

весов. Следует отметить, что использование рычажных весов в качестве устройства, обеспечивающего перемещение под действием заданной величины нагрузки не является оптимальным и их замена более подходящим агрегатом не вызовет особых сложностей при сохранении описанного принципа измерения перемещений.

Таким образом, предложенная методика позволяет с большой точностью и малыми финансовыми затратами производить запись перемещения объекта во времени, осуществляя соответствующие измерения бесконтактно, что, устраняя помехи на трение, повышает достоверность результатов.



### **Список литературы**

1. *Баландин Г. Ф, Каширцев Л. П.* Исследование структурно-механических свойств алюминиево-кремниевых сплавов в интервале кристаллизации // Литейные свойства алюминиевых сплавов. – Киев: Наук. думка, 1968. – С. 228-240.
2. Литейные свойства металлов и сплавов // Г. Ф Баландин, Л. П Каширцев, Ю. А Степанов и др. – М.: Наука, 1967. – С 199-202.
3. *Тимофеев Г. И.* Механика сплавов при кристаллизации отливок и слитков. – М.: Металлургия, 1977. – 160 с.

Поступила 22.12.2012

УДК 669.162.275:669.14

## **Ю. В. Моисеев, А. И. Личак, В. А. Твердохвалов**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ОДНОПОЛЮСНОГО ПРОМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ ПРИ МАГНИТНОМ КОНТРОЛЕ ИХ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ**

*Показана оценка глубины проникновения магнитного потока в сталь при полюсном намагничивании металла стержневым постоянным магнитом.*

**Ключевые слова:** неразрушающий магнитный контроль, глубина промагничивания.

*Показана оцінка глибини проникнення магнітного потоку в сталь при полюсному намагнічуванню металу стрижневим постійним магнітом.*

**Ключові слова:** неруйнівний магнітний контроль, глибина промагнічування.

*Gives information about possibility to estimate the depth which magnetic flux reaches in steel when the metal is being pole magnetized with an axial magnet.*

**Keywords:** nondestructive magnetic testing, magnetization depth.

Для оценки качества отливок приходится контролировать твердость литого материала и проводить металлографический анализ его структуры. При неразрушающем экспресс-контроле этих характеристик, отражающих химический состав ферромагнитного расплава, режимы его заливки, охлаждения и термообработки, находят применение электромагнитные методы, в частности, использующие в качестве информативного параметра остаточную напряженность магнитного поля полюсно намагниченного изделия. Для того чтобы объем полюсного промагничивания, а, следовательно, и результат измерения не зависели от размеров отливки, необходимо знать глубину проникновения поля в ее тело, определяющую наименьшую необходимую толщину контролируемого материала.

Оценка этого параметра является достаточно сложной задачей. Подходы к ее решению можно найти в работах, посвященных контролю толщины поверхностного слоя, который отличается магнитными свойствами от материала изделия [1-3]. Один из таких способов контроля предполагает использовать зависимость между распределением магнитных свойств по глубине тела и поля над его поверхностью. Для выявления этой зависимости экспериментально определили (на пяти кольцевых образцах) кривые намагничивания материала (сталь марки 20ХНА3) с различным содержанием углерода (0,60; 0,46; 0,36; 0,33; 0,28 %), полученным за счет объемной цементации и закалки заготовок, а также выбора в их теле слоя для образцов. С учетом параметров этих графиков рассчитали и экспериментально определили величину магнитного потока над ферромагнитным телом, поверхностный слой которого (толщиной 1,6 мм) моделировали четырьмя прослойками равной толщины с указанным содержанием углерода и расположенными в таком же порядке его снижения от поверхности, воспринимающей подводимый магнитный поток. Сигнал, пропорциональный потоку, получали интегрированием э. д. с., наведенной в катушке, размещенной на полюсном наконечнике постоянного магнита, в процессе установки последнего на контролируемый материал или при удалении от него. Качественное совпадение результатов расчетов и экспериментов с пятислойной моделью материала позволило рассматривать магнитодинамический метод [4] пригодным для расчетов толщины упрочненного слоя, в которые как исходные данные должны быть введены параметры кривых намагничивания исследуемого сплава.

Чисто экспериментальное исследование процесса намагничивания массивных изделий одним полюсом электромагнита выполнено в работе [5]. В качестве источника поля выбрали электромагнит, на сердечнике которого разместили две обмотки – силовую (вдоль сердечника), в которой ток создавал намагничивающий поток, и измерительную (у торца, контактирующего с поверхностью изделия). Как и в предыдущем случае, магнитный поток, подводимый к поверхности изделия, оценивали интегрированием э. д. с., наведенной в измерительной обмотке. Для того чтобы таким же способом контролировать поток, вошедший в ферромагнитное тело, его представили моделью в виде пакета шлифованных дисков диаметром 134 мм и толщиной 5,5 мм, изготовленных из листового проката стали 30ХГСА. На поверхности одного из них («измерительного») в форме концентрических окружностей нарезаны канавки v-образного профиля глубиной 0,25 мм и шириной 0,5 мм. В канавки уложены одновитковые катушки, диаметры которых относились к диаметру сердечника как 0,5; 1,0; 2,0 и 3,0. Сопоставляя э. д. с., наведенные в катушках разного диаметра, определяли (по разности сигналов соседних катушек) рассеяние магнитного потока в радиальном направлении, а удаляя «измерительный» диск (перестановкой его в пакете) от плоскости контакта изделия с сердечником электромагнита, контролировали изменение намагниченности по глубине. Данный способ контроля предусматривает получение первичной информации об индукции в материале во время воздействия на него переменного магнитного поля. Это позволило применить индуктивные преобразователи, уместившиеся в стыке между дисками фактически без нарушения сплошности ферромагнитной среды.

Однако такой возможности нет, когда объектом исследования является постоянное магнитное поле (например, созданное остаточной локальной намагниченностью изделия), а для контроля его параметров используют неподвижные первичные преобразователи (датчики Холла, магниторезисторы). Размещение их в теле образца существенно исказило бы его внутреннее поле и ограничило измерение индукции местом фиксирования датчика. Поэтому в данной работе «проникновение» преобразователя Холла внутрь ферромагнитного тела моделировали снятием послойных магнитных топограмм поля на поверхностях намагниченных образцов, в качестве которых использовали пакеты шлифованных стальных дисков диаметром 40 (сталь 40Х) и 50 мм (сталь 40), имевших толщину 1,5 и 7,5 мм. Полюсное намагничивание в центре дисков выполняли источником постоянного поля в виде пакета плоских магнитов из материала с редкоземельным металлом (Nd-Fe-B). Остаточная индукция на плоской поверхности магнитов была в пределах 1,23-1,28 Тл, а коэрцитивная сила их материала составляла 971-977 (по индукции) и 995 кА/м (по намагниченности). Контролируемым параметром, связанным с магнитным состоянием образца, приняли нормальную составляющую  $H_z^N$  напряженности у его поверхности. В качестве чувствительного элемента использовали преобразователь Холла, встроенный в микросхему AD22151 с линейным усилителем, стабилизированным в диапазоне температур от -40 до +150 °С. Внешние электрические цепи, необходимые для функционирования микросхемы, содержали прецизионные резисторы и конденсаторы, а стабильность работы устройства в целом контролировали с помощью универсального тесламетра 43205. Топограммы напряженности поля снимали с помощью специально разработанного устройства [6], позволившего контролировать этот параметр при одновременной автоматической регистрации двух сигналов, пропорциональных напряженности поля и перемещению датчика вдоль поверхности образца.

В ферромагнитном теле, составленном из плоских шлифованных пластин (дисков), по сравнению со сплошной средой

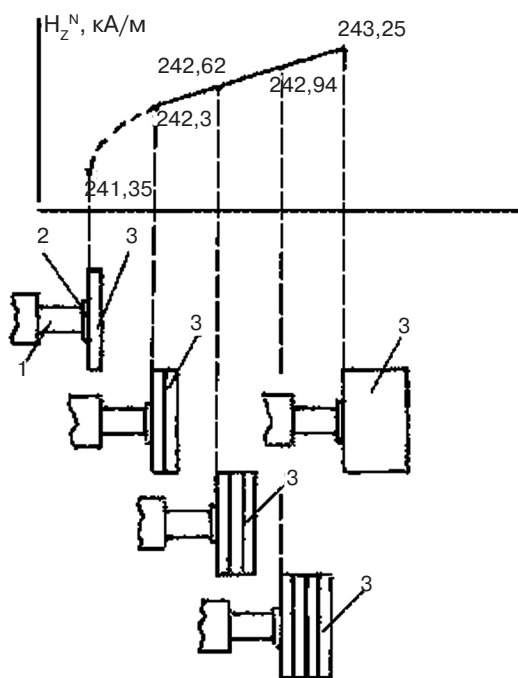


Рис. 1. Напряженность намагничивающего поля в зазоре между торцами концентратора потока и образца: 1 – концентратор потока; 2 – щуп с преобразователем Холла; 3 – образец

изменяются прохождение потока и распределение внутреннего поля. Для того чтобы оценить эти изменения, контролировали нормальную составляющую напряженности поля как у плоскости намагничивания образца ( $H_z^N$ ), так и у его противоположного торца ( $H^N$ ), сопоставляя эти параметры для сплошной и разделенной на слои среды при различном количестве дисков и порядке их расположения в пакете. Подводимое к образцу намагничивающее поле ( $H_z^N$ ) определяли в 3-миллиметровом зазоре между концентратором потока и плоскостью образца. На рис. 1 приведены результаты измерения величины  $H_z^N$  при различной толщине ферромагнитной среды. Они позволили сделать вывод о том, что увеличение в образце количества слоев, разделенных стыками шлифованных плоскостей, и переход к сплошному телу практически не повлияли на магнитный поток, входящий в металл, поскольку напряженность поля

в зазоре у намагничиваемой поверхности изменилась лишь на 0,8 %. Указанные на графике значения напряженности  $H_z^N$  зафиксированы в точке осевой симметрии. На рис. 2 приведены топограммы радиального распределения поля ( $H^N$ ) у поверхности выхода потока, намагничивающего образцы различной толщины, схематично обозначенные в виде одного, двух, трех и четырех тонких (1,5 мм) дисков, собранных в пакеты, и одного диска толщиной 7,5 мм. График показывает, что по оси намагничивающего потока экранирующий эффект ферромагнитной среды (в данном случае – это сталь 40X) резко возрастает при увеличении ее толщины

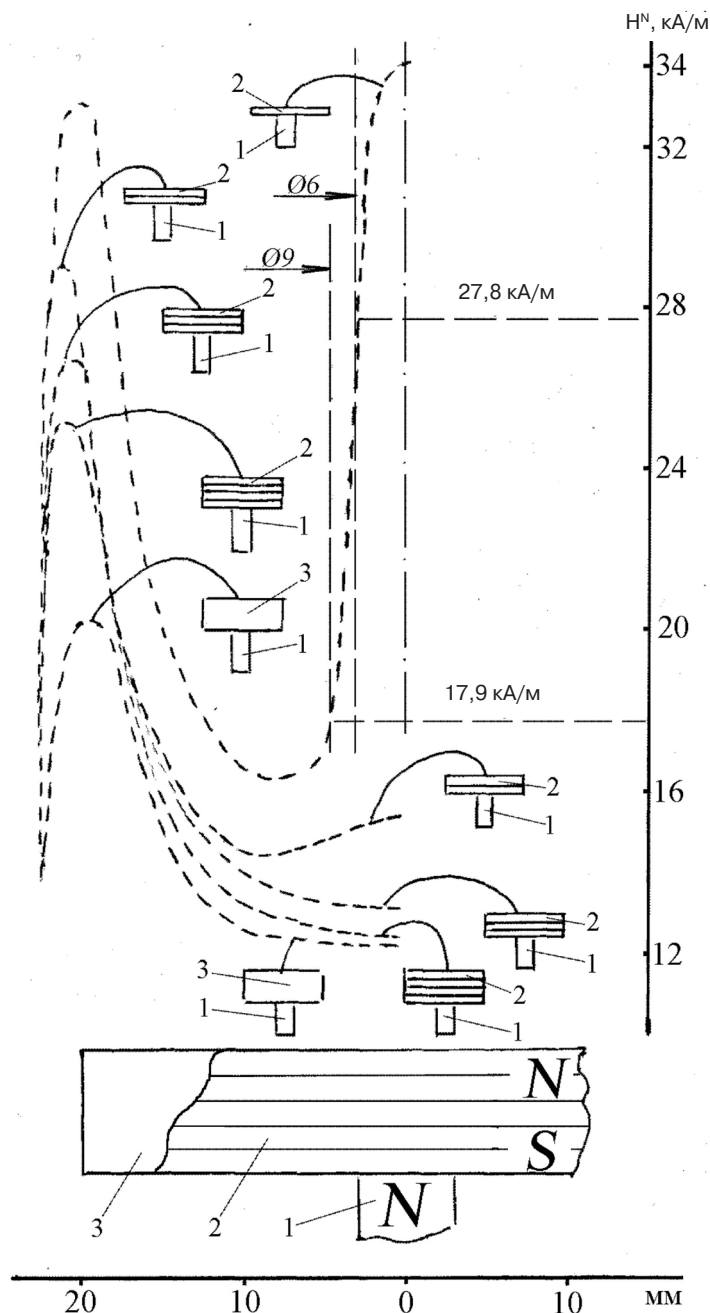


Рис. 2. Радиальное распределение нормальной составляющей  $H^N$  напряженности с полем постоянного магнита: 1 – концентратор потока; 2 – тонкие образцы; 3 – образец толщиной 7,5 мм

до 3-4 мм, что существенно изменяет условия прохождения потока на большую глубину. Количественно оценить распределение поля по глубине металлического тела, намагничиваемого постоянным магнитом, можно по графикам  $H^N(x)$ , представляющим собой зависимость напряженности  $H^N$  поля у поверхности образцов от их толщины  $x$  (рис. 3). Ординаты точек графика А (сталь 40Х), пропорциональные напряженности по оси потока, измеряли по мере наращивания количества дисков различной толщины. Установили, что изменение порядка их расположения в пакете практически не нарушает однозначного соотношения между  $H^N$  и  $x$ . Учитывая, что напряженность  $H_z^N$  поля у поверхности входа намагничивающего потока в сплошное тело и в пакет шлифованных дисков практически одна и та же (разница составляет 0,8 %), а у поверхности выхода потока разница в напряженности  $H^N$  (без пересчета на равную толщину слоя) не превышает 5,5 %, можно сделать вывод о достаточно близком сходстве распределения постоянного магнитного поля в однородной металлической среде и ее многослойном «эквиваленте». Как видно по экспериментальным точкам графика А, при  $x \geq 6$  мм его линия мало отличается от прямой с

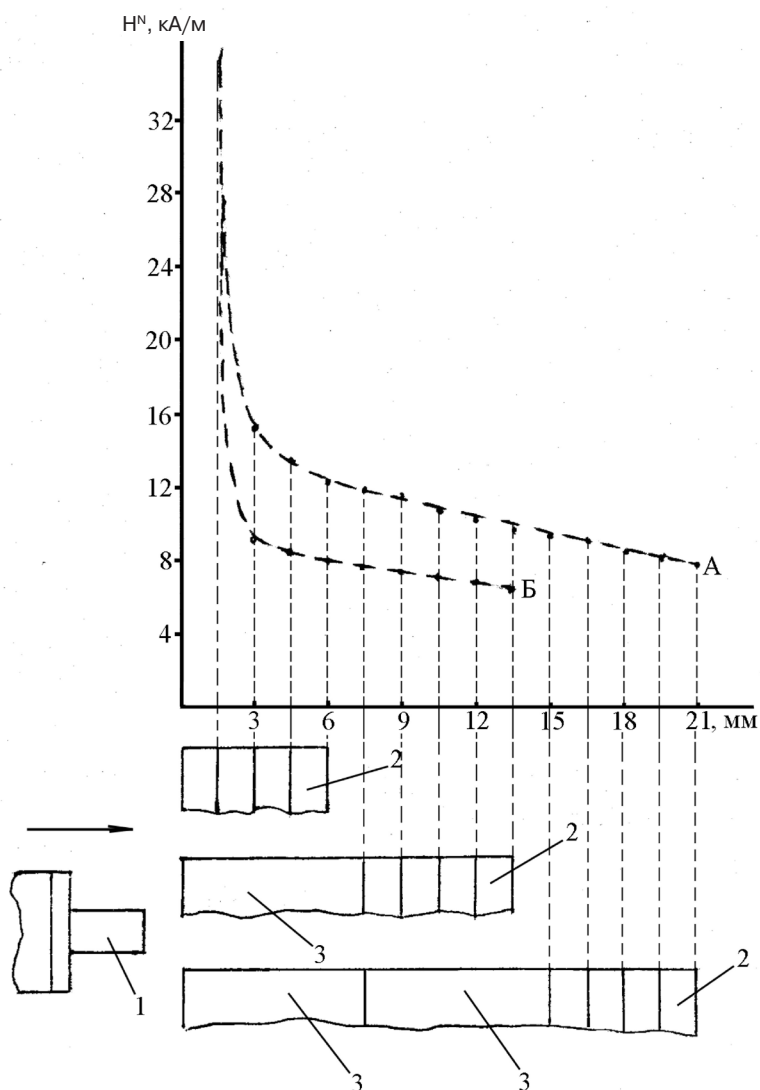


Рис. 3. Зависимость напряженности  $H^N$  поля в центре торцевой поверхности составных образцов из стали марок 40Х (график А) и 40 (график Б) от их длины при контакте с полюсом постоянного магнита

отрицательным наклоном – 0,35 мТл/мм, что составляет лишь 0,1 % величины  $H_z^N$  у поверхности, принимающей магнитный поток. В начале линейного участка (при  $x = 6$  мм) намагниченность металла уменьшена до 5 % значения  $H_z^N$ , то есть основное поле, индуцированное в образце внешним потоком и действующее по его оси, локализовано в поверхностных слоях тела, уменьшаясь на глубине их нижних границ 1,5; 3,0; 4,5 и 6,0 мм соответственно до 14,3; 6,7; 5,5 и 5 % исходной напряженности  $H_z^N$  в зазоре между образцом и концентратором потока. Такой же вид имеет зависимость  $H^N(x)$  и для образцов из стали 40 (график Б). На их торце напряженность  $H_z^N$  намагничивающего поля во всех контролируемых точках, указанных на рис. 1, полностью совпадает с данными по стали 40Х, относительные значения  $H^N / H_z^N$  составили соответственно 7,9; 3,7; 3,5 и 3,2 %, а на большей глубине их экспериментальные точки практически укладываются в прямую линию с наклоном -0,24 мТл/мм. Границы области перегиба обоих графиков совпадают при  $x = 6$  мм, то есть основная составляющая намагниченности образца по оси подводимого постоянного магнитного потока сосредоточена в поверхностном слое, толщина которого близка к диаметру цилиндрического концентратора поля.

Известно [7], что при переходе магнитного потока через поверхность раздела двух изотропных сред с разными магнитными свойствами углы  $\alpha_1$  падения (в подводящей среде с проницаемостью  $\mu_1$ ) и  $\alpha_2$  преломления (в принимающей среде с проницаемостью  $\mu_2$ ) связаны соотношением  $\operatorname{tg} \alpha_2 = \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \mu_2 / \mu_1$  (углы отсчитывают от нормали к поверхности раздела). Поэтому направление потока не изменяется только в том случае, когда оно перпендикулярно плоскости раздела ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ ). Если подводящей средой является ферромагнитное тело ( $\mu_1 = 1000$ ), а принимающей средой – воздух ( $\mu_2 = 1$ ), то даже при значительном отклонении от нормали ( $\alpha_1 = 86^\circ$ ) потока у границы раздела поток на выходе из ферромагнетика в воздух практически всегда нормален к его поверхности ( $\alpha_2 = 1^\circ$ ). Поскольку указанное соотношение углов не зависит от направления силовых линий поля, поток, вошедший в ферромагнитное тело из воздуха под углом  $\alpha_2 = 1^\circ$ , отклоняется от нормали на угол  $\alpha_1 = 86^\circ$ , локализуясь в поверхностном слое ферромагнетика. Таким образом, та часть магнитного потока, которая подходит к слою ферромагнетика, заключенному между воздушными зазорами, с отклонением от нормали к плоскости раздела, на каждом стыке два раза изменяет свое направление и, рассеиваясь в ферромагнитной среде, уменьшает как нормальную составляющую потока, проходящего в следующий слой, так и периферийной намагниченностью. Эти изменения оценивали сопоставлением диаметров окружностей, обозначающих уровень (произвольно принятый для контроля) напряженности  $H_o^N$  поля у шлифованных поверхностей диска со стороны подвода потока (рис. 1) и на его выходе в следующий слой (рис. 2). Так, на глубине одного диска по границе, повторяющей окружность торца концентратора потока (диаметром 6 мм), нормальная составляющая  $H_o^N$  напряженности уменьшена на 77 % (до 27,8 кА/м), на глубине двух дисков – на 87,5 % (до 15 кА/м). Начиная с глубины 4,5 мм, где ее уровень снижен до 10,8 %  $H_z^N$  (13 кА/м), зафиксировано равномерное распределение  $H^N$  в центральной части диска на площади, которая примерно в 5 раз превышает площадь торца концентратора и ограничена зоной краевого эффекта. На рис. 4 приведены топограммы напряженности поля на входе потока в образец толщиной 1,5 мм через воздушный зазор величиной 3,0 мм (график а) и напряженности поля, действующей на обратной стороне образца при его контакте с концентратором потока (график б, совпадающий с топограммой, отнесенной к одному диску на рис. 2). По границе зоны диаметром 6 мм на глубине 1,5 мм зафиксирована напряженность  $H_o^N = 27,8$  кА/м, которой в зазоре соответствует граница диаметром 27 мм. Этой величиной можно оценить наименьший размер зоны с указанным уровнем намагниченности, поскольку она рас-

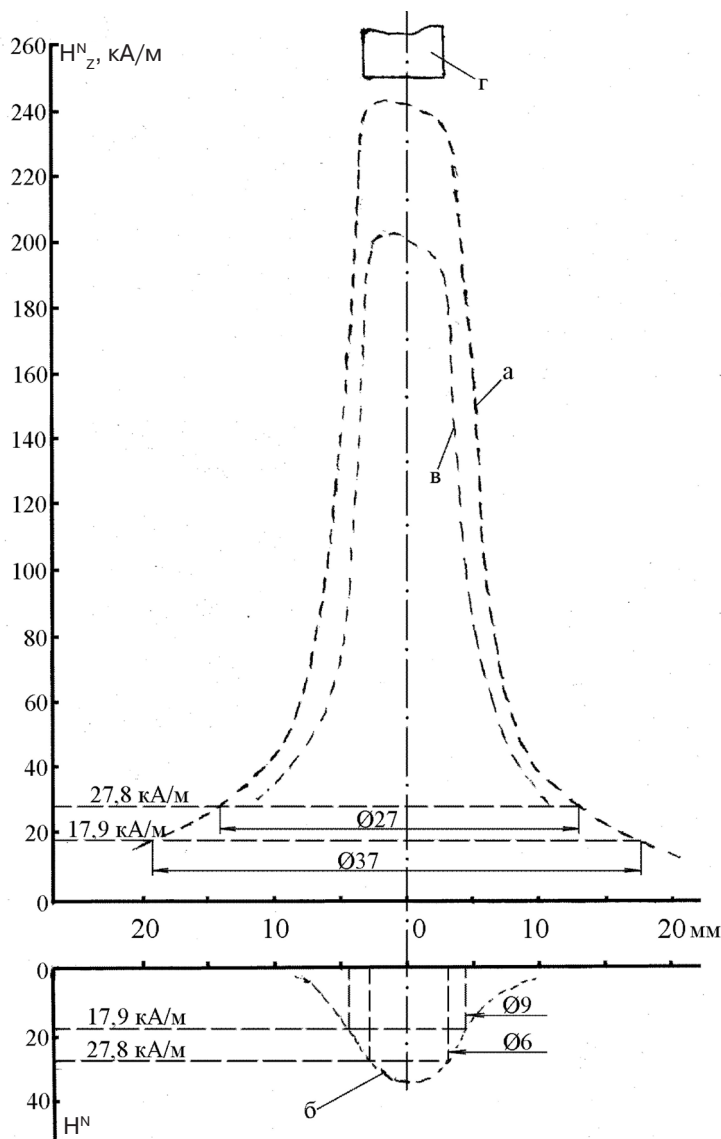


Рис. 4. Топограммы напряженности  $H_z^N$  поля на входе потока в образец толщиной 1,5 мм через воздушный зазор 3,0 мм (а) и на обратной стороне образца (б); значение  $H_z^N$  при зазоре 3,9 мм (в); концентратор потока диаметром 6 мм (г)

ширится с приближением концентратора к образцу. О влиянии расстояния между ними на напряженность можно судить по изменению ее топограммы (рис. 4) при увеличении зазора с 3,0 (график а) до 3,9 мм (график в). Следовательно, область промагничивания в слое толщиной 1,5 мм можно рассматривать в виде объема, ограниченного поверхностью усеченного конуса, у которого основания лежат в плоскостях диска, а их диаметры определяются как напряженностью в полюсе, так и ее уровнем, принятым для границы зоны. Например, снизив его до  $H_0^N = 17,9$  кА/м, на глубине 1,5 мм получим границу диаметром 9 мм, а в зазоре между концентратором и верхней плоскостью диска – не менее 37 мм. Таким образом, результаты экспериментального исследования нормальной составляющей  $H^N$  напряженности поля образцов стали марок 40Х и 40, намагничиваемых полюсом постоянного магнита, позволяют рассматривать послойную топографию пригодной для оценки глубины промагничивания железоуглеродистых сплавов.



## Список литературы

1. Горкунов Э. С. Магнитные методы и приборы для контроля качества поверхностного упрочнения стальных ферромагнитных изделий: Обзор // Дефектоскопия. – 1991. – № 1. – С. 3-23.
2. Федорищева Э. Э., Табачник В. П., Чернова Г. С. Остаточное магнитное поле изделий разной толщины, намагниченных стержневым электромагнитом // Там же. – 1991. – № 1. – С. 23-32.
3. Магнитный метод контроля слоистых структур / А. А. Лухвич, А. К. Шукевич, Н.В. Кремьенкова и др. // Там же. – 2006. – № 8. – С. 24-33.
4. Магнитный метод контроля распределения свойств по глубине / А. А. Лухвич, А. К. Шукевич, И. М. Морозов // Там же. – 2003. – № 9. – С. 22-27.
5. Намагничивание массивных изделий одним полюсом электромагнита / В. П. Табачик, Л. А. Фридман, Г. С. Чернова и др. // Там же. – 1978. – № 6. – С. 72-77.
6. Моисеев Ю. В., Личак А. И., Твердохвалов В. А. Концентрация намагничивающего потока при неразрушающем контроле сталей и чугунов по методу «точечного полюса» // Процессы литья. – 2010. – № 6. – С. 40-44.
7. Нестеренко А. Д. Введение в теоретическую электротехнику. – Киев: Наук. думка. – 1969. – 352 с.

Поступила 19.01.2012

### **Вниманию авторов!**

*Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи – не более **10 стр.**, рисунков – не более **5**.*

*Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителе. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.*

*Статьи в редакции проходят научное рецензирование.*