

## Глава 2. ФИЗИКА ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ, РАСЧЕТ ИНДУКТОРОВ И ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

<sup>1</sup>Алифанов А.В., <sup>2</sup>Ционенко Д.А., <sup>1</sup>Милюкова А.М.

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

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Беларусь, E-mail: alifanov\_aav@mail.ru

### 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, что локальность нагрева определяется неоднородностью структуры стального изделия. Максимальная температура в процессе обработки в области границ зерен достигает значений порядка 1100 °С, что достаточно для осуществления процессов рекристаллизации. Вследствие адиабатического характера тепловыделения, связанного с малой скоростью отвода тепла, в значительной области зерна (вблизи границы) температура ферромагнитного материала близка к температуре Кюри и на границе превосходит ее [1]. Таким образом, при локальном нагреве материала в присутствии сильного магнитного поля реализуется комбинированное воздействие на его структуру. С этой точки зрения процесс магнитно-импульсной обработки (МИО) подобен термической обработке металлических сплавов в магнитном поле (ТОМП) [4–7].

Воздействие внешнего импульсного магнитного поля на термодинамику, механизм и кинетику фазовых переходов приводит к получению мелкодисперсной структуры на поверхности образца. При этом устойчивые изменения структуры приводят к модификации свойств, полезных для эксплуатации [8–10].

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

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

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

Для упрочнения поверхностного слоя изделия необходимо, чтобы плотность поверхностных сил  $f_m$  превышала предел текучести материала  $\sigma_{\tau}$ , то есть должно выполняться неравенство [11]:

$$f_m \geq \sigma_\tau \quad (2)$$

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 точностью 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 [12–14]. 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.

### **1. Механизмы образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях под воздействием нагрева и магнитно-импульсной обработки**

Установлено, что технология ТОМП в постоянном магнитном поле напряженностью до 2,4 МА/м приводит к аналогичной модификации доменной и кристаллической структуры ферромагнетика, как и магнитно-импульсная обработка при максимальной напряженности магнитного поля порядка 108 А/м и времени импульса 10<sup>-3</sup> с [15]. Указанные характеристики импульса реализуются в разработанных и изготовленных в ФТИ НАН Беларуси магнитно-импульсных установках. Отличительной особенностью технологии ТОМП является то, что модификация структуры стального образца происходит по всему объему, в то время как для МИО характерно воздействие только на поверхность. Глубина обработки составляет 10–100 мкм.

Воздействие магнитного поля может оказывать существенное влияние на фазовые переходы первого рода, если исходные фазы, подвергаемые обработке и расположенные в непосредственной близости друг от друга (порядка толщины доменной стенки, что составляет 1–10 межатомных расстояний), значительно отличаются по намагниченности, например, как парамагнетик от ферромагнетика. Именно такая структура возникает в зерне при магнитно-импульсном воздействии.

Влияние магнитного поля проявляется, главным образом, в изменении равновесной температуры перехода, связанного с рекристаллизацией, а также объемной скорости превращения.

Изменение температуры равновесия при внешнем воздействии магнитным полем может быть найдено так же, как в соотношении Клайперона-Клаузиуса [2,3]. Предположим, что 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 соотношения

$$\Phi = U - TS + \sum_i X_i dx_i \quad (3)$$

где  $U$ ,  $T$ ,  $S$  – соответственно внутренняя энергия, абсолютная температура, энтропия;  $X_i$ ,  $x_i$  – обобщенные сила и координата;  $\sum X_i dx_i$  – работа, совершаемая системой против внешнего давления. Вводятся следующие обозначения обобщенных сил и координат:  $X_1=P$  (давление);  $x_1=V$  (объем); поверхностные силы:  $X_2=\gamma$ ;  $x_2=S$

(поверхность); для магнитного поля:  $X_3=H$  – напряженность магнитного поля,  $x_3=I$  – намагниченность. Если одна из фаз, участвующих в превращении, обладает ферромагнитными свойствами, то внешнее магнитное поле понижает термодинамический потенциал этой фазы на величину  $\delta\Phi=IH$ . В результате понижения термодинамического потенциала система становится более стабильной:

$$\Phi H = U - TS + PV - HI. \quad (4)$$

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

$$\Phi_1(T, P, H) = \Phi_2(T, P, H). \quad (5)$$

Продифференцируем правую и левую части равенства (5) по изменениям  $T$  и  $H$  при  $P=\text{const}$ :

$$\partial\Phi_1/\partial T + (\partial\Phi_1/\partial H)(\partial H/\partial T) = \partial\Phi_2/\partial T + (\partial\Phi_2/\partial H)(\partial H/\partial T). \quad (6)$$

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

$$dT/dH = (M_1 - M_2)/(S_2 - S_1). \quad (7)$$

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

$$dT = [(I_1V_1 - I_2V_2) T_0/q] dH. \quad (8)$$

Изменение температуры фазового перехода  $\Delta T$  при воздействии внешнего поля напряженностью  $H$  определяется интегрированием дифференциального соотношения (8). Условия такого интегрирования для случая, когда одна или обе фазы находятся в ферромагнитном состоянии, определены в работе [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 в интервале температур  $T_0(H=0) \dots T_0(H)$  не превышает точку Кюри [3]. Условие равенства объемов позволяет учитывать магнотриксционные 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  $M=IV$  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:

$$\Delta T = T_0 V_1 I_1 H / q. \quad (9)$$

Соотношение (9) показывает, что для принятых условий  $\Delta T$  линейно зависит от 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  $H=1,6 \cdot 10^6$  кА/м) во время мартенситного превращения дает  $\Delta T=4$  К [16].

В соответствии с соотношением (9), фазовый переход от парамагнитной к ферромагнитной фазе под воздействием внешнего магнитного поля приводит к расширению области существования фазы, обладающей ферромагнитными свойствами. В общем случае перехода между двумя ферромагнитными фазами расширяется область существования той фазы, у которой больше намагниченность.

При определении смещения температуры фазового равновесия была учтена только энергия  $E=\Delta IH$ , наибольшая из всех составляющих магнитной энергии. Вместе с тем при протекании мартенситного и бейнитного превращения существенную роль играют факторы «нехимической» природы, в частности, упругая и поверхностная энергия. С учетом деформации, обусловленной магнитоупругой энергией, зависимость для определения смещения температур  $M_H$  и  $M_K$  при воздействии магнитным полем в процессе мартенситного превращения можно записать [4]:

$$\begin{aligned} \Delta M_H &= \frac{T_0}{q} \left( \Delta I_{M_H} H + \frac{9}{2} K \epsilon_0 \omega + \frac{3}{2} G \gamma_0 \lambda_s \right) \\ \Delta M_K &= \frac{T_0}{q} \left( \Delta I_{M_K} H + \frac{9}{2} K \epsilon_0 \omega + \frac{3}{2} G \gamma_0 \lambda_s \right) \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\Delta I_{M_H} (\Delta I_{M_K})$  – разность намагниченности аустенита и мартенсита при температуре начала (конца)  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения;  $K$  и  $G$  – модули объемной деформации и сдвига  $\alpha$ -фазы;  $\varepsilon_0$  и  $\gamma_0$  – макроскопические дилатационная и сдвиговая деформации при мартенситном превращении;  $\omega$  – объемная магнитострикция парапроцесса;  $\lambda S$  – линейная магнитострикция насыщения.

В формуле (10) второе слагаемое определяет смещение температуры  $M_H$  ( $M_K$ ), обусловленное энергией взаимодействия объемной магнитострикции парапроцесса с дилатацией, а третье – энергией взаимодействия линейной магнитострикции насыщения и пластического сдвига при  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении. Результаты расчетов по формуле (10) для железуглеродистых сплавов в зависимости от содержания углерода определяет характер концентрационной зависимости температурных сдвигов начала ( $\Delta M_H$ ) и конца ( $\Delta M_K$ ) мартенситного превращения. Для всех сплавов  $\Delta M_H > \Delta M_K$ , а наибольшее смещение достигается в низкоуглеродистых сплавах.

Расчет на основе формулы (10) показывает, что энергия взаимодействия объемной магнитострикции парапроцесса с дилатацией дает вклад, сравнимый с энергией намагничивания в смещение  $\Delta M_H$ . С увеличением концентрации углерода и, следовательно, снижением температуры начала мартенситного превращения, магнитострикция парапроцесса заметно уменьшается, что обуславливает уменьшение  $\Delta M_H$ , несмотря на некоторое увеличение вклада от  $E_1 = \Delta I H$ . Смещение температур  $M_H$  и  $M_K$ , вызванное энергией взаимодействия пластического сдвига при  $\gamma \rightarrow \alpha$  переходе с линейной магнитострикцией насыщения, для рассмотренных условий не превышает 0,25 и 0,35 °C соответственно.

Величина  $\Delta M_H$  (как и  $\Delta M_K$ ) линейно возрастает с увеличением напряженности поля, если последнее обеспечивает состояние магнитного насыщения (с учетом размагничивающего фактора мелких частиц), т.е. напряженность поля превышает  $4 \cdot 10^5$  кА/м.

Выполненные расчеты показывают [16], что смещение температур  $T_0$ ,  $M_H$  и  $M_K$  в постоянных магнитных полях напряженностью 1,6–2,0 МА/м сравнительно невелико (например, для стали У10  $\Delta M_H \approx 6,8$ –8,5 °C), поэтому трудно ожидать существенных изменений фазового состава, морфологии и свойств продуктов превращения по этой причине. Например, по приближенной оценке уменьшение количества остаточного аустенита, вызванного повышением температуры  $M_H$  на 8 °C, для стали с 1,0 %С составляет около 1,2 %. Приведенные выше зависимости (9) и (10) показывают, 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.

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

Снижение свободной энергии ферромагнитной фазы (например, мартенсита) на величину  $IH$  приводит к сдвигу температуры равновесия  $T_0$  на величину  $\Delta T$ . Из линейной упрощенной схемы сдвиг  $\Delta T$  можно определить геометрически следующим образом:

$$\Delta T = (IH/\Delta\Phi)(T_0 - T_H), \quad (11)$$

где  $\Delta\Phi$  – разность термодинамических потенциалов, соответствующая превращению;  $T_H$  – температура начала превращения (например,  $M_H$ ).

Если в магнитном поле напряженностью 24 МА/м плотность энергии магнитного поля  $IH \sim 50$  МДж/м<sup>3</sup>,  $\Delta\Phi = 150$  МДж/м<sup>3</sup>,  $T_0 - T_H = 200$  °C, то  $\Delta T \sim 66$  °C, а в поле напряженностью 1,6 МА/м,  $IH \sim 3$  МДж/м<sup>3</sup>,  $\Delta T = 4$  °C.

Таким образом, в постоянных магнитных полях, которые реально можно использовать в установках промышленного типа, магнитная энергия недостаточна для существенного изменения условий фазового равновесия, но при импульсном воздействии этого можно достигнуть для поверхностного слоя, сравнимого с толщиной скин-слоя:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\mu_0\omega}} \quad (12)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление образца;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;

$\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная в системе СИ;  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$  – циклическая частота колебаний контура, определяемая индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$  установки при малом значении сопротивления цепи.

Подстановка численных значений, входящих в формулу (12), усредненных по объему образца, характерных для стали ( $\rho=10^{-7}$  Ом·м,  $\mu=103$ ) и значения  $\omega \approx 10^4$  с<sup>-1</sup>, определяемого параметрами установки, дает значение толщины упрочненного слоя порядка 10-4 м.

Полная энергия ферромагнетика определяется не только взаимодействием вектора спонтанной намагниченности с внешним полем, а представляет собой сумму нескольких компонентов. К ним относятся: энергия кристаллографической магнитной анизотропии  $E_k$ , магнитоупругая энергия магнитострикционных деформаций  $E_\lambda$ , энергия индуцированной одноосной анизотропии  $E_H$ , магнитостатическая энергия (энергия ориентации ферромагнитных частиц по отношению к внешнему полю)  $E_0$ . Расчеты, выполненные в [16] 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 магнитостатических энергий  $\Delta E_0=I2\cdot\Delta N_p$  (где  $\Delta N_p$  – размагничивающий фактор), приводящая к увеличению вероятности ориентированного расположения ферромагнитных тел во внешнем магнитном поле. Их величина имеет значение (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. Как показано выше, изменения равновесных температур в этом случае составляет несколько градусов.

Однако, полученные в работах [17–19] 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. Так, структурные исследования, 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 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. Наконец, изучение структуры мартенсита показывает заметное увеличение дисперсности кристаллов  $\alpha$ -фазы. Таким образом, результаты упомянутых выше экспериментальных работ позволяют считать влияние постоянного магнитного поля напряженностью до 2,4 МА/м в процессе фазовых переходов достаточным для достижения заметных структурных изменений.

Вклад энергии магнитного поля должен сказываться прежде всего на критической стадии зарождения и роста мартенсита, поскольку вероятность зарождения обычно зависит от разности термодинамических потенциалов фаз как  $\exp(\Delta\Phi/RT)$ , 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, так как 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 определить особенности механизма образования ферромагнитных зародышей под действием внешнего магнитного поля при фазовых переходах [20].

## 2. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения

При магнитно-импульсном упрочнении (МИУ) внешней поверхности заготовки, обладающей аксиальной симметрией, используется цилиндрический индуктор. Для упрочнения изделий с плоскими поверхностями применяется плоский индуктор, что обеспечивает равномерное воздействие импульса магнитного поля на обрабатываемую поверхность.

При протекании импульсного электрического тока в индукторе, в токопроводящей заготовке, которая расположена в непосредственной близости от него, возникает индукционный ток, пропорциональный скорости изменения магнитного потока через площадь сечения заготовки. Магнитное поле индукционного тока направлено таким образом, чтобы уменьшить изменение магнитного потока, создаваемого током индуктора. В результате возникает разность плотностей энергии магнитного поля внутри заготовки и вблизи ее поверхности [1]. Эта разность плотностей энергии равна плотности поверхностных сил, действующих на поверхность заготовки. Поверхностная плотность  $f_m$  электромагнитных сил определяется соотношением [1]:

$$f_m = 0,5\mu_0(\mu_{out}H_{out}^2 - \mu_{in}H_{in}^2), \quad (13)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная в системе СИ,  $\mu_{out}$  – относительная магнитная проницаемость среды, окружающей заготовку,  $H_{out}$  – напряженность магнитного поля на внешней стороне заготовки,  $\mu_{in}$  – относительная магнитная проницаемость материала заготовки,  $H_{in}$  – напряженность магнитного поля внутри заготовки.

Для упрочнения поверхностного слоя заготовки необходимо, чтобы плотность поверхностных сил  $f_m$  превышала предел текучести материала  $\sigma_\tau$ , то есть должно выполняться неравенство (2)[11]:

$$f_m \geq \sigma_\tau$$

Напряженность магнитного поля на внешней стороне заготовки определяется током в индукторе и может быть определена на основании закона полного тока:

$$\oint H_1 dl = NI_1, \quad (14)$$

а интегрирование в левой части проводится по замкнутому контуру, замыкающемуся на бесконечности, где напряженность поля полагается равной нулю. В результате запишем:

$$H_1 = K_1 NI_1 \quad (15)$$

где параметр  $K_1$ , имеющий размерность м<sup>-1</sup> определяется индуктивностью магнитной цепи индуктор-заготовка;  $N$  – число витков катушки индуктора;  $I_1$  – сила разрядного тока в индукторе.

В отсутствие заготовки, магнитное поле вблизи индуктора можно считать однородным. Тогда формула (14) принимает вид:

$$H_{1b} = NI_1 / l, \quad (16)$$

где  $l$  – длина контура, по которому осуществляется интегрирование в (14).

Так, при силе тока  $I_1 = 10^3$  А, количестве витков  $N = 10$ , длине катушки  $l_0 = 0,136$  м, толщине витков катушки  $a = 0,01$  м расчет по формуле (4) для точек, лежащих внутри индуктора в непосредственной близости от витков (длина  $l = l_0 + 2a = 0,156$ ) дает значение модуля напряженности, равное  $H_{1b} = 6,41 \cdot 10^4$  А/м.

Если внутренний радиус катушки сравним по размеру с длиной катушки, то индуктор считается конечным и напряженность в произвольной точке внутри индуктора определяется формулой [12]:

$$H_{1k} = NI_1(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) / 2l_0, \quad (17)$$

где  $\alpha_1$  – угол между направлением оси катушки и направлением вектора, соединяющего точку наблюдения и первый конец катушки;  $\alpha_2$  – угол между направлением оси катушки и направлением вектора, соединяющего точку наблюдения и второй конец катушки.

Схематическое изображение цилиндрического индуктора длиной 0,136 м, выполненного из медной шины квадратного сечения со стороной 0,01 м, представлено на рисунке 1.

При внутреннем радиусе катушки  $r = 0,025$  м и значениях остальных параметров, указанных выше, расчет модуля вектора напряженности в геометрическом центре индуктора при  $\cos\alpha_1 = -\cos\alpha_2 = l_0 / \sqrt{4r^2 + l_0^2}$  дает значение  $H_{1k} = 6,22 \cdot 10^4$  А/м.

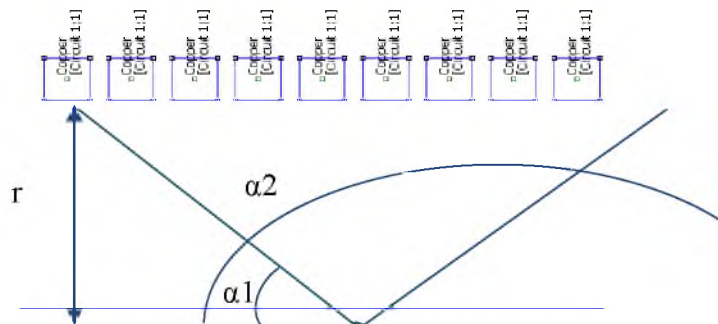


Рисунок 1 – Схема цилиндрического индуктора

При помещении внутрь индуктора заготовки из магнитного материала с магнитной проницаемостью  $\mu$ , распределение силовых линий магнитного поля существенно изменяется.

Для аналитического расчета магнитного поля в индукторе в ряде простейших случаев может использоваться теория магнитных цепей. Так, при протекании в индукторе постоянного тока, распределение силовых линий магнитного поля внутри объема индуктора в случае однородной заготовки рассчитывается на основе неразветвленной магнитной цепи (рис.2).

Обозначения, используемые на рисунке 2:  $R_{md}$  – магнитное сопротивление дополнительного магнитопровода, образованного корпусом установки,  $R_s$  – магнитное сопротивление заготовки вдоль осевой линии,  $R_z$  – магнитное сопротивление воздушного зазора,  $E = I_1 N$  – магнитодвижущая сила индуктора.

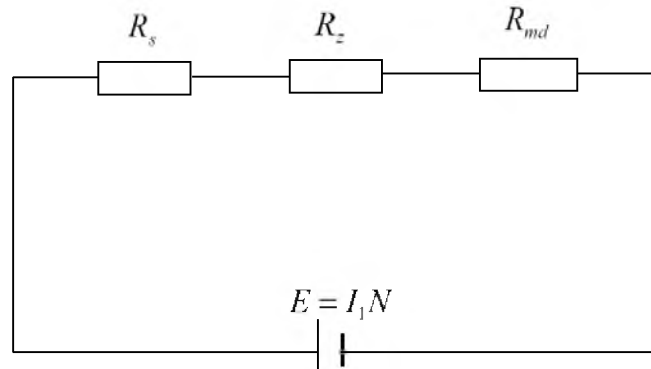


Рисунок 2 – Схема магнитопровода в случае, когда внутри цилиндрического индуктора помещена однородная сплошная деталь

Формулы для расчета магнитной цепи, изображенной на рисунке 2, имеют вид:

$$\begin{aligned} I_1 N &= H_{md} l_{md} + H_z l_z + H_s l_s, \\ B_{md} S_{md} &= B_z S_z = B_s S_s, \\ B_{md} &= \mu_m \mu_0 H_{md}, B_z = \mu_0 H_z, B_s = \mu_s \mu_0 H_s. \end{aligned} \quad (18)$$

При расчетах используется приближение, в рамках которого изменение параметров заготовки не оказывает существенного влияния на магнитное сопротивление участков контура, замыкающихся по воздуху и по корпусу установки. Расчеты по формулам (18) справедливы только в случае постоянного тока и однородной симметричной заготовки, занимающей весь внутренний объем цилиндрического индуктора.

Если ток имеет импульсный характер, то напряженность магнитного поля  $H_{in}$  внутри заготовки определяется как силой тока в индукторе  $I_1$ , так и силой наведенного тока  $I_2$  в заготовке [13].

Определим напряженность магнитного поля  $H_2$ , которая создается наведенным током  $I_2$  по закону полного тока:

$$\oint_l H_2 dl = \int_S j_{2n} dS \quad (19)$$

Интегрирование плотности тока в правой части осуществляется по площади  $S$  вблизи поверхности заготовки, в которой протекает индукционный ток:

$$S = \pi r_s^2 - \pi(r_s^2 - \delta_s^2) \quad (20)$$

где  $r_s$  – радиус цилиндрической заготовки и  $\delta_s^2$  – толщина скин-слоя

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi^2 \cdot \sigma_s \cdot \mu_{in} \cdot f}} \quad (21)$$

где  $\sigma_s$  – проводимость материала заготовки,  $\mu_{in}$  – магнитная проницаемость материала заготовки,  $f$  – частота разрядного тока.

Поверхностный эффект особенно сказывается при высокой частоте разряда и при обработке заготовки из электропроводных материалов с большим значением относительной магнитной проницаемости.

Индукционный ток определяется скоростью изменения магнитного потока в заготовке:

$$I_2 = \langle j_2 \rangle S = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{1}{R} \frac{d}{dt} (\mu_{in} \mu_0 H_{in} S) \quad (22)$$



В случае, когда заготовка представляет собой сплошной однородный цилиндр радиуса  $r_s$ , изготовленный из материала с магнитной проницаемостью  $\mu_{in}$ , магнитный поток  $\Phi_2$  внутри заготовки связан с напряженностью магнитного поля внутри нее по формуле:

$$\langle H_2 \rangle = \frac{\Phi_2}{\mu_o \cdot \mu_{in} \cdot \pi \cdot r_s^2}, \quad (23)$$

где усреднение в (22) и (23) осуществляется по площади, определенной в (9). Из формул (22), (23) следует, что

$$H_2 = K_2 I_2, \quad (24)$$

где  $K_2$  – постоянная, определяемая индуктивностью заготовки (м-1).

По правилу Ленца магнитное поле  $H_2$  направленно противоположно магнитному полю  $H_1$ , поэтому результирующая напряженность магнитного поля определяется суперпозицией полей, создаваемых каждым из токов:

$$H_{in} = K_1 N I_1 - K_2 I_2, \quad (25)$$

В общем случае магнитная цепь, соответствующая заготовке, зависит от ее формы, то есть от наличия выступов, пазов, канавок, а также от свойств материала заготовки. При этом аналитическое решение задачи по определению коэффициента  $K_2$  в общем случае невозможно вследствие сложности граничных условий и для расчета характеристик процесса магнитно-импульсной обработки используются численные методы.

### 3 Алгоритмы расчета магнитного поля индуктора на основе закона Био – Савара – Лапласа

Для численного анализа магнитного поля индуктора разработаны алгоритмы, позволяющие вычислять напряженность магнитного поля, магнитную индукцию и плотности энергии магнитного поля в заданной точке пространства (точке наблюдения). Используя эти величины можно также определить магнитный поток через поверхность, проходящую перпендикулярно оси индуктора, индуктивность и активное сопротивление индуктора в зависимости от его конфигурации, параметров и материала шины индуктора, формы, размеров и материала заготовки.

Исходными данными для вычисления являются геометрические параметры индуктора. Для плоского индуктора – это ширина шины  $b$ ; расстояние между витками спирали  $\Delta b$ ; высота шины  $h$ . Для цилиндрического индуктора: размеры шины в поперечном сечении  $a \times b$ ; диаметр внутренней поверхности индуктора  $d$ ; длина индуктора  $h$ ; шаг спирали  $\Delta h$ , (либо количество витков  $n$ ); радиус средней линии спирали  $R$ . Задаются характеристики материала шины индуктора: удельная проводимость материала шины  $\rho$ ; температурный коэффициент сопротивления материала  $\alpha$ ; магнитная проницаемость шины  $\mu$ ; удельная теплоемкость шины  $c$  и плотность материала  $\gamma$ .

Характеристики установки для магнитно-импульсной обработки следующие: емкость конденсаторной батареи  $C$ ; полная длина подводящей линии  $l$ ; площадь поперечного сечения подводящей линии  $S$  и характеристики материала подводящей линии. Для точного расчета необходимо задание коэффициента теплоотдачи  $k$  системы «подводящая линия – индуктор».

Расчет напряженности магнитного поля, создаваемого индуктором произвольной формы в отсутствие заготовки, осуществляется посредством реализации нижеследующих алгоритмов.

Алгоритм 1. Расчет мгновенных значений тока в индукторе

1). Поперечное сечение шины индуктора разбивается на малые участки. Каждому участку в соответствие ставится линия тока в направлении, перпендикулярном плоскости сечения и зависящая от формы индуктора.

2). Определяется активное сопротивление элемента, соответствующего линии тока под номером  $i$

$$R_i = \rho_0 \frac{l_i}{S_i}, \quad (26)$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление материала шины при начальной температуре;  $l_i$  – длина выбранной линии тока,  $S_i$  – площадь поперечного сечения рассматриваемого участка.

Учет изменения сопротивления от температуры осуществляется по формуле:

$$\rho_i = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T_i), \quad (27)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления,  $\Delta T_i$  – изменение температуры  $i$ -го элемента шины, вызванное протеканием тока.

3). Сила тока в индукторе в момент времени  $t$  определяется из условия, что элементы индуктора, соответствующие линиям тока, подключены параллельно друг к другу и последовательно к подводящей линии, которая имеет постоянное сопротивление  $R_i$ :

$$I_i(t) = \frac{U(t) - \sum_{k \neq i} M_{ik} \left( \frac{\Delta I_k(t)}{\Delta t} \right) - L_i \left( \frac{\Delta I_i(t)}{\Delta t} \right)}{R_i + R_i(t)}, \quad (28)$$

где  $L_i$  – индуктивность выбранной линии тока,  $M_{ik}$  – коэффициент взаимной индукции линий тока с номерами  $i$  и  $k$ .

4). Зависимость напряжения на индукторе от времени определяется формулой:

$$U(t) = U(t - \Delta t) - \frac{I(t)}{C} \Delta t, \quad (29)$$

где  $\Delta t$  – величина промежутка времени, определяющего точность вычислений силы тока,

$U(t - \Delta t)$  – величина напряжения в предыдущий момент времени и  $C$  – емкость батареи конденсаторов, используемых для питания установки.

5). Зависимость сопротивления от температуры определяется формулой (27), в которую подставляется изменение температуры, определяемое следующим образом:

$$\Delta T_i = \frac{I_i(t)^2 R_i(t) + k_i (T(t) - T_0)}{c \Delta m_i} \Delta t, \quad (30)$$

где  $k_i$  – коэффициент теплоотдачи элемента шины под номером  $i$  и  $\Delta m_i$  – его масса.

Алгоритм 2. Расчет амплитудных значений напряженности магнитного поля, создаваемого индуктором без учета влияния заготовки

1). Каждая линия тока под номером  $i$  разбивается на малые элементы. Элементы вдоль длины линии тока нумеруются номером  $j$ . Выбор длины элемента задается параметром  $dl$ . Длина элемента определяет точность вычисления магнитного поля. Уменьшение длины элемента приводит к увеличению точности, но при этом увеличиваются вычислительные затраты (время выполнения программы).

2). Определяется радиус-вектор точки наблюдения относительно элемента линии тока  $\vec{r}$ . Проекции вектора напряженности магнитного поля, создаваемого элементом длиной  $dl$  в точке наблюдения, определяются по закону Био-Савара-Лапласа:

$$\Delta \vec{H}_{ij} = \frac{I_i d\vec{l}_j \times \vec{r}_{ij}}{4\pi r_{ij}^3} \quad (31)$$

3). Напряженность магнитного поля, создаваемого линией тока, определяется через компоненты вектора напряженности:

$$H_x = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M H_{xij}, H_y = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M H_{yij}, H_z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M H_{zij} \quad (32)$$

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}.$$

где  $N$  – число линий тока и  $M$  – число элементов вдоль линии тока.

#### 4 Расчет процесса обработки с использованием цилиндрического индуктора методом конечных разностей во временной области

Для магнитно-импульсной обработки цилиндрических заготовок индуктор изготавливается в виде цилиндрической спирали. Заготовка помещается внутрь спирали и играет роль сердечника, что обуславливает максимальную концентрацию силовых линий магнитного поля в материале заготовки вблизи ее поверхности. Минимальный диаметр медной шины, выбираемой для изготовления индуктора, определяется плотностью импульса тока, протекающего по спирали в процессе обработки.

Для увеличения эффективности процесса необходимо уменьшать зазор между внешней поверхностью заготовки и внутренней поверхностью индуктора. Длина заготовки должна быть меньше длины индуктора, причем расстояние от края индуктора до торцевой поверхности заготовки должно превышать 10 мм, что предотвращает рассеивание магнитного потока. Для замыкания магнитной цепи индуктор-заготовка, система помещается на массивную пластину, выполненную из стали. Общая схема моделирования представлена на рисунке 3. Параметры моделирования: диаметр средней линии шины индуктора 40 мм, диаметр медной шины 10 мм, высота 100 мм, эффективное количество витков 6, расстояние между витками 4 мм.



Рисунок 3 – Спиральный индуктор

В индуктор помещается заготовка в виде полого цилиндра (рис.4). Параметры моделирования: заготовка – в виде полого цилиндра из стали, внешний диаметр 28 мм, внутренний диаметр 20 мм, нижний торец заготовки расположен на расстоянии 20 мм от основания, верхняя поверхность расположена на расстоянии 70 мм. При изменении силы тока в индукторе, изменение магнитного потока через поперечное сечение заготовки приводит к возникновению индукционного тока по ее периметру. При этом плотность энергии магнитного поля на внешней поверхности заготовки на 7 порядков превосходит значение плотности энергии на внутренней поверхности. Результирующая электродинамических сил, действующих на заготовку, направлена противоположно внешней нормали к ее поверхности.



Рисунок 4 – Заготовка в спиральном индукторе (сечение вертикальной плоскостью, проходящей через ось)

При коаксиальном расположении заготовки и индуктора электродинамические силы приводят к упрочнению материала поверхности. В случае смещения оси заготовки относительно оси индуктора, электродинамические силы стремятся привести систему в состояние равновесия, которое соответствует совпадению осей.

Поэтому в случае обработки заготовок, имеющих цилиндрическую (либо сферическую) симметрию, в индукторе рассматриваемого типа, прокладка между внешней поверхностью заготовки и внутренней поверхностью индуктора испытывает малое воздействие.

Моделирование осуществлялось методом конечных разностей во временной области. В качестве возбуждающего сигнала (импульса) использовался один период синусоидального незатухающего колебания. Параметры сигнала: частота 1 кГц, амплитуда 1 кВ. Зависимость магнитной проницаемости материала заготовки от напряженности магнитного поля изображена на рисунке 5.

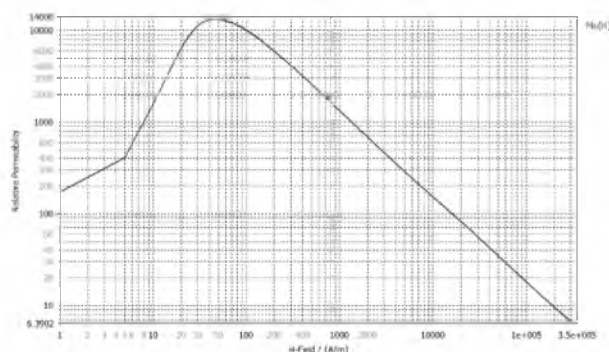


Рисунок 5 – Зависимость магнитной проницаемости материала заготовки от напряженности магнитного поля

Мгновенное значение вектора напряженности магнитного поля вблизи поверхности заготовки изображено на рисунке 6. Максимальное значение напряженности магнитного поля достигается вблизи торцевых поверхностей заготовки и равно порядка  $2 \cdot 10^7$ – $3 \cdot 10^7$  А/м. Вдоль образующей цилиндра напряженность магнитного поля распределена неравномерно и принимает значения от  $2 \cdot 10^7$  на краях заготовки до  $1,3 \cdot 10^6$  в области середины заготовки.

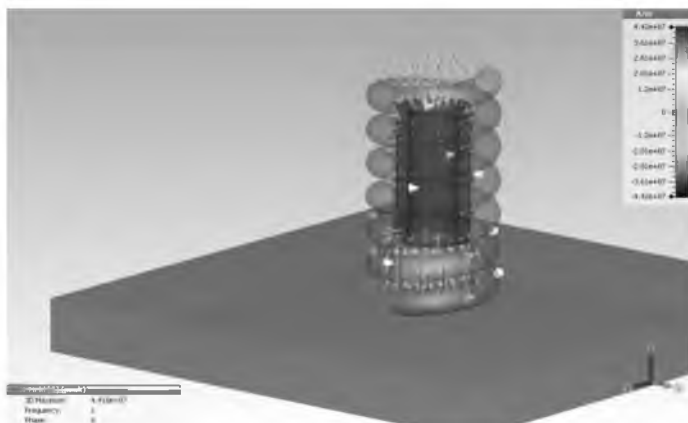


Рисунок 6 – Распределение силовых линий магнитного поля в индукторе

Неравномерность распределения магнитного поля по длине заготовки может приводить к неравномерности упрочнения внешней поверхности. Максимальный эффект достигается на торцевых поверхностях заготовки. В соответствии с результатами моделирования, максимальное значение плотности энергии, равное  $4,08 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>3</sup> достигается на торцевых поверхностях. При удалении от края заготовки значение плотности энергии уменьшается до  $3,71 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>3</sup> в центральной области.

В результате расчета были получены следующие значения для энергетических характеристик процесса: полная энергия магнитного поля  $W_0=13,26$  кДж, энергия, выделяющаяся в заготовке  $W_1=2,589$  кДж, энергия, выделяющаяся в элементах магнитной цепи (стальная пластина)  $W_2=4,597$  кДж, энергия, рассеянная в окружающее пространство  $W_3=6,074$  кДж.

Кoeffициент полезного действия процесса определим как отношение энергии, выделяющейся в заготовке, к полной энергии импульса  $\eta=19,95$  %.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают возможность магнитно-импульсного упрочнения поверхности цилиндрических заготовок, выполненных из материалов, предел текучести которых не превышает значения  $3 \cdot 10^2$  МПа при энергии импульса  $13,26$  кДж. При этом распределение плотности энергии магнитного поля по длине заготовки неравномерно: уменьшается от краев к центру.

Кoeffициент полезного действия процесса увеличивается при уменьшении зазора между внутренней поверхности индуктора и внешней поверхностью заготовки и достигает порядка 20 % при указанных выше параметрах моделирования.

## **5 Расчет процесса обработки с использованием плоского индуктора методом конечных разностей во временной области**

При магнитно-импульсной обработке плоских заготовок индуктор изготавливается в виде плоской спирали. Заготовка помещается на верхнюю горизонтальную поверхность индуктора. Задачей моделирования является определение положения заготовки на поверхности индуктора, приводящее к максимальной эффективности процесса. Площадь поперечного сечения медной шины, выбираемой для изготовления плоского индуктора, может быть увеличена за счет увеличения ее высоты. Это позволяет осуществлять обработку с использованием импульсов больших энергий по сравнению со случаем цилиндрического индуктора. Для замыкания магнитной цепи индуктор-заготовка, система помещается на массивную пластину, выполненную из стали.

Индуктор для обработки плоских заготовок представлен на рисунке 7. Для увеличения эффективности процесса необходимо уменьшать зазор между поверхностью заготовки и индуктора. В данном случае электродинамические силы приводят к сжатию заготовки в вертикальном направлении, поэтому для предотвращения деформации и разрушения индуктора, между ним и заготовкой необходимо располагать демпфирующую прокладку из диэлектрического материала. Выбор параметров прокладки обусловлен обеспечением отсутствия износа индуктора, и минимальным снижением эффективности процесса обработки. Разрез системы плоскостью, проходящей через ось системы «индуктор-заготовка», представлен на рисунке 8.

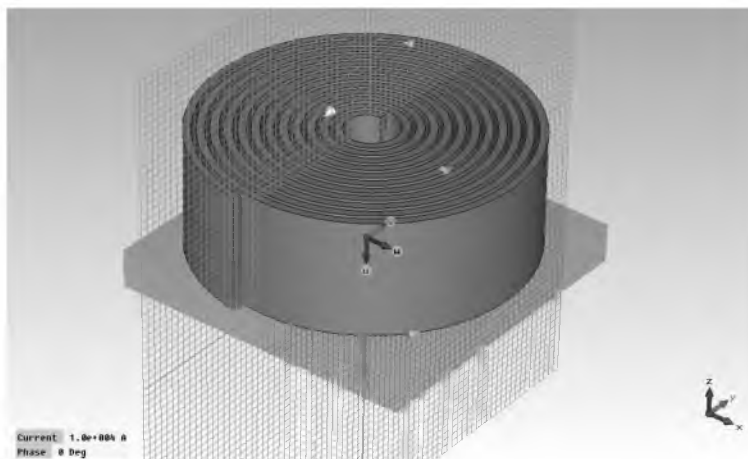


Рисунок 7 – Общий вид плоского индуктора с параметрами: толщина шины 10 мм, высота 150 мм, расстояние между витками 5 мм

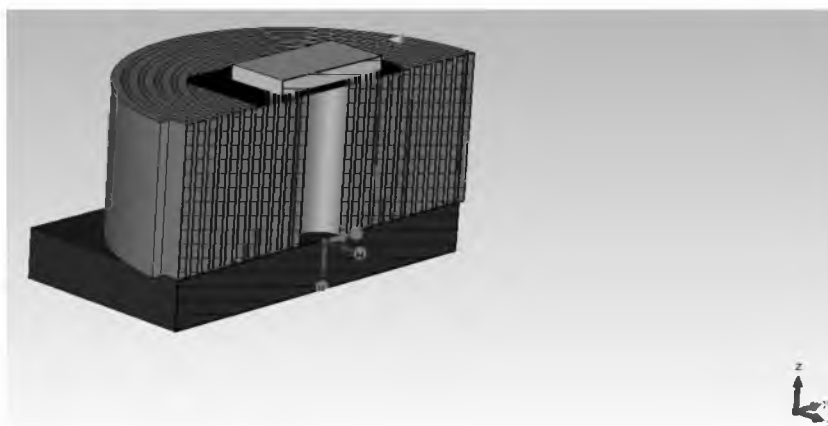


Рисунок 8 – Разрез системы индуктор–заготовка. Параметры индуктора: толщина заготовки 15 мм, размеры 100 мм. Материал заготовки – алюминий

Параметры возбуждающего импульса в данном случае такие же, как и для цилиндрического индуктора: период синусоиды длительностью 1 мс и амплитудой 1 кВ.

При изменении силы тока в индукторе, в материале заготовки наводятся индукционные токи. В случае однородного материала заготовки (алюминий) максимальное значение индукционных токов наблюдается по периметру заготовки и достигает значений  $3,36 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>. Распределение линий индукционного тока по внешней поверхности заготовки представлено на рисунке 9.

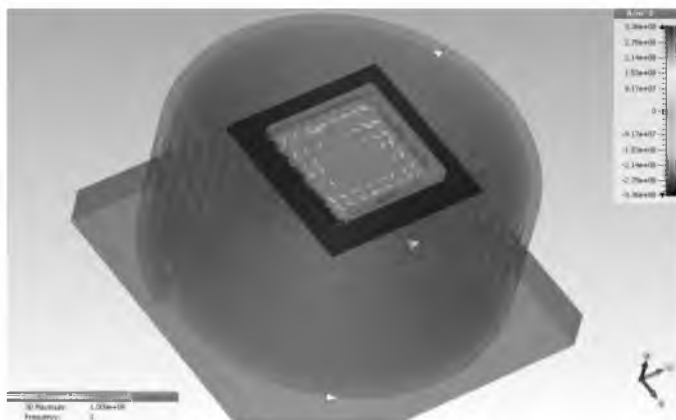


Рисунок 9 – Распределение индукционных токов на поверхности заготовки  
Распределение линий индукции магнитного поля представлено на рисунке 10, а модуля вектора индукции магнитного поля – на рисунке 11. Как видно из рисунков, максимальное значение модуля вектора индукции магнитного поля, равное 1,49 Тл достигается в области от трети до половины радиуса индуктора.

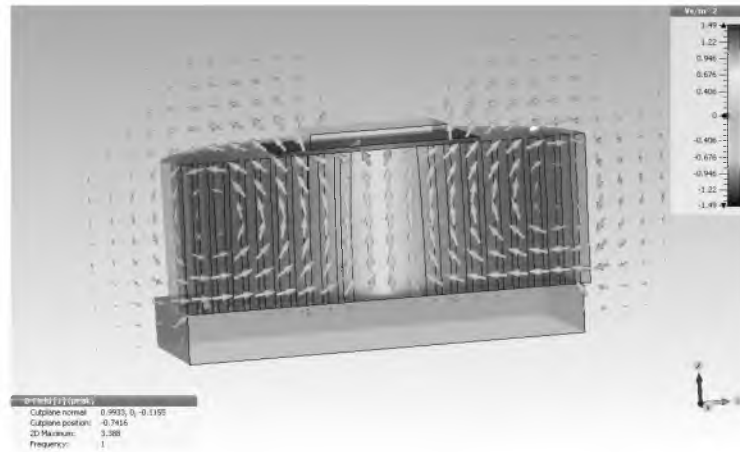


Рисунок 10 – Распределение силовых линий магнитного поля в индукторе и области обработки

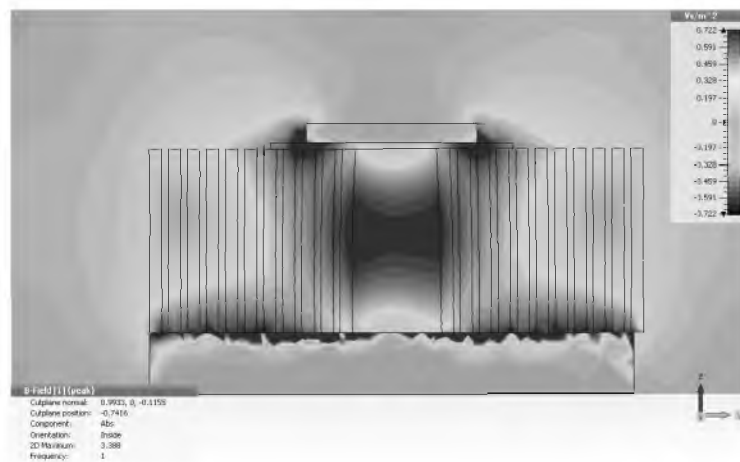


Рисунок 11 – Распределение амплитуды вектора индукции магнитного поля в плоскости YZ

Результаты расчета энергетических характеристик процесса обработки с использованием плоского индуктора следующие. Полная энергия магнитного поля:  $W_0=12,97$  кДж, энергия, выделяющаяся в заготовке:  $W_1=1,903$  кДж, энергия, выделяющаяся в элементах магнитной цепи (стальная пластина)  $W_2=8,195$  кДж, энергия, рассеянная в окружающее пространство  $W_3=2,872$  кДж, КПД процесса:  $\eta=14,67\%$ .

## 6 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 осуществлялся посредством метода конечных элементов с использованием программы FEMM.

Использование методов компьютерного моделирования позволяет подобрать необходимые параметры установки для магнитно-импульсного упрочнения соответствующие выполнению условия (2). Подбор осуществляется 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), амплитуды тока в индукторе равна 10 кА, количество витков в индукторе 10, внутренний радиус индуктора 10 см, радиус цилиндрической заготовки 9,5 см, материал изделия сталь 10, представлены на рисунке 12.

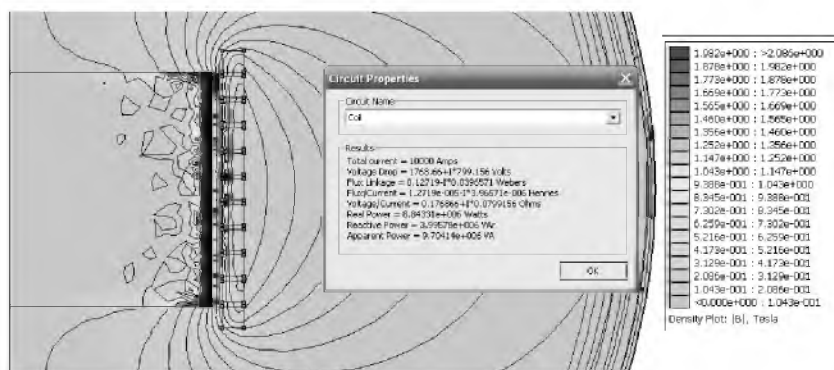


Рисунок 12 – Распределение силовых линий вектора магнитной индукции в цилиндрическом изделии из стали 10 при указанных выше параметрах

Графики 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 представлены на рисунке 13.

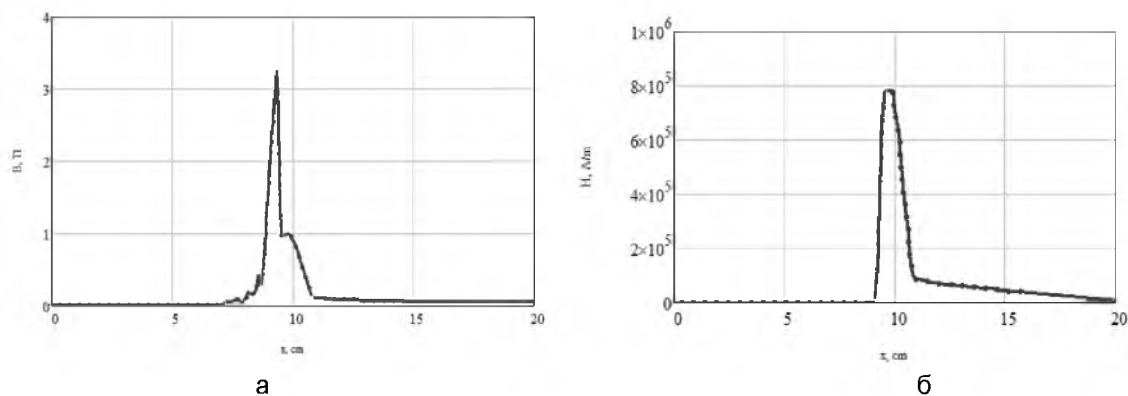


Рисунок 13 – Характер изменения модуля вектора индукции (а) и модуля вектора напряженности магнитного поля (б) в зависимости от расстояния до оси системы «индуктор-изделие»

Из рисунка 13 видно, что всплеск как модуля вектора индукции (а), так и модуля напряженности (б) происходит в пределах расстояния от оси системы «индуктор-изделие» 8–11 см, то есть в области внутренней поверхности индуктора и внешней поверхности изделия.

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

$$w(r) = 0,5 B(r)H(r) \quad (33)$$

представлена на рисунке 14.

Из рисунка 14 можно сделать вывод, что максимальное значение плотности энергии приходится на поверхности упрочняемого изделия радиусом 9,5 см, что обеспечивает максимальную степень упрочнения этой поверхности.



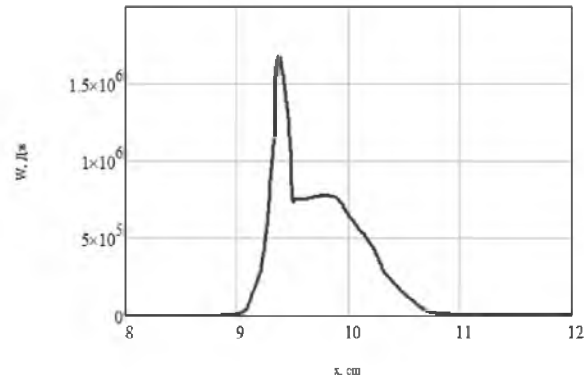


Рисунок 14 – Зависимость плотности энергии магнитного поля от расстояния до оси системы для магнитного поля, представленного на рисунке 12

Рассчитанное в рамках модели максимальное значение разности плотностей энергии на поверхности и внутри изделия равно 1,7 МПа. 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 МПа. Следовательно, при указанных выше параметрах системы давление, необходимое для упрочнения поверхности материала, не достигается, т.к.  $1,7 < 1,9$ , 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.

Уменьшение времени импульса до 0,2 мс и увеличение амплитуды тока до 50 кА, а также выбор 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 представлены на рисунках 15 и 16.

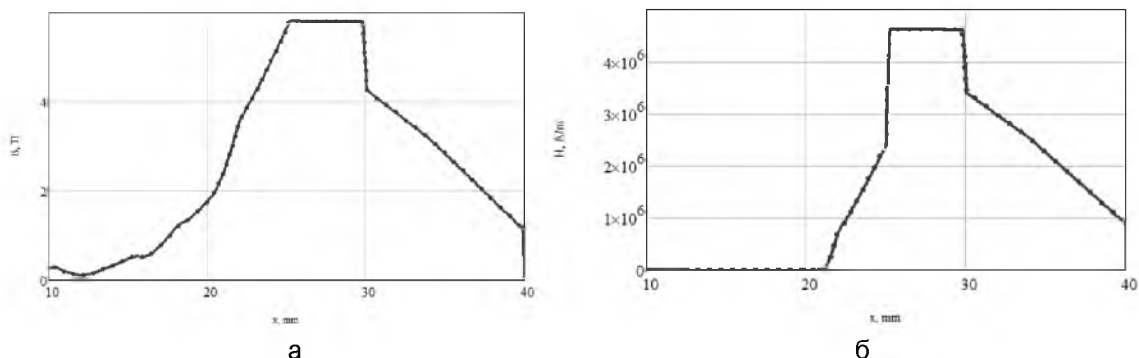


Рисунок 15 – Модуль вектора индукции (а) и модуль вектора напряженности магнитного поля (б) для индуктора диаметром 6 см изделия из стали 10 диаметром 5 см и параметрами импульса, указанными выше



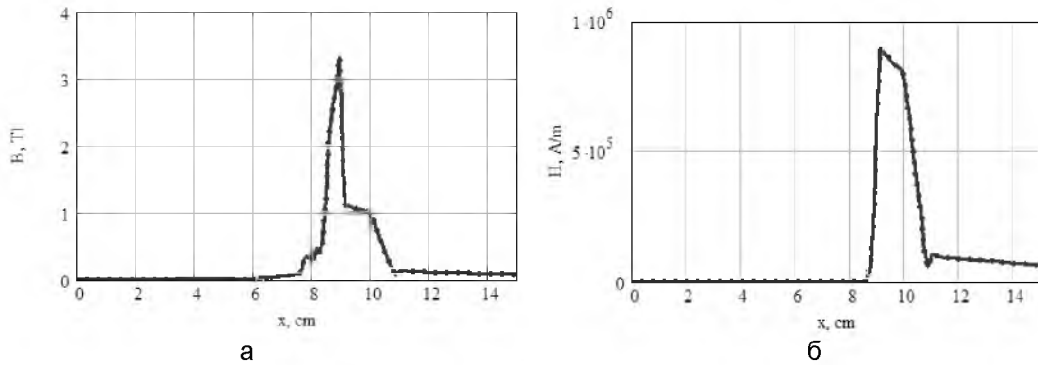


Рисунок 18 – Зависимость модуля вектора индукции (а) и напряженности магнитного поля (б) от расстояния до оси системы с параметрами, указанными на рисунке 17

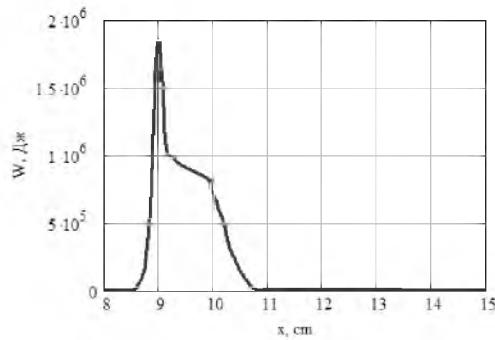


Рисунок 19 – Зависимость модуля вектора индукции магнитного поля от расстояния до оси СИСТЕМЫ

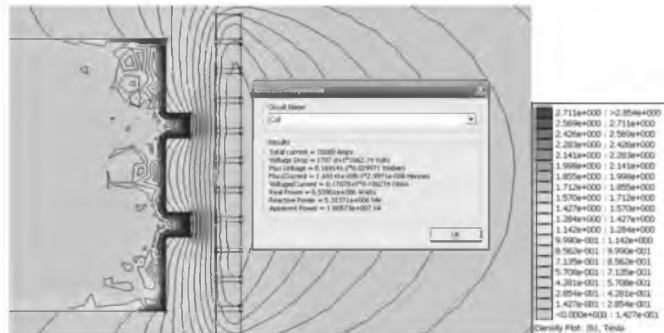


Рисунок 20 – Распределение силовых линий магнитного поля в изделии с двумя выступами на поверхности

На рисунке 21 представлены графики зависимости модуля вектора магнитной индукции (а) и модуля вектора напряженности магнитного поля (б) вдоль линии, проходящей параллельно оси симметрии системы на расстоянии 8,5 см от неё, а на рисунке 22 – зависимость плотности энергии вдоль этой линии.

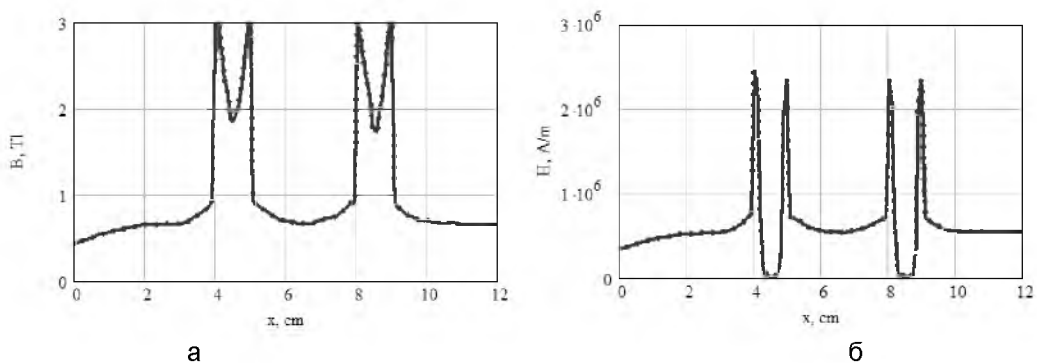


Рисунок 21 – Зависимость модуля вектора индукции (а) и напряженности магнитного поля (б) вдоль линии, проходящей параллельно оси системы, представленной на рисунке 20

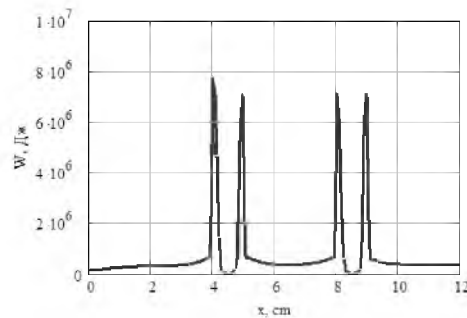


Рисунок 22 – Плотность энергии магнитного поля, представленного на рисунке 20

Для анализа влияния расстояния между поясками на упрочнение части изделия, расположенной между ними, было проведено моделирование системы, изображенной на рисунке 23, отличающейся от представленной на рисунке 20 тем, что расстояние между выступами равно 1 см и их ширина 2 см. Характеристики магнитного поля представлены на рисунках 24 и 25.



Рисунок 23 – Распределение силовых линий магнитного поля на поверхности изделия с выступами-поясками шириной 2 см, расположенными на расстоянии 1 см друг от друга

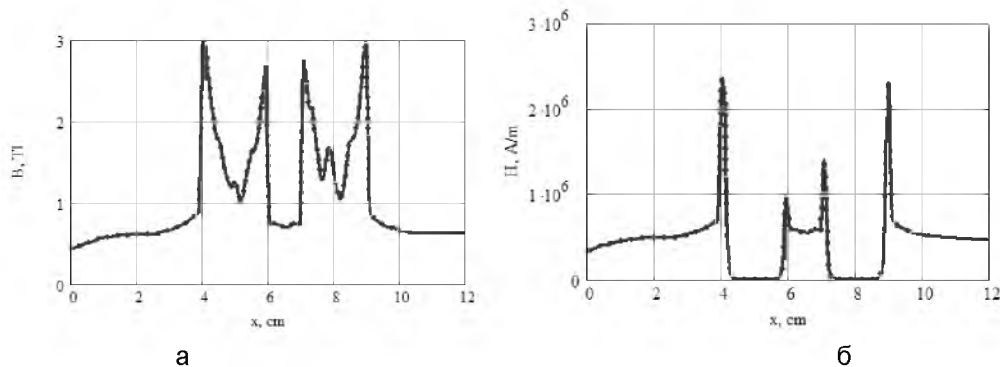


Рисунок 24 – Модуль вектора магнитной индукции (а), модуль вектора напряженности магнитного поля (б) в системе, представленной на рисунке 23, вдоль линии, проходящей на расстоянии 8,5 см от оси системы

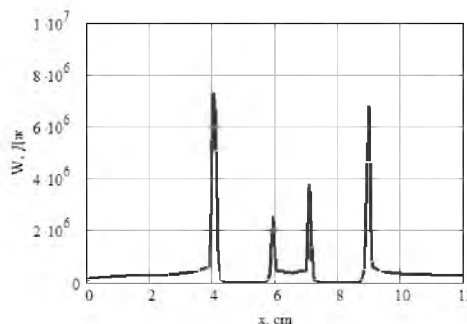


Рисунок 25 – Плотность энергии магнитного поля, представленного на рисунке 24

Анализ распределения характеристик магнитного поля вдоль линии, параллельной оси системы, в изделиях с переменным профилем поверхности указывает на то, что уменьшение расстояния между выступами от 3 см 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 рисунке 26 приведены результаты моделирования магнитно-импульсной обработки изделия переменного профиля поверхности, имеющего вид треугольных выступов с углом 60 градусов при вершине (модель метрической резьбы).

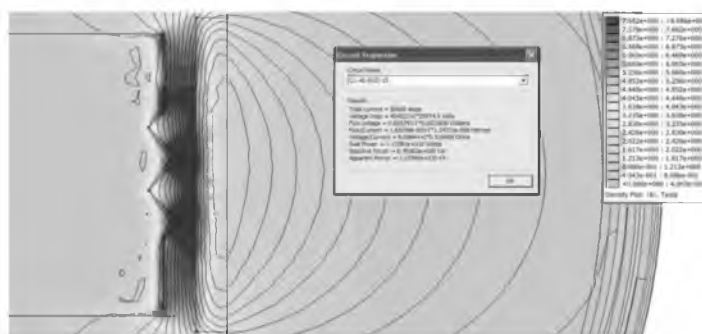


Рисунок 26 – Распределение силовых линий вектора магнитной индукции вблизи поверхности изделия с треугольными выступами

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

### 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. Но 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 магнитострикции происходит существенная деформация ферромагнитных участков, которые сдвигаются относительно областей с малым значением магнитной проницаемости. Если размеры остаточных доменов составляют порядка 10-5 м, то делатационные и сдвиговые деформации ферромагнитной области, относительно парамагнитной может составлять 10-11 м. Смещение может привести к разрыву связей между атомами на границе областей с различными магнитными свойствами и образованию межзеренной границы. Этот процесс наиболее эффективен, когда в пределах зерна существуют домены с различной намагниченностью.

Магнитострикция обладает существенной анизотропией. То есть, изменение размеров определяется ориентацией кристаллической решетки относительно направления вектора намагниченности. Вследствие этого фактора может 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. Это может привести к возникновению анизотропии материала на поверхности обрабатываемого образца.

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. Вероятность реализации упрочняющих эффектов на поверхности стального изделия из низкоуглеродистой стали возрастает при следующих параметрах: длительность импульса 0,2 мс, амплитуда силы тока в импульсе 50 кА. Увеличение количества витков индуктора приводит к увеличению эффективности процесса МИО. При обработке изделий переменного профиля, эффективному упрочнению подвергаются в основном участки, расположенные на минимальном расстоянии к индуктору. Для упрочнения удаленных от индуктора участков необходимо либо увеличивать 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 (в соответствии с расчетами по формуле (33)). Это 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).

#### Список литературы:

1. Алифанов, А. В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / Алифанов А.В., Попова Ж.А., Ционенко Н.М. // *Литье и металлургия* – 2012. -№4. - С. 28–35.
2. Кривоглаз, М. А. Садовский В.Д., Смирнов Л.В., Фокина Е.А. Закалка стали в магнитном поле. – М.: Наука, 1977. – 119 с.
3. Бернштейн, М.Л. Термоманитная обработка стали. – М.: Металлургия, 1968. – 95 с.
4. Пустовойт В.Н. Физические и технологические основы термической обработки в магнитном поле: Автореф. ... д-ра техн. наук. – Минск: ФТИ АН БССР, 1980. – 40 с.
5. Домбровский Ю.М. Структура и свойства чугунов после термической обработки в магнитном поле: Автореф. ... канд. техн. наук. – 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. – Ростов н/Д, 1978. – 28 с.
7. Корнилов Ю.А. Исследование процессов термической обработки инструмента в магнитном поле: Автореф. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 1984. – 16 с.

8. Гришин С.А. Влияние термической обработки в магнитном поле на характеристики разрушения стали: Автореф. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 1983. – 21с.
9. Сорочкина О.Ю. Структура и свойства инструментальных сталей после термической обработки в магнитном поле: Автореф. ... канд. техн. наук. – Ростов н/Д, 2005. – 24 с.
10. Бернштейн М.Л., Пустовойт В.Н. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. – М.: Машиностроение, 1987. – 255 с.
11. Малыгин, Б.В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. – М.: Машиностроение, 1998. – 130 с.
12. Алифанов, А. В. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милюкова, Н. М. Ционенко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2016. – №4. – С. 31–36.
13. Alifanov, A., Modeling of non-stationary diffusion of alloying elements on exposure of steel samples to magnetic pulses / A. Alifanov, A. Miliukova, Zh. Popova, D. Tsionenko, 15-th International Scientific Conference – «TRANSFER 2014» Alexander Dubcek University of Trencin, 23-24.10.2014, Trencin, Slovakia. – P. 10–14.
14. Импульсные методы обработки материалов / АН БССР, Физ.-техн. ин-т. – Мн.: Наука и техника, 1977. – 216 с.
15. Алифанов, А. В. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий/ А.В. Алифанов и др. // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, инструмента и технологической оснастки : материалы 10-й Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 10-13 апр. 2007. – Ч. 2. – С. 9–15.
16. Пустовойт В.Н. О влиянии магнитного поля на мартенситное превращение в чугуне // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1975. – №12.
19. Пустовойт В.Н., Русин П.И., Гришин С.А. Влияние термической обработки в магнитном поле на механические свойства углеродистых сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1982. . – №7.
20. Пустовойт В.Н. Особенности процесса образования аустенита при высокочастотном нагреве в магнитном поле// Изв.вузов. Черная металлургия. – 1983. – №4.
21. Пустовойт В.Н., Холодова С.Н. Структурные эффекты при термической обработке сталей в магнитном поле // Известия ВоГТУ. Сер.2 «Прогрессивные технологии в машиностроении». – 2003. Вып.6.
22. Пустовойт В.Н., Русин П.И., Домбровский Ю.М., Блиновский В.А. Об одной модели образования зародышей мартенсита в магнитном поле// Изв. СКНЦ ВШ. Технические науки. – 1974. – №4.