.



2. **Malygin B. V.** *Magnitnoe uprochnenie instrumentov i detalej mashin* [Magnetic hardening of tools and machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1998, 130 p.
3. **Alifanov A. V., Tsionenko D. A., Miljukova A. M., Tsionenko N. M.** Magnitostriktionnyj mehanizm obrazovaniya melkodispersnoj struktury v stal'nyh izdelijah pri magnitno-impul'snom vozdejstvii [Magnetostrictive mechanism of the formation of a fine-dispersed structure in steel products under magnetic-pulse action]. *Vesti NAN Belarusi, Ser. fiz.-mat. nauk* = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Ser. fiz.-mat. Sciences, 2016, no. 4, pp. 31–36.
4. **Alifanov A.** Modeling of non-stationary diffusion of alloying elements on exposure of steel samples to magnetic pulses. A. Miliukova, Zh. Popova, D. Tsionenko. *15-th International Scientific Conference – «TRANSFER 2014»*. Alexander Dubcek University of Trencin, 23–24.10.2014, Trencin, Slovakiya. P. 10–14.
5. **Impul'snye metody obrabotki materialov** [Impulse methods of processing materials]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1977, 216 p.
6. **Alifanov A. V., Akulov A. V., Popova Zh. A., Demjanchik A. S.** Raschet davlenij v sisteme «induktor-zagotovka» pri magnitno-impul'snoj obrabotke metallov [Calculation of pressures in the «inductor-billet» system for magnetic-pulse processing of metals]. *Vestnik BarGU. Ser. fiz.-mat. nauk. Tehn. Nauki* = *Bulletin of the BarGU. Ser. fiz.-mat. Sciences. Techn. Science*, 2013, vyp. 1(4), pp. 31–37.