

Неразрушающий Контроль и Диагностика



Электронная версия журнала
<http://science.by/nauka/13/>

№ 1 2013

Главный редактор

Мигун Николай Петрович

Редакционная коллегия:

Аскирко С.Д.

Боровский В.В.

Венгринович В.Л.

Войцехович Л.Н.

Высоцкий М.С.

Горбаш В.Г.

Жагора Н.А.

Зуйков И.Е.

Ивлев С.А.

Кулагин В.Н.

Лухвич А.А.

Матюк В.Ф.

Мелешко А.Л.

Пантелеенко Ф.И.

Попоудина С.А.

Рудницкий В.А.

Сергеев С.С.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА

№ 1, 2013

Научно-практический журнал

Электронная версия журнала
на сайте *science.by (наука.of.by)*

Учредители

Белорусская ассоциация
неразрушающего контроля
и технической диагностики,
*республиканское общественное
объединение*

Институт прикладной физики
НАН Беларуси,
государственное научное учреждение

«Диатех»,
*республиканское научно-производственное
унитарное предприятие*

*Министерство информации Республики Беларусь 4 ноября 2011 г.
зарегистрировало журнал «Неразрушающий контроль и диагностика»
в Государственном реестре средств массовой информации за № 1488.*

*Журнал входит в «Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований».*

*Журнал НКД зарегистрирован в международном каталоге научных
журналов со свободным доступом к полным текстам.
DOAJ (Directory of Open Access Journals, <http://www.doaj.org>).*

Неразрушающий контроль и диагностика
(Электронная версия журнала: <http://science.by/nauka/13/>)

Научно-практический журнал

Издатели

*Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси»*

*Республиканское научно-производственное унитарное предприятие
«Диатех»*

Адрес редакции:
220072 г. Минск, ул. Академическая, 16, к. 314.
Тел.: +375 17 284 0686,
факс: +375 17 284 1740,
e-mail: diatech@tut.by
URL <http://science.by/nauka/13/>

Подписной индекс (ведомственная подписка) 00844

Подписано в печать 28.03.2013.
Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Cambria.
Усл. печ. л. 7,09.
Тираж 100 экз.

Печать цифровая.
Государственное предприятие «Диатех»,
220072 г. Минск, ул. Академическая, 16.

Тексты публикуются в авторской версии без редакционных изменений.

ISSN 2224-1752 (печатная версия журнала).
EISSN 2224-5502 (электронная версия журнала).

© Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси», 2012

© Республиканское научно-производственное
унитарное предприятие «Диатех», 2012

**ПРИБОРЫ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ
НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО
ИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ**
*Instruments of magnetic structurescopy based on the local
cyclic pulse magnetization*

Матюк В.Ф.
Matyuk V.F.

Описан принцип работы, устройство, назначение и технические характеристики приборов, реализующих импульсный метод магнитной структуроскопии с использованием локального циклического перемагничивания. Рассмотрены особенности построения и работы приборов типа КИМ-1 и ИМА-М. Показаны возможности и ограничения импульсного многопараметрового контроля.

The principle of operation, the structure, the purpose and technical characteristics of instruments implementing the pulsed method of magnetic structurescopy using local cyclic magnetization are given. The design and operation features of KIM-1 and IMA-M type instruments are discussed. The capabilities and limitations of pulse multiparametric testing are shown.

Введение

Приборы, измеряющие градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после локального импульсного однополярного намагничивания или после локального импульсного намагничивания и частичного размагничивания, позволяют решить широкий круг задач магнитной структуроскопии: контроль качества термообработки, механических свойств и структуры изделий из низкоуглеродистых и слаболегированных сталей толщиной от 0,15 до 30 мм после технологического отжига; контроль структурного состояния изделий машиностроения из конструкционных среднеуглеродистых марок сталей, подвергнутых низкотемпературному, среднетемпературному или высокотемпературному отпуску после закалки; сортировка сталей по маркам и контроль уровня остаточной намагниченности изделий [1–3].

Однако, если структурные изменения металла в процессе технологической обработки таковы, что одно из таких изменений сопровождается рядом сопутствующих, однопараметровый контроль становится не-

возможным или неэффективным [4]. В ряде случаев данная задача решается измерением нескольких магнитных параметров.

Многопараметровые методы должны использовать минимальное для обеспечения достоверности контроля количество легко измеряемых магнитных параметров. При этом целесообразно, чтобы между используемыми параметрами отсутствовала корреляционная связь, либо она была минимальной [5, 6].

Двухпараметровый контроль по сумме градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных после намагничивания и после частичного размагничивания изделия импульсом, полностью размагничивающим изделие, отпущенное при минимально возможной температуре, реализованный в приборах ИМА-6, не только устраняет неоднозначность, но и повышает чувствительность контроля качества закалки и отпуска изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей [3].

Усложнение задач магнитной структуроскопии, например контроль неоднородности структуры металла по глубине, требует использования новых параметров, несущих информацию об изменении магнитного состояния металла на разных стадиях намагничивания и перемагничивания изделия.

В качестве таких информативных параметров могут быть использованы характерные точки на кривых изменения напряженности поля остаточной намагниченности H_r и ее градиента ∇H_r при локальном циклическом намагничивании и перемагничивании изделия сериями импульсов магнитного поля с изменяющейся амплитудой и полярностью [7].

ПОВЕДЕНИЕ ПОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ И ЕГО ГРАДИЕНТА ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ ИМПУЛЬСНОМ НАМАГНИЧЕНИИ И ПЕРЕМАГНИЧЕНИИ

Важной характеристикой ферромагнитных материалов является петля магнитного гистерезиса, представляющая собой зависимость намагниченности M или магнитной индукции B от напряженности внешнего магнитного поля H , изменяющегося по циклу $+H_m, 0, -H_m, 0, +H_m$ (рис. 1, а). В случае, когда величина H_m достаточно велика ($H_m = H_s$), дальнейшее увеличение внешнего магнитного поля не меняет формы петли и петля называется предельной. При $H_m < H_s$ петли называются частными и располагаются внутри предельной [8].

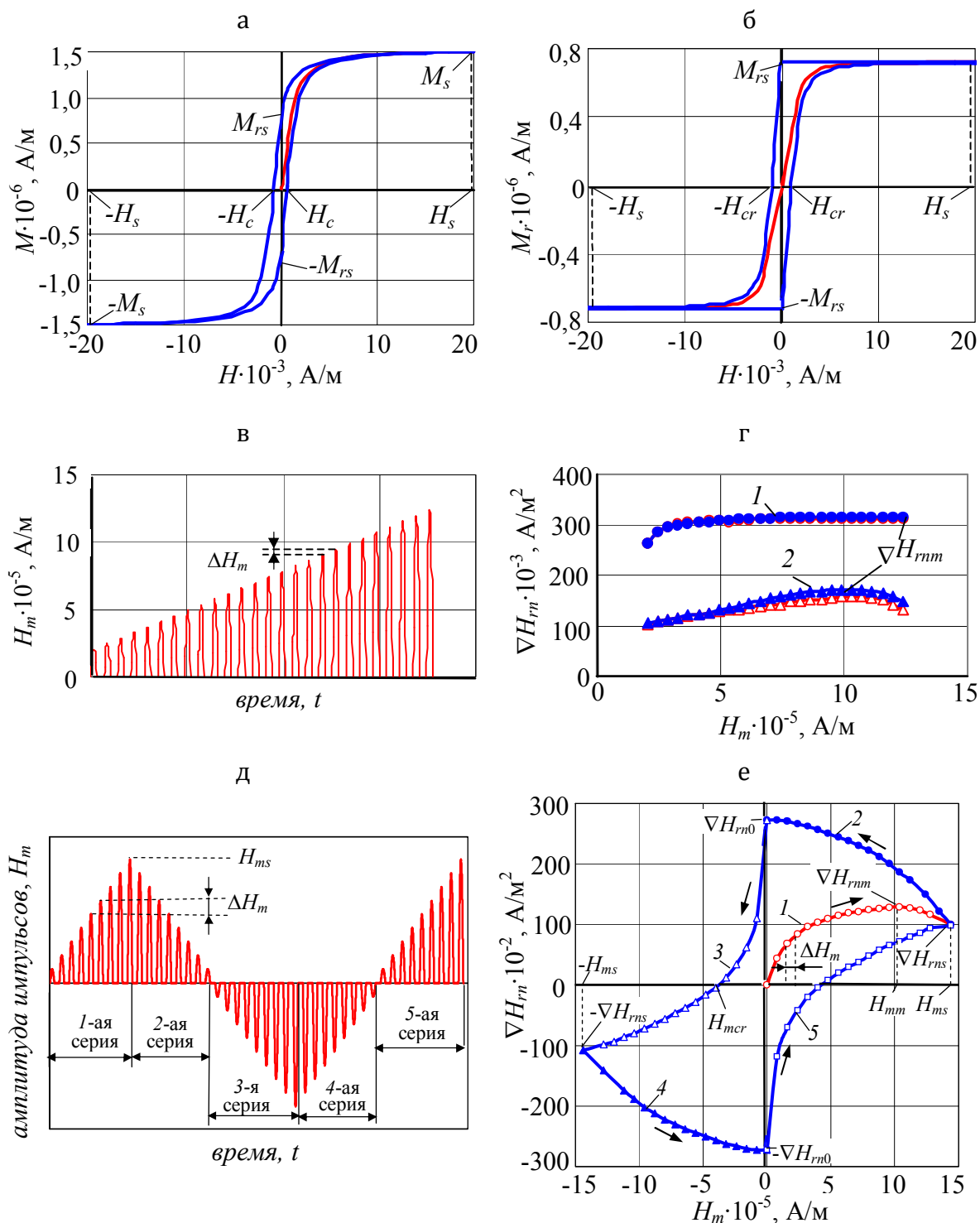
Основными характеристиками предельной петли магнитного гистерезиса являются намагниченность M_s (магнитная индукция B_s) насыщения, остаточная намагниченность M_r (остаточная магнитная индукция B_r) и коэрцитивная сила H_c .

Циклическое перемагничивание ферромагнетика сопровождается также и гистерезисом остаточной намагниченности, но петля гистерезиса по остаточной намагниченности несколько отличается от петли магнитного гистерезиса по намагниченности [9].

При циклическом перемагничивании ферромагнетика однородным полем в замкнутой магнитной цепи его остаточная намагниченность M_r возрастает с увеличением максимальной амплитуды цикла и стремится к остаточной намагниченности M_{rs} по предельной петле гистерезиса. Основное отличие петли гистерезиса по остаточной намагниченности состоит в том, что после достижения своего максимального значения M_{rs} последующее уменьшение напряженности внешнего магнитного поля от H_s до нуля не изменяет величину остаточной намагниченности $M_r = M_{rs}$ (рис. 1, б). С изменением полярности внешнего магнитного поля и ростом его абсолютной величины до H_{cr} (релаксационная коэрцитивная сила) величина M_r уменьшается от M_{rs} до нуля. Дальнейшее увеличение H в данной полярности приводит к изменению полярности M_r и достижения ею величины $-M_{rs}$ (при $H = -H_s$). Уменьшение по абсолютной величине H от $-H_s$ до нуля также не изменяет значение остаточной намагниченности $M_r = -M_{rs}$. Возрастание внешнего поля от нуля в первоначальном направлении вызывает уменьшение абсолютных значений M_r до нуля (при $H = H_{cr}$), смену полярности и рост до M_{rs} (при $H = H_s$).

В отличие от циклического изменения статических намагничивающих полей, импульсное локальное намагничивание приводит к аномальным закономерностям изменения остаточной намагниченности и создаваемой этой намагниченностью поля (поля остаточной намагниченности).

Во-первых, при импульсном намагничивании наблюдается аномальное поведение остаточной намагниченности от кривой намагничивания. Так, при локальном однополярном намагничивании ферромагнитного образца серией возрастающих по амплитуде импульсов с шагом ΔH_m (рис. 1, в) наблюдается неоднозначная зависимость величины нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности H_m и ее градиента ∇H_m с ростом амплитуды импульсов H_m – после достижения максимума ∇H_{rnm} величина градиента ∇H_m уменьшается с дальнейшим ростом амплитуды импульсов [10]. Данная закономерность, проявляющаяся на толстых образцах при достаточной скорости нарастания намагничивающего импульса (рис. 1, г), связывалась с усилением размагничивающего действия поля вихревых токов из-за увеличения крутизны фронтов импульсов с ростом их амплитуды [11]. В то же время с ростом однородного статического магнитного поля имеет место стабилизация величины поля остаточной намагниченности образца.



Сталь 45, состояние поставки; а, б – циклическое знакопеременное статическое перемагничивание
 в, г – импульсное однополярное намагничивание; (○, △ – размагничивание после каждого импульса
 ●, ▲ – без размагничивания, толщина образца: 1 – 2 мм, 2 – 20 мм);
 д, е – перемагничивание сериями импульсов, изменяющихся по амплитуде и по знаку;

Рис. 1. Циклы намагничивания и изменения намагниченности, остаточной намагниченности и градиента напряженности поля остаточной намагниченности

Аналогичным образом ведет себя и напряженность H_{rn} нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности.

Во-вторых, при импульсном намагничивании наблюдается аномальное возрастание нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности H_{rn} и ее градиента ∇H_{rn} в центре локально намагниченного участка с последующим уменьшением амплитуды импульсов от импульса к импульсу с шагом ΔH_m при сохранении их полярности. При статическом намагничивании в однородном магнитном поле его уменьшение не изменяет величины напряженности поля остаточной намагниченности.

Наиболее наглядно аномальное поведение остаточной намагниченности и создаваемого ею магнитного поля проявляется при локальном намагничивании образца несколькими сериями импульсов, изменяющимися по амплитуде и по знаку [12].

Так, петля гистерезиса градиента ∇H_{rn} нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности замыкается при воздействии на изделие пятью сериями импульсов магнитного поля, амплитуда H_m которых изменятся с шагом ΔH_m , причем по абсолютной величине амплитуда импульсов в 1-й, 3-й и 5-й сериях увеличивается от нуля до H_{ms} , а во 2-й и 4-й – уменьшается от H_{ms} до нуля, в 1-й, 2-й и 5-й сериях импульсы магнитного поля имеют одну полярность, а в 3-й и 4-й – противоположную (рис. 1, д). Изменение градиента ∇H_{rn} после окончания каждого из импульсов представлено на рис. 1, е.

При локальном намагничивании предварительно размагниченного изделия импульсами возрастающей амплитуды (1-ая серия импульсов) градиент ∇H_{rn} (кривая 1 на рис. 1, е), измеренный в центре намагниченного участка, сначала увеличивается от импульса к импульсу, достигает максимума ∇H_{rnm} при $H_m = H_{mm}$, а затем уменьшается до ∇H_{rns} при $H_m = H_{ms}$, то есть наблюдается неоднозначная зависимость измеряемого градиента от амплитуды намагничивающих импульсов. Аналогичным образом ведет себя и напряженность H_{rn} нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности.

Воздействие на намагниченный участок изделия, сохраняющий после намагничивания 1-ой серией остаточное магнитное поле с градиентом ∇H_{rns} , импульсов с убывающей от импульса к импульсу амплитудой увеличивает величину ∇H_{rn} (кривая 2 на рис. 1, е). При этом максимальное значение ∇H_{rn0} (H_{rn0}) наблюдается при амплитуде намагничивающих импульсов $H_m = \Delta H_m$.

Последующее изменение полярности импульсов и увеличение их амплитуды приводит сначала к уменьшению величины ∇H_{rn} до нуля, а затем к его росту в противоположной полярности до величины $-\nabla H_{rns}$

(кривая 3 на рис. 1, е). Амплитуду импульсов H_{mcr} , при которой достигается нулевое значение нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности или ее градиента, будем называть релаксационной коэрцитивной силой в импульсном режиме перемагничивания.

При уменьшении амплитуды импульсов данной полярности до значения, близкого к нулю, градиент ∇H_{rn} возрастает по абсолютной величине и стремится к $-\nabla H_{rn0}$ (кривая 4 на рис. 1, е). Дальнейшее воздействие на намагниченный участок импульсами первоначальной полярности с увеличивающейся амплитудой приводит к замыканию петли гистерезиса градиента ∇H_{rn} по кривой 5 (рис. 1, е). Закономерности изменения нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности H_{rn} аналогичны. Подобным образом ведут себя и все частные петли гистерезиса нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности и ее градиента.

В [7] показано, что причиной аномального вида петли гистерезиса нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности и ее градиента при локальном намагничивании изделия импульсным магнитным полем, изменяющимся по амплитуде и по направлению, является разная полярность намагничивания поверхностного и более глубоких слоев изделия. Разную полярность намагничивания этих слоев авторы объясняли влиянием поля вихревых токов, возникающих в процессе действия импульса магнитного поля.

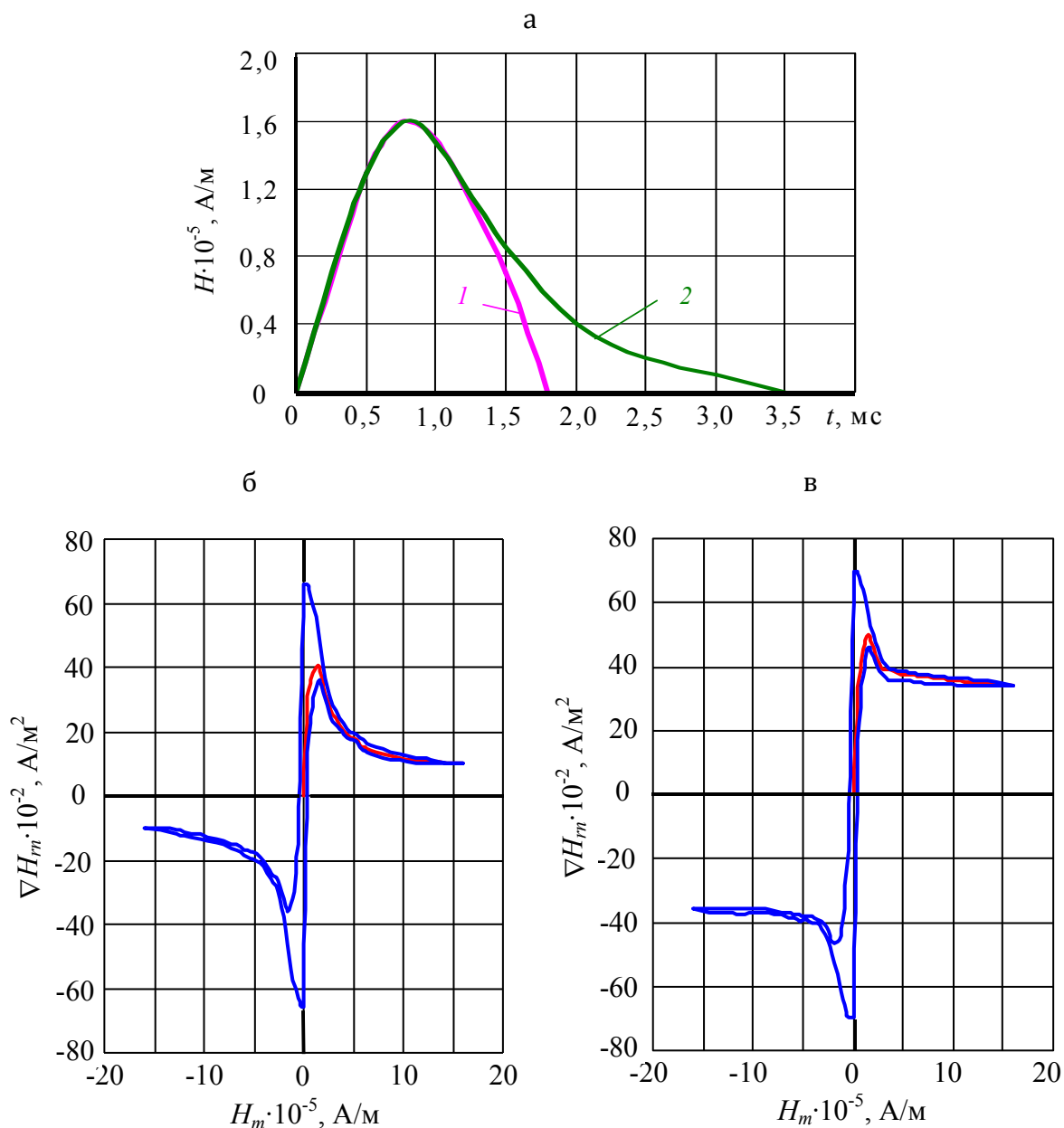
Однако не меньший вклад в данный эффект вносит и магнитная предыстория локальной намагниченности изделия после каждого очередного импульса. Об этом говорит тот факт, что если после каждого импульса в серии проводить размагничивание, то эффект уменьшения остаточной намагниченности с ростом амплитуды импульсов хотя и остается, но несколько ослабевает, а гистерезис остаточной намагниченности вообще пропадает.

В [13] показано, что ферромагнетик, находящийся в остаточной намагниченном состоянии, под действием переменного магнитного поля с амплитудой, плавно убывающей до нуля, в некоторых случаях не только не размагничивается, но может увеличить свою остаточную намагниченность и даже изменить полярность.

Для оценки влияния вихревых токов, возникающих в проводящем ферромагнетике в процессе импульсного намагничивания, на изменение ∇H_{rn} были сняты петли на тонком диске с разрезом по диаметру. Для намагничивания использовались импульсы с разной длительностью заднего фронта, что достигалось подключением к разрядной цепи демпфирующего диода.

Результаты, представленные на рис. 2, показывают, что даже при

существенном ослаблении вихревых токов за счет разреза аномальный характер петель гистерезиса поля остаточной намагниченности сохраняется, а уменьшение скорости спада импульса лишь увеличивает абсолютные значения ∇H_m , причем тем сильнее, чем больше амплитуда импульса.



1 – демпфирующий диод отключен, 2 – демпфирующий диод включен;
 Сталь 3СП, состояние поставки, диск диаметром 154 мм толщиной 1 мм с разрезом по диаметру;
 шаг изменения амплитуды импульсов $\Delta H_m = 4 \cdot 10^4$ А/м: длительность импульса τ_n , мс: б – 1,8; в – 3,5

Рис. 2. Форма импульсов (а) и петли гистерезиса градиента напряженности поля остаточной намагниченности (б, в)

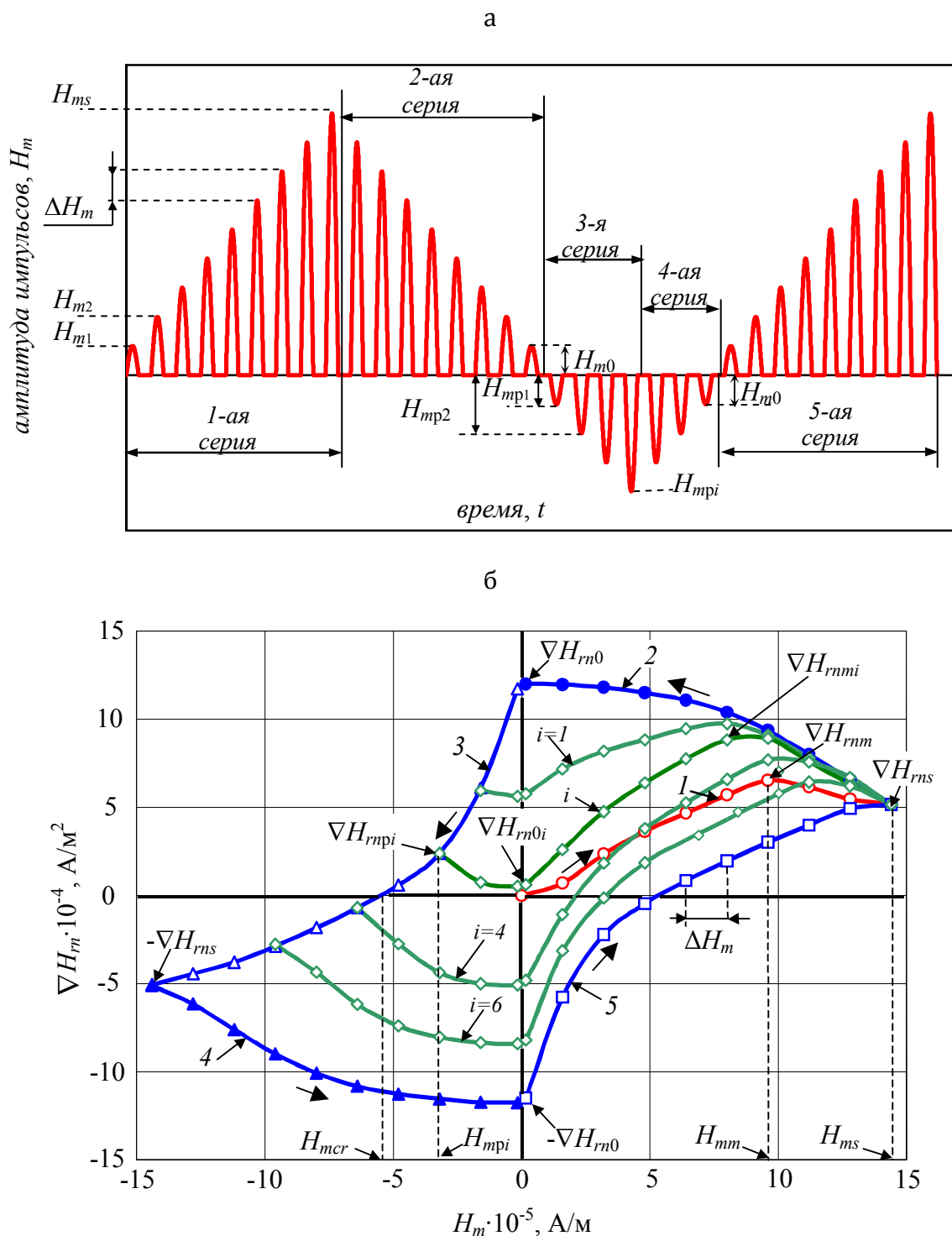


Рис. 3. Диаграмма изменений амплитуды импульсов (а), петля гистерезиса и кривые возврата градиента напряженности поля остаточной намагниченности (б)

Если рост амплитуды импульсов в 3-ей серии остановить на величине $H_{mp} < H_{ms}$ и начать ее уменьшать до нуля, а затем поменять полярность и увеличивать до H_{ms} , то наблюдаются так называемые кривые

возврата (рис. 3). Закономерности их изменения также отличаются от аналогичных закономерностей при статическом перемагничивании изделия в однородном магнитном поле, которые представляют собой монотонно возрастающие кривые. Кривая возврата при импульсном перемагничивании ($-H_{mpi} \leq H_m \leq H_{ms}$) сначала изменяется по ниспадающей от величины ∇H_{rmpi} до ∇H_{rn0i} (i -я кривая на рисунке 3), затем по возрастающей от ∇H_{rn0i} до ∇H_{rnm_i} и уменьшается до ∇H_{rns} при $H_m = H_{ms}$, то есть возвращается в вершину петли.

ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ

Очевидно, что в качестве информативных параметров для неразрушающего контроля изделия с применением локального импульсного намагничивания сериями импульсов изменяющейся амплитуды и полярности можно выбрать характерные точки изменения величин H_{rn} или ∇H_{rn} на соответствующей петле гистерезиса. Использование градиента в качестве информативного параметра предпочтительнее, поскольку его измерение характеризуется большей помехоустойчивостью по сравнению с измерением напряженности поля. Таким образом, в качестве параметров многопараметрового импульсного контроля были выбраны:

∇H_{rnm} – максимальное значение градиента ∇H_{rn} при возрастании амплитуды импульсов в 1-ой серии (кривая 1);

∇H_{rns} – величина градиента ∇H_{rn} после окончания процесса намагничивания изделия 1-ой серией импульсов с максимальной амплитудой H_{ms} ;

∇H_{rn0} – величина градиента ∇H_{rn} после окончания намагничивания изделия 2-ой серией импульсов, амплитуда которых уменьшается от H_{ms} до ΔH_m ;

∇H_{rmpi} – значение ∇H_{rn} после размагничивания изделия i -ым импульсом 3-ей серии, амплитуда которого равна H_{mpi} ;

∇H_{rn0i} – величина ∇H_{rn} по i -той кривой возврата после окончания размагничивания изделия импульсами 4-ой серии, амплитуда которых уменьшается по абсолютной величине от H_{mpi} до ΔH_m ;

∇H_{rnm_i} – максимальное значение ∇H_{rn} на i -той кривой возврата при намагничивании изделия 5-ой серией импульсов, полярность которых соответствует полярности первоначального намагничивания, а амплитуда возрастает от нуля до ΔH_m .

Для выбранных значений H_{ms} и ΔH_m величины параметров ∇H_{rnm} , ∇H_{rns} и ∇H_{rn0} не зависят от номера цикла перемагничивания i (количества импульсов в 3-ей серии), определяющего величину H_{mpi} . В то же

время параметры ∇H_{rmpi} , ∇H_{rn0i} , ∇H_{rnm} при изменении номера цикла изменяются очень существенно (вплоть до изменения знака).

Выбор количества импульсов i в 3-ей серии осуществляют после исследования зависимости всех вышеперечисленных параметров от температуры отпуска или механических свойств конкретного типа изделия при всех циклах перемагничивания, а выбор используемых для контроля параметров – исходя из получения наибольшей величины коэффициента корреляции R и наименьшего значения среднеквадратического отклонения S_n .

ВЛИЯНИЕ ШАГА ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДЫ, ДЛИТЕЛЬНОСТИ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ И СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА НА ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В [14] показано, что влияние величины шага изменения амплитуды импульсов ΔH_m на изменение ∇H_{rn} зависит от цикла перемагничивания. Так, увеличение ΔH_m в 1-ой серии импульсов несколько уменьшает величину измеряемого градиента ∇H_{rn} , но его конечное значение (∇H_{rms}) при амплитуде импульса H_{ms} остается неизменной. При последующем уменьшении амплитуды импульсов H_m в первоначальной полярности (2-ая серия импульсов) увеличение шага этого изменения приводит к уменьшению градиента ∇H_{rn} (в том числе к уменьшению ∇H_{rn0}) независимо от длительности импульсов. Аналогичная картина наблюдается и при изменении полярности импульсов. При этом кривая с большим шагом изменения амплитуды импульсов становится более полой и растет величина релаксационной коэрцитивной силы H_{mcr} (петля гистерезиса как бы сжимается по оси ∇H_{rn} и расширяется по оси H_m). Однако при $H_m = -H_{ms}$ значения ∇H_{rn} для кривых, измеренные при разном шаге изменения амплитуды, совпадают и составляют $-\nabla H_{rms}$.

При перемагничивании изделия сериями импульсов структура материала не оказывает влияния на ход изменения градиента ∇H_{rn} , но существенно изменяет его абсолютную величину. Так, на закаленном образце из стали 45 величина ∇H_{rn} примерно в 3 раза больше, чем на образце в состоянии поставки, что подтверждает высокую чувствительность данного параметра к изменению структуры изделия.

Уменьшение длительности импульса в серии и, соответственно, увеличение крутизны его спада уменьшает значения измеряемого градиента ∇H_{rn} на всех участках основной кривой и петли гистерезиса незначительно, однако при этом существенно увеличивается ширина петли.

Рост толщины изделия приводит к уменьшению значений ∇H_{rnm} , ∇H_{rms} и ∇H_{rn0} и увеличению отношения $\nabla H_{rn0}/\nabla H_{rms}$, а петля гистерезиса

становится значительно шире по сравнению с петлей образца меньшей толщины (H_{mcr} больше). При этом влияние толщины изделия на форму петли гистерезиса и на величину информативных параметров при циклическом импульсном перемагничивании изделия зависит от амплитуды импульса в серии. Так, на образце из стали 45 толщиной 2,5 мм в состоянии поставки при амплитудах возрастающих импульсов в пределах $(0,4 - 3,2) \cdot 10^5$ А/м (1-ая серия импульсов) величина ∇H_{rn} значительно больше, чем на образце толщиной 15 мм. При амплитудах возрастающих импульсов этой же серии в пределах $(5,6 - 9,6) \cdot 10^5$ А/м наблюдается обратная картина, а при изменении H_m от $1,2 \cdot 10^6$ до $1,6 \cdot 10^6$ А/м градиент ∇H_{rn} вообще мало зависит от толщины образца [14].

Весьма чувствительной к толщине изделий является релаксационная коэрцитивная сила H_{mcr} в импульсном режиме перемагничивания. Так, ее величина для образца из стали 45 толщиной 15 мм в 5 раз больше, чем для образца из той же стали толщиной 2,5 мм, причем чем больше шаг изменения амплитуды намагничивающих импульсов, тем больше величина H_{mcr} .

ПРИБОРЫ, РЕАЛИЗУЮЩИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЕ ИМПУЛЬСНОЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ

Импульсный магнитный структуроскоп КИМ-1

В импульсном магнитном структуроскопе КИМ-1 реализован неполный гистерезисный цикл градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_{rn} [15], когда на изделие воздействуют только двумя сериями импульсов одной полярности, сначала возрастающих, а затем убывающих по амплитуде. После этого воздействия проводится измерение градиента ∇H_{rn} .

На рис. 4 представлена функциональная схема, преобразователь и общий вид прибора КИМ-1.

Его отличительной особенностью является наличие автоматического и ручного выбора числа импульсов в серии.

В автоматическом режиме прибор КИМ-1 работает следующим образом. При нажатии кнопки ПУСК, расположенной в преобразователе 2, блок намагничивания 7 формирует импульс тока, который, проходя через соленоид 2-2 преобразователя (внешний диаметр 45 мм, внутренний диаметр 8 мм, длина 32 мм) создает импульс магнитного поля с амплитудой ΔH_m . Этот импульс локально намагничивает изделие. На время формирования намагничивающего импульса блок управления 8 блокирует аналого-цифровой преобразователь 4 и блок индикации 6.

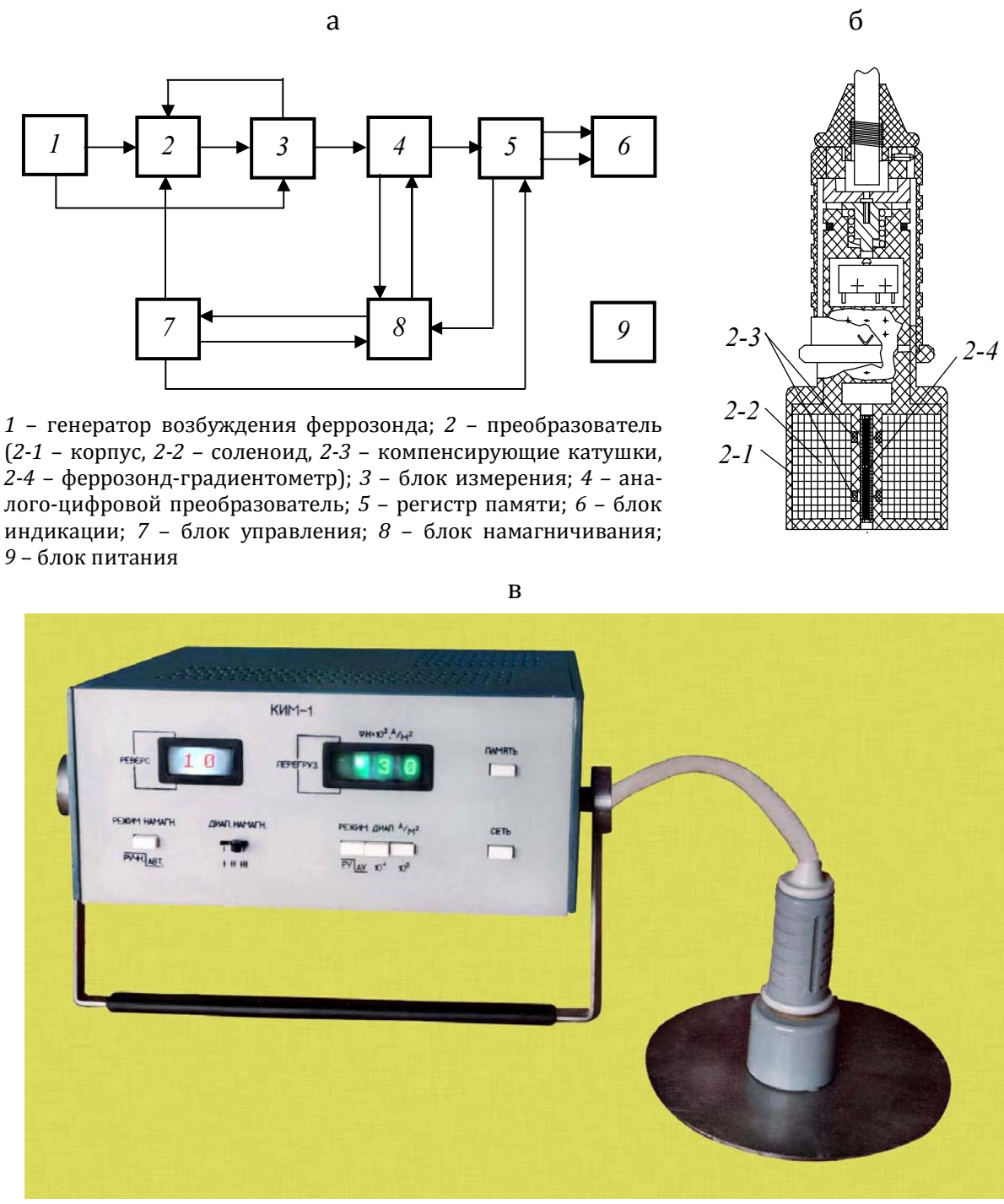


Рис. 4. Функциональная схема (а), преобразователь (б) и общий вид (в) прибора КИМ-1

После окончания импульса блок управления 8 блокирует блок намагничивания 7 и запускает аналого-цифровой преобразователь 4. При этом на возбуждающую обмотку феррозонда-градиентометра 2-4 (диаметр 5 мм, длина 28 мм), расположенного внутри соленоида 2-2, с

генератора возбуждения феррозонда 1 подается сигнал частотой 5 кГц.

С измерительной обмотки феррозонда-градиентометра 2-4 сигнал поступает в блок измерения 3, где он усиливается, затем из него выделяется и детектируется вторая гармоника.

После детектирования сигнал обратной связи, пропорциональный измеряемому градиенту, поступает на компенсирующие катушки 2-3, охватывающие феррозонд-градиентометр 2-4, и в аналого-цифровой преобразователь 4, где он преобразуется в цифровой код и записывается в регистр памяти 5.

Сигнал об окончании измерения из аналого-цифрового преобразователя 4 поступает в блок управления 8, который снова запускает блок намагничивания 7 и блокирует аналого-цифровой преобразователь 4. Блок намагничивания 7 формирует через соленоид 2-2 импульс, амплитуда которого больше предыдущего на ΔH_m . По окончании второго намагничивающего импульса амплитудой $2 \cdot \Delta H_m$ блок управления 8 снова блокирует блок намагничивания 7 и запускает аналого-цифровой преобразователь 4.

По окончании второго и каждого последующего импульса результат измерения сравнивается с предыдущим, хранящимся в регистре памяти 5. Если результат последнего измерения больше величины, записанной в регистр памяти 5, то блок управления 8 выдает сигнал на увеличение амплитуды следующего импульса на величину ΔH_m , а при уменьшении или при прохождении 15-го импульса – на формирование серии импульсов, уменьшающихся от импульса к импульсу с шагом ΔH_m . По окончании второй серии импульсов результат последнего измерения подается на блок индикации 6, который показывает также номер импульса, при котором величина ∇H_m начала убывать. Число импульсов в двух сериях может изменяться от 3 до 29 (нечетное число).

В ручном режиме работы блок намагничивания 7 формирует возрастающие, а затем убывающие импульсы общим числом 29, после чего проводится измерение градиента ∇H_m . Общая длительность цикла измерения при 29 импульсах не превышает 40 с.

За счет компенсационной схемы диапазон измерения прибора КИМ-1 расширен до $999 \cdot 10^2$ А/м² при погрешности измерений 5 %. Важными преимуществами прибора КИМ-1 по сравнению с приборами типа ИМА [2] также являются: более высокая чувствительность к температуре термической обработки сталей с однозначной связью между механическими и магнитными свойствами, повышенная помехозащищенность (за счет более высоких абсолютных значений измеряемого градиента); нечувствительность к магнитной предыстории и пониженная чувствительность к изменению толщины изделий (показания прибора на тол-

щинах до 4 мм практически не зависят от толщины).

Габариты прибора составляют 395×350×148 мм³ (преобразователя: диаметр 56 мм, длина 135 мм), масса – 15 кг.

Анализатор импульсный магнитный многопараметровый ИМА-М

Полный гистерезисный цикл градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_{rn} реализован в анализаторе импульсном магнитном многопараметровом ИМА-М, предназначенном для неразрушающего контроля твердости изделий машиностроения, подвергаемых закалке с последующим высокотемпературным отпуском [14]. Анализатор ИМА-М автоматически осуществляет:

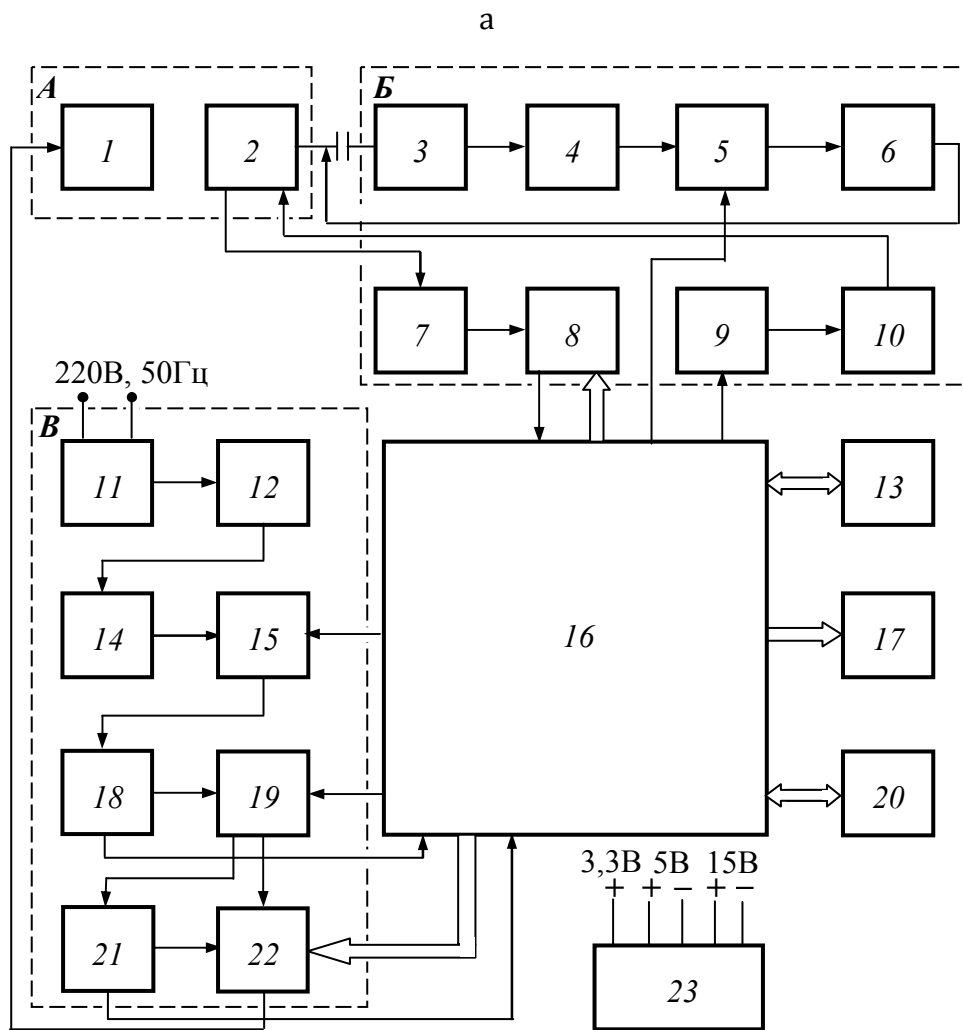
- локальное намагничивание и перемагничивание изделий 5-ю сериями изменяющихся по величине и направлению импульсов магнитного поля, создаваемого накладным соленоидом;

- измерение градиентов напряженности поля остаточной намагниченности вдоль оси соленоида в характерных точках основной кривой и петли гистерезиса градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности;

- преобразование измеренных параметров в величины твердости или других характеристик изделия по заранее установленным уравнениям множественной линейной корреляции.

Блок-схема анализатора ИМА-М представлена на рис. 5, а. Прибор содержит: **преобразователь А**, состоящий из намагничивающего соленоида 1 и соосного с ним феррозонда-градиентометра 2; **измерительный канал В**, состоящий из усилителя 3, полосового фильтра 4, синхронного детектора 5, интегратора 6, датчика 7 тока компенсации, программируемого усилителя 8; усилителя-ограничителя 9 и интегратора 10; **канала формирования импульсов тока В**, состоящий из повышающего трансформатора 11, проходного конденсатора 12, мостового выпрямителя 14, зарядного ключа 15, датчика 18 тока заряда, накопительного конденсатора 19, датчика 21 напряжения и разрядного ключа 22; **а также** микроконтроллер 16; выход по порту USB 13 для связи с персональным компьютером (далее ПК); ЖКИ дисплей 17; кнопки 20 управления и источник 23 питания.

При работе преобразователь А прибора устанавливают на поверхность испытуемого изделия так, что ось соленоида 1 перпендикулярна поверхности изделия. Канал В под управлением микроконтроллера 16 формирует импульсы тока, изменяющиеся во времени по *i*-тому циклу (число *i* устанавливается на этапе исследования). Импульсы тока создаются путем медленного заряда накопительного конденсатора 19 через



б



Рис. 5. Функциональная схема (а) и общий вид (б) прибора ИМА-М

проходной конденсатор 12, который вместе с повышающим трансформатором 11 является ограничителем тока заряда, и быстрого разряда накопительного конденсатора 19 через разрядный ключ 22 и намагничивающий соленоид 1. Ток заряда и напряжение заряда накопительного конденсатора 19 контролируются микроконтроллером 16 посредством датчиков 18 и 21 тока заряда и напряжения соответственно. Импульсы тока, проходя через намагничивающий соленоид 1, создают импульсное магнитное поле, которое намагничивает и перемагничивает локальную область изделия (изделие на рис. 5 не показано). Электрический сигнал феррозонда-градиентометра 2, амплитуда второй гармоники которого пропорциональна градиенту напряженности поля локальной остаточной намагниченности изделия, а фаза – знаку этого градиента, поступает на измерительный канал Б. Микроконтроллер 16 формирует сигнал, который, проходя через усилитель-ограничитель 9 и интегратор 10, подается в обмотку возбуждения феррозонда-градиентометра 2. Одновременно микроконтроллер 16 формирует сигнал для управления синхронным детектором 5 канала измерения так, что он находится в фазе с сигналом второй гармоники феррозонда-градиентометра 2. Выделение сигнала второй гармоники осуществляется полосовым фильтром 4. Протектированный сигнал через интегратор 6 подается в измерительную обмотку феррозонда-градиентометра 2 в полярности, обеспечивающей в области его расположения компенсацию градиента магнитного поля, создаваемого намагниченным образцом. Таким образом, величина компенсационного тока через измерительную обмотку феррозонда-градиентометра 2 пропорциональна измеряемому градиенту магнитного поля. Ток компенсации преобразуется датчиком 7 тока компенсации в напряжение, величина которого через программируемый усилитель 8, который обеспечивает масштабирование измеряемого сигнала в требуемом интервале напряжений, измеряется микроконтроллером 16.

Под управлением микроконтроллера 16 измерительный канал осуществляет измерение сигнала, пропорционального градиенту напряженности поля локальной остаточной намагниченности изделия, после каждого импульса магнитного поля согласно i -тому циклу. Таким образом, после окончания намагничивания образца по i -тому циклу в микроконтроллере имеется массив значений градиента после каждого импульса намагничивания. По полученному массиву микроконтроллер 16 определяет значения ∇H_{rnm} , ∇H_{rns} , ∇H_{rn0} , ∇H_{rnp_i} , ∇H_{rn0_i} , ∇H_{rnm_i} .

Режим работы анализатора ИМА-М задается с помощью кнопок 20 управления и отображается на ЖКИ дисплее 17. Обработку информации, введенной с кнопок 20 управления, и управление ЖКИ дисплеем 17 осуществляет микроконтроллер 16.

Прибор имеет связь с ПК посредством USB порта 13, что позволяет

передавать информацию о результатах измерения анализатором ИМА-М на ПК и управлять им с помощью ПК, используя специальную программу "ИМА-М" при наборе статистических данных.

Источник 23 питания обеспечивает формирование напряжений постоянного тока, необходимых для работы устройства.

Общий вид прибора представлен на рис. 5, б.

Основные технические характеристики анализатора ИМА-М

- максимальная амплитуда импульсов напряженности намагничивающего поля на торце соленоида
 $H_{ms} = (5,2; 5,9; 6,5; 7,2; 7,8) \times 10^5$ А/м с погрешностью $\pm 5\%$;
- шаг изменения амплитуды импульса, А/м..... $\Delta H_m = (1/9 H_{ms} \pm 5\%)$
- диапазон измерения градиента ∇H_m напряженности поля остаточной намагниченности, А/м²..... $\pm(1 - 250) \cdot 10^3$
- относительная погрешность измерения, %, не более ± 5
- время одного измерения, не более 30 с
- анализатор автоматически сигнализирует о выходе измеряемой величины за пределы диапазона годности;
- индикация результатов контроля твердости цифровая, со ступенью квантования 0,1 ед. HRC
- время непрерывной работы в режиме ожидания, час, не менее 8
- мощность, потребляемая от сети, ВА, не более
 - в режиме ожидания.....35
 - в режиме импульсного намагничивания350
- габаритные размеры, мм, не более:
 - электронного блока 480×360×170
 - преобразователя
 - диаметр.....56
 - высота 165
- масса, кг, не более:
 - электронного блока16
 - преобразователя 0,6

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО МНОГОПАРАМЕТРОВОГО МЕТОДА

Контроль структурного состояния сталей по одному магнитному параметру во многих случаях не обеспечивает высоких коэффициентов корреляции R и низких значений среднеквадратичного отклонения S_n , а в ряде случаев (например, при контроле твердости высокоуглеродистых

сталей после закалки и последующего средне и высокотемпературного отпуска, поверхностной твердости и толщины поверхностно упрочненных слоев) невозможен.

Поскольку производительность импульсного магнитного многопараметрового метода уступает одно и двухпараметровому, то его следует применять в случае, если контроль другими методами не обеспечивает приемлемых значений R и S_n или вообще невозможен.

Наличие нескольких магнитных параметров контроля за цикл измерения обеспечивает возможность использования не только парной, но и множественной линейной корреляционной связи, например, типа

$$\text{HRC}_p = a_0 + \sum_{k=1}^N a_k \nabla H_{rnk}, \quad (1)$$

где HRC_p – расчетное значение твердости по Роквеллу, a_0 – свободный член корреляционной связи, ∇H_{rnk} – измеряемый магнитный параметр, N – число параметров, включенных в уравнение, a_k – коэффициент при соответствующем параметре.

В качестве примера рассмотрим возможность контроля твердости таких сложных с точки зрения применения магнитных методов контроля материалов, как рессорно-пружинные стали 60С2 [17] и 50ХГФА [18].

Для установления параметров, обеспечивающих наибольший коэффициент корреляции R и наименьшее среднеквадратическое отклонение S_n , с помощью программного продукта NCSS-2000 рассчитывались уравнения регрессии для всех возможных моделей: одно-, двух-, трех-, четырех-, пяти- и шестипараметровых. Число уравнений для каждой модели равнялось числу сочетаний из 6 элементов по числу параметров, используемых для модели. Так, для однопараметровой модели строилось 6 уравнений, для двухпараметровой – 15, для трехпараметровой – 20, для четырехпараметровой – 15, для пятипараметровой – 6 и для шестипараметровой – 1. Для каждой из моделей выбирались те уравнения регрессии, которые обеспечивают наибольшие коэффициенты корреляции и наименьшую дисперсию.

В табл. 1 приведены лучшие с этой точки зрения уравнения корреляции всех шести моделей для широкого интервала (100–600 °С) температур отпуска стали 60С2.

Из табл.1 видно, что увеличение количества магнитных параметров, используемых для модели, приводит к росту коэффициентов корреляции и снижению среднеквадратического отклонения во всех исследованных интервалах температур отпуска.

Таблица 1. Уравнения корреляции для определения твердости листов рессор из стали 60С2 [17]

Темп. отпуска, °С	Число параметров	Уравнение регрессии	R	S _n
100–320	1	$HRC_p = 43,120 + 1,324 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0}$	0,983	0,499
	2	$HRC_p = 40,657 - 2,728 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 2,732 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0}$	0,990	0,444
	3	$HRC_p = 38,508 - 2,637 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rnm} - 3,775 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 3,474 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0}$	0,996	0,327
	4	$HRC_p = 47,004 - 5,259 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rnm} + 3,934 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} - 1,767 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} - 3,127 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm2}$	0,999	0,027
	5	$HRC_p = 39,289 - 5,230 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rnm} - 5,556 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 4,062 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} + 3,191 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} - 8,649 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,999	0,000
300–600	1	$HRC_p = 44,983 + 1,038 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,963	1,896
	2	$HRC_p = 48,158 - 1,505 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 1,070 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,976	1,599
	3	$HRC_p = 48,975 - 3,298 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} - 3,013 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 7,606 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2}$	0,984	1,355
	4	$HRC_p = 49,763 - 2,979 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} - 2,596 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 5,804 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 2,212 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,984	1,404
	5	$HRC_p = 47,885 - 3,134 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} - 2,753 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} - 2,552 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} + 8,224 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 3,016 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm2}$	0,985	1,462
	6	$HRC_p = 48,230 - 3,044 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} - 2,702 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} - 2,269 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} + 7,447 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 8,144 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02} + 2,752 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm2}$	0,985	1,540
100–600	1	$HRC_p = 45,963 + 1,205 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,943	2,815
	2	$HRC_p = 41,732 + 1,552 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} + 1,237 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,964	2,326
	3	$HRC_p = 49,499 + 1,865 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} - 1,052 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2} + 2,048 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,970	2,196
	4	$HRC_p = 46,010 - 3,425 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 3,528 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} - 9,135 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 1,759 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02}$	0,973	2,149
	5	$HRC_p = 52,062 - 9,864 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rns} + 9,458 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} - 8,666 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 1,768 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02} - 1,015 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnm2}$	0,976	2,105
	6	$HRC_p = 51,908 + 3,798 \cdot 10^{-6} \nabla H_{rnm} - 9,942 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rns} + 9,307 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} - 8,606 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} + 1,768 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn02} - 9,966 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm2}$	0,976	2,185

Так, для низкотемпературного отпуска уже четырехпараметровая модель по параметрам ∇H_{rnm} , ∇H_{rn0} , ∇H_{rn02} и ∇H_{rnm2} обеспечивает коэффициент корреляции, практически равный 1 при $S_n = 0,027 HRC$. То есть

контроль твердости стали 60С2 в интервале температур отпуска 100–320 °С импульсным магнитным методом по результатам измерения градиента напряженности поля остаточной намагниченности в четырех точках в цикле намагничивание–перемагничивание возможен с точностью, не хуже точности прямых измерений по методу Роквелла.

С точки зрения практической реализации выбор измеряемых параметров и, следовательно, корреляционной модели определяется требуемой точностью контроля и его производительностью. Поэтому для контроля твердости при низкотемпературном отпуске предпочтительнее трехпараметровая модель по результатам измерения ∇H_{rnm} , ∇H_{rn0} и ∇H_{rn02} , обеспечивающая достаточную точность при уменьшенном на 10 числе импульсов цикле намагничивания в интервале изменения амплитуды от нуля до H_{ms} по восходящей ветви кривой возврата по сравнению с четырехпараметровой моделью.

Для высокотемпературного отпуска (300–600 °С) лучшей моделью является трехпараметровая, так как дальнейшее увеличение числа измеряемых параметров оставляет коэффициент корреляции без изменения, а среднеквадратичное отклонение даже увеличивается.

В широком интервале температур отпуска (100–600 °С) наилучшие результаты дает контроль по пяти параметрам: ∇H_{rms} , ∇H_{rn0} , ∇H_{rnp2} , ∇H_{rn02} и ∇H_{rnm2} , обеспечивающий коэффициент корреляции $R = 0,976$ и среднеквадратичное отклонение $S_n = 2,105$ HRC.

В интервале температур отпуска 100–600 °С стали 50ХГФА (табл. 2) однопараметровый контроль возможен только по параметрам ∇H_{rnp2} или ∇H_{rn02} , однако среднеквадратичное отклонение и коэффициенты корреляции для этих параметров недостаточны для его практической реализации. Увеличение числа магнитных параметров, используемых в модели, приводит к росту коэффициентов корреляции и уменьшению среднеквадратичного отклонения. То же можно сказать и о двухпараметровом контроле этой стали.

Лучшим среди трехпараметровых моделей для стали 50ХГФА является контроль по параметрам ∇H_{rms} , ∇H_{rnp2} , ∇H_{rn0} , требующий для своей реализации трех серий импульсов и обеспечивающий среднеквадратичное отклонение S_n , близкое к единице HRC.

Снижение S_n до величины меньше единицы обеспечивает лишь контроль по четырем параметрам. Пяти- и шестипараметровые модели не приводят к существенному повышению коэффициента корреляции и снижению среднеквадратичного отклонения, и поэтому не рекомендуются для использования при контроле отпуска стали 50ХГФА.

Таблица 2. Уравнения корреляции для определения твердости листов рессор из стали 50ХГФА для интервала температур отпуска 100–600 °С [18]

Число параметров	Лучший параметр контроля	Уравнение регрессии	R	S _n
1	∇H_{rn0}	$HRC_p = 34,68083 + 1,782777 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0}$	0,773	4,392
1	∇H_{rnp2}	$HRC_p = 36,5869 + 4,881765 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2}$	0,883	3,255
2	$\nabla H_{rnm},$ ∇H_{rnp2}	$HRC_p = 41,80399 - 4,558944 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} +$ $+ 1,315517 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2}$	0,986	1,189
2	$\nabla H_{rns},$ ∇H_{rnp2}	$HRC_p = 40,61086 - 3,917176 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} +$ $+ 1,125596 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2}$	0,988	1,121
3	$\nabla H_{rnm},$ $\nabla H_{rns},$ ∇H_{rn0}	$HRC_p = 39,82593 + 2,888447 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} -$ $- 6,370801 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} + 1,000676 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2}$	0,988	1,143
3	$\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rnp2},$ ∇H_{rn02}	$HRC_p = 42,29781 - 4,611518 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} +$ $+ 1,203056 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2} - 1,144022 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,990	1,019
4	$\nabla H_{rnm},$ $\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rnp2},$ ∇H_{rn02}	$HRC_p = 40,86952 + 6,822742 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} -$ $- 1,058242 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rns} + 9,275348 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} -$ $- 1,432759 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,992	0,977
4	$\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rn0},$ $\nabla H_{rnp2},$ ∇H_{rn02}	$HRC_p = 43,31081 - 3,92957 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} -$ $- 8,997854 \cdot 10^{-5} \nabla H_{rn0} + 1,30225 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2} -$ $- 1,177065 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,990	1,045
5	$\nabla H_{rnm},$ $\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rn0},$ $\nabla H_{rnp2},$ $\nabla H_{rn02},$	$HRC_p = 43,86951 + 1,118788 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnm} -$ $- 1,176781 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rns} - 3,476376 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} +$ $+ 1,134499 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2} - 1,745156 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02}$	0,993	0,925
5	$\nabla H_{rnm},$ $\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rnp2},$ $\nabla H_{rn02},$ ∇H_{rnm2}	$HRC_p = 40,92905 + 6,71039 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnm} -$ $- 1,048737 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rns} + 9,32975 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp2} -$ $- 1,431264 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02} - 4,63992 \cdot 10^{-7} \nabla H_{rnm2}$	0,992	1,010
6	$\nabla H_{rnm},$ $\nabla H_{rns},$ $\nabla H_{rn0},$ $\nabla H_{rnp2},$ $\nabla H_{rn02},$ ∇H_{rnm2}	$HRC_p = 44,20105 + 1,116268 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnm} -$ $- 1,159632 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rns} - 3,684585 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn0} +$ $+ 1,160776 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnp2} - 1,76005 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn02} -$ $- 1,183785 \cdot 10^{-6} \nabla H_{rnm2}$	0,993	0,951

Для контроля высокотемпературного отпуска стали 35 наиболее перспективным является четырехпараметровая модель при $i = 1$.

$$HRC = 6,329 - 1,062 \cdot 10^{-2} \nabla H_{rns} + 2,905 \cdot 10^{-2} \nabla H_{rn0} - \\ - 2,418 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn01} - 1,98 \cdot 10^{-2} \nabla H_{rnm1} \quad (2)$$

с коэффициентом корреляции $R = 0,982$ при среднеквадратическом отклонении $S_n = 1,463$ HRC [19].

Для поковок из стали 45 информативными параметрами установлены величины ∇H_{rns} , ∇H_{rn0} , ∇H_{rnp3} и ∇H_{rnm3} [20]. При этом среднеквадратичное отклонение $S_n = 2,1$ HRC, коэффициенте корреляции $R = 0,9$, а уравнение корреляции имеет вид:

$$HRC_p = 10,248 - 0,318 \nabla H_{rns} + 0,266 \nabla H_{rn0} + 0,485 \nabla H_{rnp3} + 0,298 \nabla H_{rnm3} \quad (3)$$

Анализатор ИМА-М апробирован на ОАО «ТАИМ» для контроля глубины упрочненного слоя после цементации червячного вала типа 64226-3501141 из стали 20ХН3А и его твердости после закалки и после отпуска. Коэффициент корреляции составил: по глубине упрочненного слоя от 0,95 до 0,99; по твердости после закалки – 0,98; после отпуска – 0,99 (при S_n соответственно 0,016 мм и 0,31 HRC и 0,86 HRC) [21].

Многопараметровый метод испытан также на возможность применения для контроля твердости и глубины закаленного слоя после закалки ТВЧ штоков гидравлических амортизаторов из стали 45 (диаметр 12,35 мм, длина 228 ± 13 мм) [22, 23]. Показано, что расчет по пяти параметрам позволяет достаточно точно воспроизвести HRC_n и h . На основании проведенных измерений были получены следующие уравнения для расчета твердости

$$HRC_{np} = 60,87684 + 3,120482 \cdot 10^{-2} \nabla H_{rnm} - 7,918616 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rns} - \\ - 2,205681 \cdot 10^{-2} \nabla H_{rn0} - 6,81563 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp1} + 5,972872 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn01} \quad (4)$$

и глубины упрочненного слоя

$$h_p = 1,485343 + 3,666426 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rnm} - 9,555659 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rns} - \\ - 2,62297 \cdot 10^{-3} \nabla H_{rn0} - 6,81563 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rnp1} + 5,972872 \cdot 10^{-4} \nabla H_{rn01} \cdot \quad (5)$$

Заключение

Использование характерных точек на кривой изменения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности при импульсном локальном намагничивании и перемагничивании объекта контроля импульсным магнитным полем изменяющейся амплитуды и полярности в качестве информативных параметров многопараметрового магнитного контроля позволяет повысить коэффициент корреляции и уменьшить дисперсию при контроле структурного состояния ряда марок сталей, обеспечить контроль твердости и толщины поверхностно упрочненных слоев, причем увеличение числа измеряемых параметров увеличивает коэффициент корреляции и уменьшает среднеквадратичное отклонение.

Намагничивание двумя сериями импульсов одной полярности, сначала возрастающих, а затем убывающих по амплитуде, и последующее измерение градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности позволяет повысить чувствительность к температуре термической обработки сталей с однозначной связью между механическими и магнитными свойствами, повысить помехозащищенность, снизить чувствительность к магнитной предыстории и к изменению толщины изделий.

Разработанный для реализации импульсного многопараметрового магнитного метода анализатор ИМА-М рекомендуется применять для контроля структурного состояния ответственных изделий машиностроения, когда контроль другими методами не обеспечивает приемлемых значений коэффициента корреляции и среднеквадратичного отклонения или вообще невозможен.

Литература

1. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
2. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 2, с. 29–64.
3. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального двухполярного импульсного намагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 4, с. 20–45.
4. Бида Г.В. Учет статистического веса используемых факторов при исследовании склонности стального проката к хрупкому разрушению. – Дефектоскопия, 2011, № 3, с. 22–31.
5. Бида В.Р., Ничипурук А.П. Многопараметровые методы в магнитной структуро-

- скопии и неразрушающем контроле механических свойств сталей. – Дефектоскопия, 2007, № 8, с. 4–24.
6. Костин В.Н., Сташков А.Н., Осинцев А.А. Использование магнитных свойств вещества для многопараметровой структуроскопии ферромагнитных изделий. – В кн.: Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Материалы международной научно-техн. конф., Могилев, 2004, с. 107–108.
 7. Мельгуй М.А., Кратиров В.Б. Аномальный гистерезис поля остаточной намагниченности и его градиента при намагничивании ферромагнетика импульсным магнитным полем. – Дефектоскопия, 1986, № 12, с. 64–70.
 8. Поливанов К.М. Ферромагнетики. Основы теории технического применения. – М.-Л.: ГЭИ, 1957. – 256 с.
 9. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Использование необратимых магнитных характеристик ферромагнетиков в магнитном структурном анализе. – В кн.: IX Всесоюзная научно-техническая конференция «Неразрушающие физические методы и средства контроля», 26–28 мая (Тезисы докладов) Секция В. Магнитные методы, Минск, 1981, с. 27–29
 10. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5. – Дефектоскопия, 1979, № 11, с. 90–95.
 11. Матюк В.Ф. Особенности влияния амплитуды и числа импульсов магнитного поля на величину градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности при локальном намагничивании толстых изделий. – Дефектоскопия, 1996, № 3, с. 18–24.
 12. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А. Разработка нового прибора для магнитной структуроскопии на основе особенностей гистерезиса остаточной намагниченности при импульсном перемагничивании изделия. – Приборы и методы измерений, 2011, № 1, с. 17–24.
 13. Старцева И.Е., Шур Я.С. Изменение магнитного состояния мягких магнитных материалов под действием переменных магнитных полей. – ФММ, 1956, т. III, вып. 1, с. 190–191.
 14. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А., Любарец А.Л. Контроль прочностных характеристик и качества термообработки ферромагнитных изделий по параметрам петли гистерезиса остаточной намагниченности при их локальном намагничивании и перемагничивании импульсным магнитным полем изменяющейся амплитуды. I. Параметры петли гистерезиса. – Дефектоскопия, 2005, № 5, с. 3–13.
 15. Мельгуй М.А., Кратиров В.Б., Цукерман В.Л. Импульсный магнитный структуроскоп КИМ-1. – Дефектоскопия, 1988, № 3, с. 31–35.
 16. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М: Наука, 1993. – 250 с.
 17. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А., Любарец А.Л. Контроль прочностных характеристик и качества термообработки ферромагнитных изделий по параметрам петли гистерезиса остаточной намагниченности при их локальном намагничивании и перемагничивании импульсным магнитным полем изменяющейся амплитуды. II. Сталь 60С2. – Дефектоскопия, 2005, № 5, с. 14–23.
 18. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А., Любарец А.Л. Контроль прочностных характеристик и качества термообработки ферромагнитных изделий по па-

- раметрам петли гистерезиса остаточной намагниченности при их локальном намагничивании и перемагничивании импульсным магнитным полем изменяющейся амплитуды. III. Сталь 50ХГФА. – Дефектоскопия, 2005, № 8, с. 57–67.
19. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А., Аброскина С.А. Новые возможности импульсного магнитного метода контроля твердости изделий из ферромагнитных сталей. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук, 2006, № 2, с. 114–120.
 20. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А., Аброскина С.А. Контроль качества высокотемпературного отпуска изделий из среднеуглеродистой качественной стали 45 многопараметровым импульсным магнитным методом. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн.навук. 2006, № 3, с. 113 – 118.
 21. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А. Исследование возможности контроля качества цементации импульсным магнитным многопараметровым методом. – В кн.: Инженерия поверхностного слоя деталей машин. Сборник материалов 2-й международной научно-практич. конф., 27–28 мая 2010 г. – Минск: БНТУ, 2010, с. 217–218.
 22. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Контроль качества закалки ТВЧ импульсным магнитным многопараметровым методом. – В кн.: Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Материалы 3-й международной научно-технич. конф. Могилев, 23–25 сентября 2009 г. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2009, с. 138–140.
 23. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А. Способ контроля толщины и твердости поверхностно-упрочненного слоя изделий из ферромагнитного материала. – Патент РБ № 10698. – Афіцыйны бюлетэнь, 2008, № 3, с. 151–152.

Статья поступила в редакцию 18.02.13

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАКАЛКИ И ОТПУСКА
НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ**

*The influence of hardening and tempering temperature
on the structure and magnetic characteristics
of tool high-speed steels*

Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Короткевич З.М., Осипов А.А., Бурак В.А.
Matyuk V.F., Melgui M.A., Korotkevich Z.M., Osipov A.A., Burak V.A.

Проанализированы изменения параметров основной кривой намагничивания и петли магнитного гистерезиса инструментальных быстрорежущих сталей в зависимости от температуры закалки и отпуска и возможность их использования для контроля качества термообработки. Исследовано влияние температуры термообработки инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 на ее структурное состояние и магнитные свойства при квазистатическом режиме перемагничивания в замкнутой магнитной цепи. Показано, что ни один из стандартных магнитных параметров не может быть использован для контроля качества закалки этой стали, определены параметры, по которым возможен контроль качества отпуска в широком диапазоне изменения температур.

The changes of the basic magnetization curve and static magnetic hysteresis loop characteristics, when the hardening or tempering temperature of tool high-speed steels changes, and possibility of using them for heat treatment quality testing are discussed. The effect of tool high-speed steel R6M5 heat treatment temperature to the structural state and the magnetic properties under quasi-static magnetization reversal mode in a closed magnetic circuit is investigated. It is shown that none of the magnetic parameters can not be used for quality control of hardening and parameters for quality control of tempering of steel R6M5 in a wide temperature range are determined.

Введение

Быстрорежущие инструментальные стали применяют для изготовления режущих инструментов (резцов, сверл, фрез и др.), работающих при высоких скоростях резания в условиях значительного нагружения и нагрева рабочих кромок. Основное достоинство этого класса сталей заключается в том, что они обладают высокой красностойкостью

(теплостойкостью), т.е. не теряют твердость, когда режущая кромка инструмента разогревается до 600 °С [1–3].

Для обеспечения красностойкости быстрорежущую сталь легируют большим количеством вольфрама в сочетании с молибденом и ванадием. Кроме этих элементов, все быстрорежущие стали легируются хромом, а некоторые – кобальтом. В результате комплексного легирования быстрорежущие инструментальные стали допускают в 2–4 раза большую скорость резания по сравнению с инструментом из инструментальных углеродистых сталей [3].

Быстрорежущие стали поставляются в горячекатаном состоянии с гарантией твердости после отжига, а также после закалки с отпуском при соблюдении рекомендованных ГОСТом [4] температурных режимов, указанных в табл. 1.

По эксплуатационным характеристикам быстрорежущие стали делят на две группы: нормальной и повышенной производительности [1–3].

Быстрорежущие стали нормальной производительности, к которым относятся вольфрамовая сталь P18 и вольфрамомолибденовая сталь P6M5, характеризуются теплостойкостью 615–620 °С, т.е. эти стали сохраняют твердость не ниже 58 HRC вплоть до температур 620 °С. Сталь P6M5 обладает лучшей обрабатываемостью давлением, шлифуемостью, прочностью и вязкостью. Сталь P6M5 в основном вытеснила сталь P18 и нашла применение при обработке цветных сплавов, чугунов, углеродистых и легированных сталей, а также некоторых теплоустойчивых и коррозионностойких сталей.

Таблица 1. Твердость после отжига и после закалки с отпуском

Марка стали	Твердость			Температура, °С	
	после отжига		после закалки с отпуском HRC _с , (HRC), не менее	закалки	отпуска
	HВ, не более	диаметр отпечатка, мм, не менее			
P18	255	3,8	63(62)	1270	560
P6M5	255	3,8	64(63)	1220	550
11P3AM3Φ2	255	3,8	64(63)	1200	550
P6M5Φ3	269	3,7	65(64)	1220	550
P12Φ3	269	3,7	64(63)	1250	560
P18K5Φ2	285	3,6	64(63)	1280	570
P9K5	269	3,7	64(63)	1230	570
P6M5K5	269	3,7	65(64)	1230	550
P9M4K8	285	3,6	65(64)	1230	550
P2AM9K5	285	3,6	65(64)	1200	540

Быстрорежущие стали повышенной производительности дополнительно легируются кобальтом и ванадием. Стали этой группы отли-

чаются повышенной твердостью (≥ 64 HRC), теплостойкостью 625–640 °С, износостойкостью, но уступают сталям нормальной производительности по прочности и пластичности.

Быстрорежущие стали, особенно стали высокой производительности, отличаются высокой стоимостью, поэтому наибольшее применение получила сталь Р6М5, в которой дорогостоящий вольфрам частично заменен более дешевым молибденом. Для уменьшения стоимости из быстрорежущей стали часто изготавливают только рабочую часть инструмента, которую прикрепляют к державке из углеродистой стали.

1. Термическая обработка быстрорежущих сталей

Вследствие большого содержания легирующих элементов охлаждение быстрорежущей стали после прокатки иликовки даже на воздухе вызывает повышение ее твердости, что затрудняет обработку резанием при изготовлении инструментов. Поэтому после обработки давлением быстрорежущая сталь обычно подвергается изотермическому отжигу при температуре 860–900 °С с последующим медленным охлаждением до 750 °С и выдержке при этой температуре до полного распада аустенита [3].

Структура отожженной быстрорежущей стали представляет собой мелкозернистый (сорбитообразный) перлит и карбиды, мелкие эвтектоидные и более крупные первичные, входившие ранее в состав ледебурита. Общее количество карбидов в отожженной стали составляет около 25 %. Сталь с такой структурой имеет твердость до 207–255 НВ и хорошо обрабатывается резанием.

Для получения требуемых свойств готового инструмента необходимо обеспечить максимальное насыщение мартенсита легирующими элементами посредством соответствующей термической обработки, что достигается закалкой и последующим трехкратным отпуском.

Быстрорежущие стали требуют нагрева под закалку до очень высокой температуры (табл. 1), что необходимо для перевода возможно большего количества труднорастворимых при нагревании легированных карбидов в твердый раствор (легированный аустенит). Если закалка стали будет проводиться от более низких температур, то карбиды не будут в большом количестве переведены в твердый раствор, а полученный в результате закалки мартенсит будет иметь недостаточную насыщенность легирующими элементами и не будет существенно отличаться от мартенсита низколегированной стали, не обладающего высокой красностойкостью.

Нагрев под закалку до высоких температур должен вызывать значительный перегрев стали и приводить ее в очень хрупкое состояние.

Однако этого не наблюдается из-за того, что присутствующие в большом количестве в аустените быстрорежущей стали труднорастворимые карбиды препятствуют росту аустенитного зерна.

Из-за низкой теплопроводности быстрорежущих сталей нагрев под закалку осуществляют медленно с прогревом при 850 °С. Для уменьшения окисления и обезуглероживания используют соляные ванны, что улучшает одновременно равномерность прогрева. Охлаждающей средой при закалке обычно является масло.

Структура закаленной быстрорежущей стали представляет собой высоколегированный мартенсит, нерастворенные избыточные карбиды и остаточный аустенит (около 30 %). Наличие остаточного аустенита ухудшает режущие свойства стали. Твердость этих сталей после закалки достигает 60–62 HRC. Однако инструмент из закаленной, но неотпущенной быстрорежущей стали обладает сравнительно низкой красностойкостью, что уже при разогреве до 300–400 °С приводит к его затуплению.

Для максимального удаления остаточного аустенита проводят отпуск при температуре 540–570 °С, вызывающий превращение остаточного аустенита в мартенсит, что приводит к увеличению твердости (табл. 1). Увеличению твердости способствуют и выделившиеся при отпуске мелкодисперсные карбиды легирующих элементов.

После однократного отпуска количество остаточного аустенита снижается до 10 %, что недостаточно для получения необходимых для режущего инструмента механических свойств. Поэтому после закалки быстрорежущая сталь подвергается трехкратному отпуску, в результате чего остаточный аустенит превращается в мартенсит и происходит дисперсное твердение за счет выделения карбидов. Твердость стали после трехкратного отпуска составляет 64–65 HRC, а ее структура состоит из мартенсита отпуска и карбидов.

2. Влияние температуры термообработки быстрорежущих сталей на их магнитные свойства при статическом перемагничивании

При изменении температуры закалки стали **P18** в интервале 1240–1260 °С ее твердость уменьшается с 65 до 63 HRC, а при дальнейшем увеличении температуры до 1280 °С практически не изменяется. Коэрцитивная сила H_c возрастает в интервале 1240–1260 °С и не изменяется в интервале 1260–1280 °С. Намагниченность насыщения M_s и максимальная магнитная проницаемость μ_m плавно уменьшаются в интервале температур 1240–1280 °С [5].

Изменение магнитных свойств стали Р18 после отпуска наиболее значительно в области 520–580 °С. Так, намагниченность насыщения M_s и остаточная магнитная индукция B_r в этом интервале резко возрастают, а затем их величины практически не изменяются. Максимальная магнитная проницаемость μ_m возрастает во всем интервале исследованных в работе температур отпуска. Коэрцитивная сила H_c после второго и третьего отпуска уменьшается во всем диапазоне температур отпуска, а после первого практически не изменяется с увеличением температуры отпуска до 640 °С и резко падает при 640–660 °С. Твердость стали Р18 возрастает при увеличении температуры отпуска до 560 °С и уменьшается в диапазоне температур 580–660 °С.

Ход зависимости магнитных и электрических свойств, а также твердости стали Р6М5 от температуры закалки показан на рис. 1, а [6]. Максимальная магнитная проницаемость μ_m в интервале 1000–1100 °С практически не изменяется, затем возрастает при температуре закалки 1150 °С и снова уменьшается. Намагниченность насыщения M_s нечувствительна к повышению температуры закалки и только после 1200 °С наблюдается ее рост. Коэрцитивная сила H_c растет в интервале до 1050 °С, далее ее значение стабилизируется, затем в интервале 1175–1240 °С возрастает и при дальнейшем повышении температуры закалки уменьшается. Удельное электрическое сопротивление ρ возрастает с повышением температуры закалки до 1260 °С и затем спадает. Твердость монотонно возрастает в интервале 1000–1260 °С, далее ее значение стабилизируется.

После отпуска закаленной стали Р6М5 (рис. 1, б) коэрцитивная сила H_c и удельное электрическое сопротивление ρ убывают во всем интервале изменения температур отпуска. Максимальная магнитная проницаемость μ_m практически не изменяется при повышении температуры до 500 °С, затем возрастает и снова не изменяется в интервале 540–600 °С, а после этого возрастает вне зависимости от числа отпусков. Намагниченность насыщения M_s после первого и второго отпусков спадает в интервале температур отпуска до 450 °С, затем резко возрастает в интервале 450–550 °С и после практически не изменяется. Третий отпуск делает намагниченность насыщения практически нечувствительной к повышению температуры отпуска. Твердость в интервале 400–550 °С после первого и второго отпуска возрастает, после третьего не изменяется, а затем резко уменьшается вне зависимости от числа отпусков.

Для кобальтсодержащей быстрорежущей стали Р9К5 [7] коэрцитивная сила H_c в интервале изменения температур нагрева под закалку 1200–1240 °С уменьшается с ростом температуры, дальнейшее увеличе-

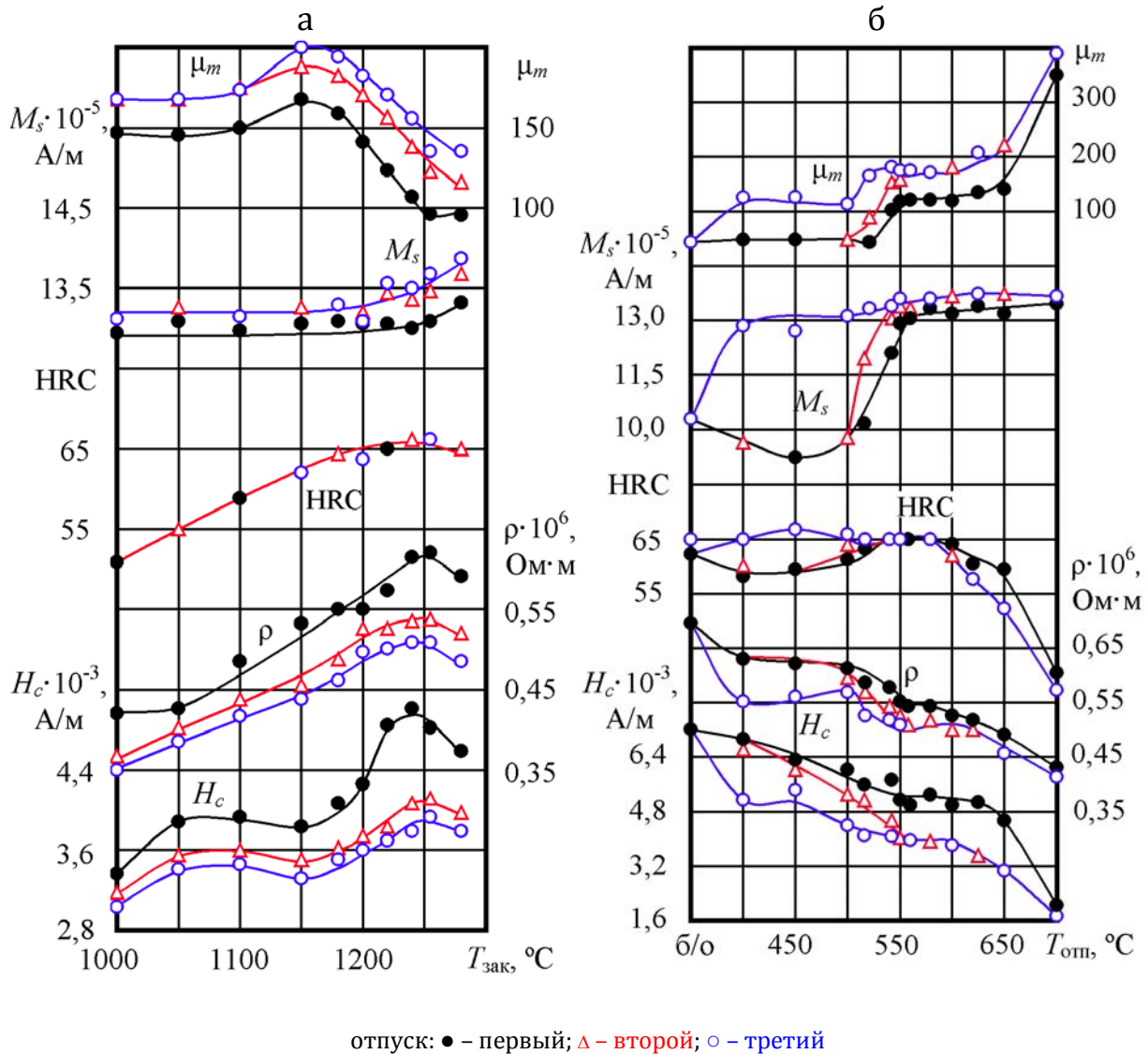


Рис. 1. Твердость и магнитные и электрические свойства стали P6M5 в зависимости от температуры закалки (а) и отпуска (б) [6]

ние температуры до 1280 °C не оказывает влияния на величину H_c . Аналогичным образом с ростом температуры нагрева под закалку изменяется и твердость этой стали. B_r и μ_m убывают немонотонно во всем исследованном интервале изменения температуры нагрева, ρ в интервале 1200–1220 °C не изменяется, а с дальнейшим ростом температуры нагрева монотонно увеличивается. Намагниченность насыщения M_s уменьшается в интервале до 1240 °C, затем стабилизируется и после температуры закалки 1260 °C опять убывает. Повышение температуры отпуска после закалки от 1240 °C значительно уменьшает величину ρ . Коэрцитивная сила H_c в диапазоне 520–620 °C нечувствительна к изменению температуры и уменьшается на концах диапазона температур от-

пуска. B_r , M_s и μ_m при температуре отпуска 520 °С резко возрастают в сравнении с закаленным состоянием и затем практически не изменяются, за исключением μ_m , которая несколько увеличивается при 640 °С. Твердость стали Р9К5 немонотонно убывает при повышении температуры отпуска в диапазоне 520–640 °С.

Коэрцитивная сила H_c и твердость ванадиевой быстрорежущей стали **Р9Ф5** нечувствительны к росту температуры закалки, в то время как B_r монотонно убывает, а ρ незначительно возрастает. M_s и μ_m резко уменьшаются с увеличением температуры закалки в интервале 1200–1260 °С, затем M_s не изменяется, а μ_m незначительно возрастает. С повышением температуры отпуска твердость, H_c и ρ стали Р9Ф5 уменьшаются, а μ_m наоборот возрастает. M_s и B_r увеличиваются при повышении температуры отпуска до 560 °С и затем практически не изменяются [7].

Анализ результатов исследований зависимости магнитных, электрических и механических свойств различных марок быстрорежущих сталей от температуры термообработки показал, что:

1. Использование в качестве информативного параметра максимальной магнитной проницаемости μ_m решает вопрос контроля качества как закалки, так и отпуска быстрорежущей стали Р18 во всем диапазоне температур.

2. Контроль качества закалки стали Р9К5 возможен по ρ , но чувствительность ρ не превышает 6 %. Стандартные магнитные характеристики не имеют однозначной связи с температурой отпуска, однако по величинам μ_m , B_r , M_s , и H_c возможен контроль недогрева под отпуск.

3. Контроль качества закалки стали Р9Ф5 рекомендуется вести по величине остаточной магнитной индукции B_r , а контроль качества отпуска затруднителен по всем магнитным параметрам.

4. Для стали Р6М5 контроль температуры нагрева под закалку во всем диапазоне температур неосуществим по всем рассмотренным магнитным характеристикам, что связано с их неоднозначной зависимостью от температуры нагрева под закалку, в то же время недогрев под закалку этой стали можно контролировать по величинам μ_m , ρ и H_c .

3. Влияние температуры закалки и отпуска на магнитные свойства стали Р6М5 в квазистатическом режиме перемагничивания

Выбор быстрорежущей стали **Р6М5** для исследований в квазистатическом режиме перемагничивания обусловлен тем, что данная марка стали по совокупности эксплуатационных свойств и стоимости нашла самое широкое применение в промышленности для изготовления режущих инструментов.

Образцы для исследований изготавливались в виде колец высотой 10 мм с внешним диаметром 17 мм и внутренним диаметром 13 мм. Химический состав исследованных образцов соответствовал ГОСТ 19265-73.

Первая партия образцов подвергалась закалке от различных температур в интервале 1000–1260 °С с выдержкой при заданной температуре 30 с и последующему отпуску при 560 °С в течение 3 часов в цеховых условиях ОАО "Оршанский инструментальный завод". Вторая партия образцов, закаленных от 1225 °С, подвергалась отпуску при разных температурах в интервале 300–700 °С в лабораторных условиях ОАО "Оршанский инструментальный завод". Режимы термообработки, структурное состояние и твердость образцов представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Режим термообработки, твердость и структура кольцевых образцов стали Р6М5 после закалки от различных температур

Параметры термообработки		Время выдержки		Структура	Твердость HRC
$T_{зак}, ^\circ\text{C}$	$T_{отп}, ^\circ\text{C}$	$t_{зак}, \text{с}$	$t_{отп}, \text{ч}$		
1000	560	30	3	Неполная закалка, бесструктурный мартенсит с остаточным аустенитом и с большим количеством нерастворившихся карбидов.	50
1050	560	30	3	Неполная закалка, бесструктурный мартенсит с остаточным аустенитом и с большим количеством нерастворившихся карбидов.	53
1100	560	30	3	Неполная закалка, бесструктурный мартенсит, остаточный аустенит, первичные (крупные) и вторичные мелкие карбиды.	57
1150	560	30	3	Мартенсит, остаточный аустенит и большое количество нерастворившихся карбидов. Границы зерен слабо различимы.	60
1170	560	30	3	Мартенсит, остаточный аустенит, первичные (крупные) и вторичные мелкие карбиды.	62
1200	560	30	3	Мартенсит, остаточный аустенит и большое количество не растворившихся карбидов.	63-63,5
1220	560	30	3	Мартенсит с остаточным аустенитом, первичные (крупные) и вторичные мелкие карбиды.	64-65
1240	560	30	3	Крупноигольчатый мартенсит, карбиды по границам исходных зерен аустенита, в стыках отдельных зерен ледебурит.	65-66
1260	560	30	3	Крупноигольчатый мартенсит, карбиды по границам исходных зерен аустенита, ледебурит.	66

Таблица 3. Режим термообработки, твердость и структура кольцевых образцов стали Р6М5 после отпуска при различных температурах

Параметры термообработки		Время выдержки		Структура	Твердость HRC
$T_{зак}, ^\circ\text{C}$	$T_{отп}, ^\circ\text{C}$	$t_{зак}, \text{с}$	$t_{отп}, \text{ч}$		
1225	300	30	1	Просматривается зерно аустенита, балл 11,0. Аустенит не превратился в мартенсит из-за низкой температуры отпуска.	62
1225	400	30	1	Аустенит, балл 11,0. Частично аустенит начал превращаться в мартенсит.	62
1225	500	30	1	Скрытоигольчатый мартенсит, остаточный аустенит, карбиды	64,5-65
1225	560	30	1	Весьма мелкоигольчатый мартенсит, небольшое количество остаточного аустенита, карбиды	64,5-65
1225	600	30	1	Весьма мелкоигольчатый мартенсит, карбиды скоплениями.	63
1225	700	30	1	Весьма мелкоигольчатый мартенсит, карбиды крупные, мелкие.	42

Измерения магнитных характеристик в квазистатическом режиме осуществлялись на автоматизированной установке УИМХ [8]. Напряженность магнитного поля изменялась от нуля до 40 кА/м, затем от 40 кА/м до минус 40 кА/м и снова до 40 кА/м по линейному закону с частотой 0,1 Гц, обеспечивая таким образом получение квазистатической начальной кривой намагничивания и ветвей петли гистерезиса испытуемых колец из быстрорежущей стали Р6М5.

На установке УИМХ определялись следующие магнитные характеристики:

– **полевые:** коэрцитивная сила H_c ; релаксационная коэрцитивная сила H_r ; напряженности магнитного поля $H_{\mu m}$ и $H_{\mu dm}$, при которых достигаются соответственно максимальное значение магнитной проницаемости μ_m по начальной кривой намагничивания и максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости μ_{dm} по петле гистерезиса;

– **намагниченности:** насыщения M_s ; максимальная M_m ; остаточная M_r ; $M_{\mu m}$, соответствующая максимуму дифференциальной магнитной проницаемости; релаксационная M_{Hr} ; остаточная M_{rc} после снятия поля, равного H_c ; M_{Hc} и M_{2Hc} при магнитном поле, равном коэрцитивной силе H_c и двум коэрцитивным силам $2H_c$ соответственно;

– **магнитные проницаемости:** начальная μ_n ; максимальная μ_m по начальной кривой намагничивания и максимальная дифференциальная

μ_{dm} по петле магнитного гистерезиса; релаксационная μ_r ; по кривой возврата μ_{rc} .

Результаты исследований изменения магнитных свойств стали Р6М5 в квазистатическом режиме перемагничивания в зависимости от температуры термообработки представлены на рис. 2 и 3.

Из них видно, что намагниченности M_m , M_r , $M_{\mu m}$, M_{Hr} , M_{rc} , M_{Hc} и M_{2Hc} (рис. 2, а и б) с повышением температуры закалки до 1150 °С практически не изменяются либо слабо возрастают, затем в интервале температур 1150–1220 °С они резко уменьшаются и при дальнейшем повышении температуры закалки незначительно увеличиваются. Намагниченность насыщения M_s не изменяется в интервале 1000–1100 °С, затем снижается при уменьшении температуры закалки до 1220 °С и снова возрастает при дальнейшем увеличении температуры закалки. Магнитные проницаемости, за исключением μ_m , с ростом температуры закалки изменяются аналогично как и намагниченности (рис. 2, в и г). Так, в интервале изменения температуры закалки 1000–1100 °С величины проницаемостей немного уменьшаются, при 1150 °С незначительно возрастают, в интервале 1150–1220 °С резко уменьшаются и затем снова возрастают. Максимальная магнитная проницаемость μ_m ведет себя с ростом температуры закалки иначе: практически не изменяется при росте температуры закалки до 1150 °С, затем уменьшается и при повышении температуры закалки свыше 1170 °С опять практически не изменяется. Полевые характеристики изменяются с ростом температуры закалки следующим образом: при росте температуры закалки до 1150 °С их величины возрастают, в интервале температур закалки 1150–1200 °С наблюдается резкий рост и затем спад (рис. 2, д). Изменение всех магнитных характеристик, измеренных в квазистатическом режиме, с ростом температуры закалки можно условно разбить на три области: незначительное изменение в интервале температур закалки 1000–1150 °С, резкое изменение магнитных характеристик при температурах закалки 1150–1220 °С и последующее незначительное увеличение при повышении температуры закалки в интервале 1220–1260 °С. Отсутствие изменений либо незначительные изменения при повышении температур закалки до 1150 °С объясняется одновременным действием двух факторов: снятием напряжений при превращении аустенита в мартенсит и выделением мелкодисперсных карбидов. Резкое изменение магнитных характеристик, измеренных в квазистатическом режиме намагничивания, при температурах закалки 1150–1220 °С можно объяснить выделением большого количества первичных и вторичных карбидов, препятствующих росту аустенитного зерна.

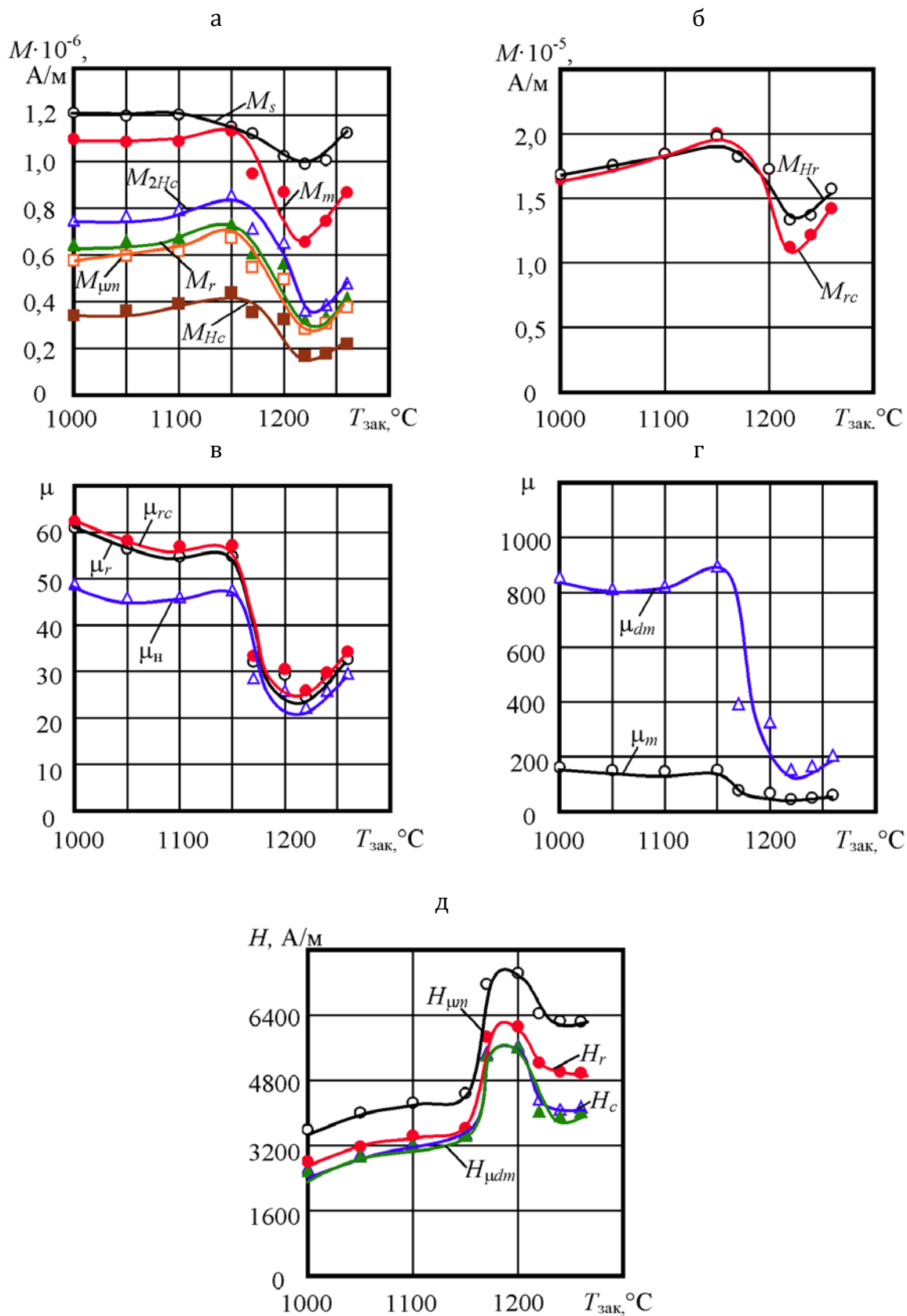


Рис. 2. Зависимость магнитных параметров стали Р6М5 от температуры нагрева под закалку

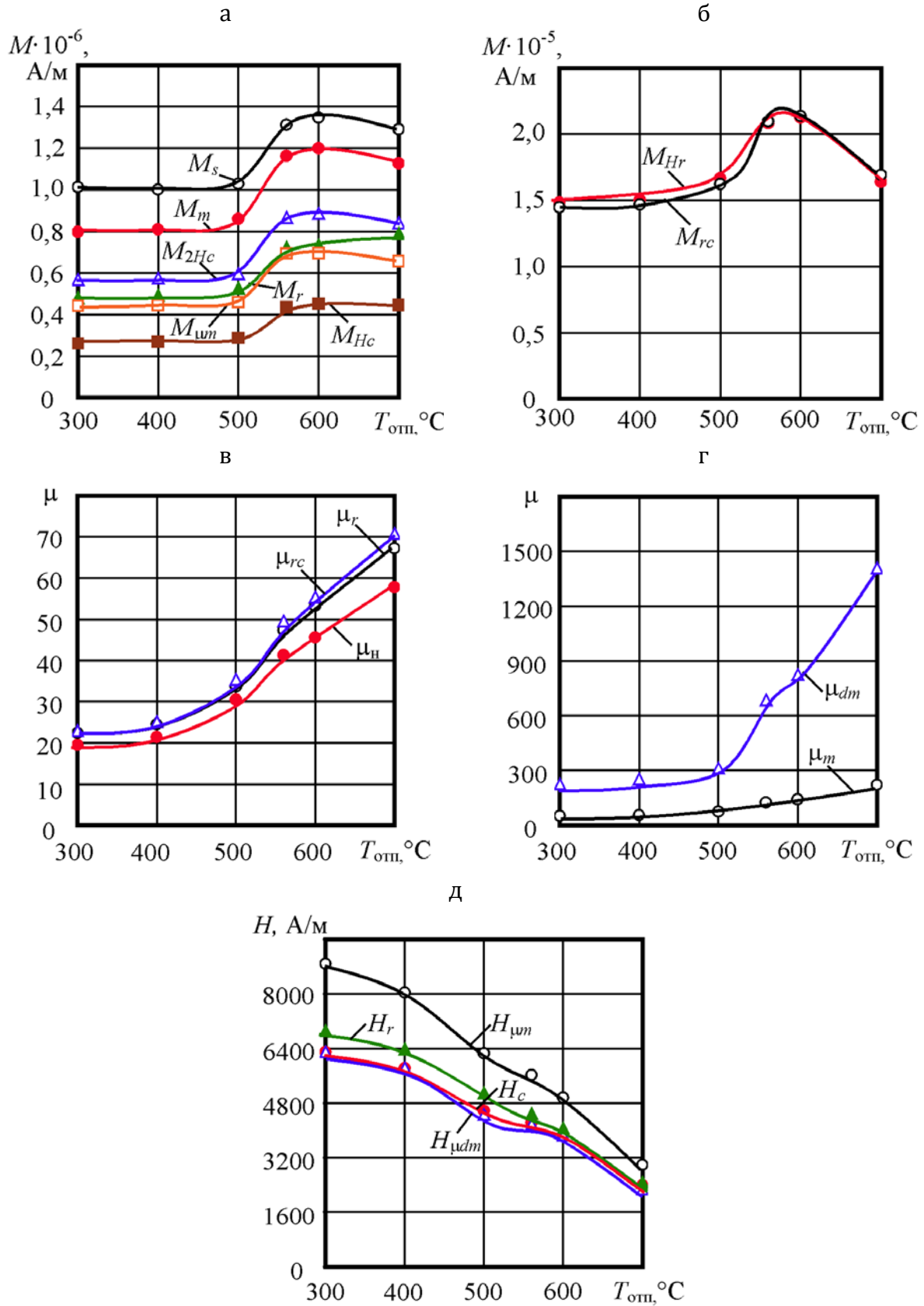


Рис. 3. Зависимость магнитных параметров стали Р6М5 от температуры отпуска ($T_{зак} = 1225 \text{ }^\circ C$)

При дальнейшем повышении температуры закалки происходит увеличение содержания мартенсита, что, в свою очередь, приводит к незначительным, но однозначным изменениям измеренных магнитных характеристик стали Р6М5.

С повышением температуры отпуска в интервале 300–500 °С величины намагниченностей практически не изменяются, в интервале 500–600 °С резко возрастают и затем уменьшаются (рис. 3, а и б). Резкий рост величин намагниченностей в интервале 500–600 °С можно объяснить распадом остаточного аустенита, а последующее уменьшение – коагуляцией карбидов. Для всех проницаемостей (рис. 3, в и г) характерна однозначная возрастающая зависимость с ростом температуры отпуска и высокая чувствительность в интервале изменения температуры от 500–600 °С. Полевые характеристики (рис. 3, д) также характеризуются однозначно убывающей зависимостью от температуры отпуска во всем диапазоне изменения температур. Это объясняется тем, что при повышении температуры отпуска до 500 °С происходит снятие напряжений, а при повышении температуры отпуска свыше 500 °С – превращение остаточного аустенита в мартенсит. Кроме того, изменения всех полевых характеристик от температуры отпуска имеет высокую чувствительность (не ниже 10 А/(м·°С)).

Выводы

1. Контроль качества закалки стали Р9К5 возможен по ρ и μ_m , но чувствительность к изменению температуры нагрева под закалку мала. Контроль качества отпуска этой стали во всем диапазоне температур изменения отпуска невозможен ни по одному стандартному параметру.

2. Контроль качества закалки быстрорежущей стали Р6М5 невозможно осуществить по магнитным характеристикам, измеренным в квазистатическом режиме намагничивания.

3. Контроль качества отпуска быстрорежущей стали Р6М5 во всем диапазоне изменения температур возможен по величинам: коэрцитивной силы H_c ; релаксационной коэрцитивной силы H_r ; напряженностей магнитного поля $H_{\mu m}$ и $H_{\mu dm}$, при которых достигаются соответственно максимальное значение магнитной проницаемости μ_m по основной кривой намагничивания и максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости μ_{dm} по петле гистерезиса; по величинам магнитных проницаемостей, измеренных в квазистатическом режиме перемагничивания.

Список использованных источников

1. Инструментальные стали. Справочник. – М.: Металлургия, 1977. – 168 с.
2. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1978. – 527 с.
3. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1978. – 648 с.
4. ГОСТ 19265–73. Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 22 с.
5. Чудновская Л.А., Купалова И.К. Магнитные характеристики инструментальных сталей в различных структурных состояниях. – В кн. Физические методы исследования и контроля структуры инструментальных сталей. – М.: Машгиз, 1963, с. 5–39.
6. Кузнецов И.А., Немков В.Л., Прохорова Е.Б. Магнитные, электрические свойства и твердость быстрорежущих сталей Р6М3 и Р6М5 после различных термических обработок. – Дефектоскопия, 1981, № 8, с. 27–33.
7. Купалова И.К. Магнитный контроль качества закалки и отпуска быстрорежущих сталей. – Физика металлов и металловедение, 1964, т. 18, вып. 1, с. 39–46.
8. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик материалов и изделий. – Дефектоскопия, 2007, № 3, с. 12–25.

Статья поступила в редакцию 05.03.13

СОЗДАНИЕ ОПОРНОГО СИГНАЛА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Realization of the reliable echo-signal in ultrasonic measurements

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Сергеева О.С.

Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Sergeeva O.S.

Рассмотрены новые возможности создания опорного сигнала при проведении ультразвукового контроля объектов поверхностными и пластинчатыми волнами на основе использования двух типов искусственных отражателей звука (ОЗ). Первый из них – контактный ОЗ – представляет собой твердое тело с определенными акустическими свойствами, устанавливаемое на объект через тонкий слой контактной смазки и оппозитно источнику излучения-приема акустических волн. Второй же тип отражателей – магнитожидкостный ОЗ – содержит размещенное над объектом отражающее звук тело и удерживаемую источником магнитного поля у его отражающей поверхности магнитную жидкость, обеспечивающую акустический контакт с объектом. Проведен анализ особенностей акустического тракта рассмотренных ОЗ при ультразвуковом контроле или измерениях поверхностными волнами в режиме эхо. В широком диапазоне изменения концентрации магнитной жидкости (0-27%) получены экспериментальные данные по коэффициенту ослабления ПАВ, проходящей через границу жидкость-металл (сталь, алюминий). Установлены зависимости коэффициентов отражения и прохождения ПАВ через область с акустической нагрузкой, создаваемой контактным ОЗ, в зависимости от удельного акустического сопротивления контактирующих тел, наклона отражающей границы по отношению к направлению распространения ПАВ, геометрии контактного слоя жидкости. Даны рекомендации по использованию указанных типов ОЗ.

New possibilities of the reliable echo-signal realization in ultrasonic evaluation of the solid objects by surface (SW) and plate waves, applying of two types of the artificial sound reflectors (SR), are studying. The first one of them is a contact SR which is a solid of determined acoustical properties put on the object to be tested with thin contact fluid layer oppositely to ultrasonic angle probe to radiate and receive SW. The second one - is magnetically-fluid SR, which consist of solid to reflect sound and magnetic fluid held by magnetic field between SR-solid and the object to be tested. The feature analysis of the echo-acoustical path in ultrasonic evaluation by using SW has been made. We obtained experimental data of an attenuation coefficient of the SW propagation through interface

boundary magnetic fluid–metal (St, Al) vs. magnetic particle concentration (0–27%) in fluid. Coefficients of SW reflection and propagation through the interface surface of the contact solid SR and metal specimens vs. its acoustical impedance, angle of the SW propagation to SR reflection boundaries and vs. geometry of contact fluid layer were determined. Recommendation for the former SR types using in practices have been made.

Введение

Рассматриваемые в работе отражатели звука (ОЗ) по отношению к распространяющимся ПАВ (а также волнам Лэмба) представляют собой акустическую нагрузку (АН), приводящую к трансформации и отражению мод, что является предметом исследований прикладной акустики [1]. Представляет интерес использовать эти эффекты в различных методиках для создания искусственных отражателей опорного сигнала, повышающих надежность акустического контроля объектов различной геометрии на наличие в них несплошностей, а также – для измерения скорости поверхностных и других типов мод. Для получения полного представления об акустическом тракте при проведении ультразвукового контроля или измерений с использованием рассматриваемых ОЗ, необходимо знать ряд указанных выше закономерностей прохождения и отражения ультразвуковых волн. Несмотря на значительное число работ, посвященных этой теме, существует ряд проблем, требующих дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Во многих случаях создание опорного сигнала необходимо для выявления и сравнительной оценки размеров дефекта, и в традиционных УЗ-методиках для этих целей в качестве отражателя сигнала упругой моды (объемной, поверхностной, пластинчатой и др.) служит оппозитная поверхность объекта, двугранный угол, образованный поверхностями объекта, а также характерные технологические выступы или отверстия в объеме объекта [1, 2]. Однако, не всегда можно воспользоваться такими отражателями при ультразвуковых измерениях как в силу их отсутствия, так и из-за наличия нестабильной отражающей способности, вызванной отклонениями в области отражения УЗК. Так, в ряде случаев могут использоваться искусственные отражатели, что реализовано, например, в методе гониометра [2, 3], где ОЗ ориентируют плоской отражающей поверхностью под углом

$\beta = \arcsin \frac{C_{ПАВ}}{C_L}$ к контактной поверхности объекта. При этом обеспечива-

ется максимум преобразования продольной волны (скорость в иммерсионной среде C_L) в поверхностную волну ($C_{ПAB}$) [4]. Повышение стабильности и надежности измерений достигается с использованием в качестве акустической контактной среды магнитной жидкости (МЖ), удерживаемой полем магнитной системы [5]. При зондировании объекта с грубо обработанной поверхностью объемными волнами иногда с оппозитной стороны объекта, погруженного в воду, располагают хорошо отражающее звук тело.

Таким образом, исходя из анализа известных способов создания опорного сигнала, следует заключить об ограниченности их использования как в методиках контроля объектов амплитудными методами, так и при ультразвуковых измерениях скорости поверхностных (пластинчатых) волн. Для создания опорного акустического сигнала при ультразвуковых измерениях и контроле нами предлагается использовать два типа отражателей, отличающихся по функциональному назначению и способу создания акустического контакта. Первый из них – контактный ОЗ – представляет собой твердое тело, устанавливаемое на объект через тонкий слой контактной смазки, так что на границе сред обеспечивается скользящая граница, т.е. $\sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2} = 0$, $\sigma_{n1} = \sigma_{n2}$, где $\sigma_{\tau i}$ и σ_{ni} – тангенциальная и нормальная составляющие тензора напряжений.

1. Контактные отражатели звука

Принципиальная схема работы устройства с контактным отражателем поясняется на рисунке 1, где вначале предполагается, что контактная поверхность объекта плоская. Причем, как будет показано ниже, ближняя к ПЭП и дальняя от него границы контакта АН с объектом, являющиеся локальными зонами отражения и трансформации ПАВ, могут иметь сложный вид. Если же ОЗ представляет собой параллелепипед, то эти границы являются отрезками прямых.

Как показывают наши предварительные исследования и известные данные других авторов [4, 6], прохождение волны Рэлея через акустическую нагрузку сопровождается следующими процессами. Так, если выполняется условие $C_{ПAB} > C_{ж} < C_t$, где C_t соответствует скорости поперечной волны в материале ОЗ, то вдоль границы сред и с локализацией энергии ПАВ в обеих средах порядка длины волны распространяется волна Стоунли [4, 7]. Последняя трансформируется из

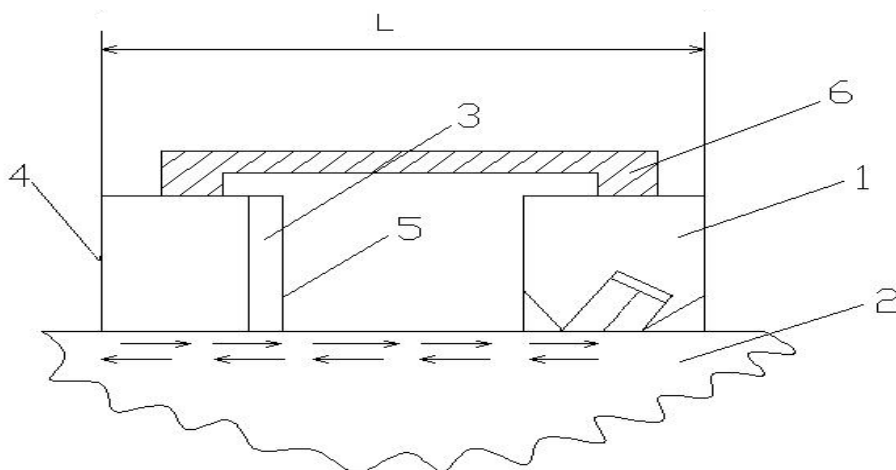


Рис. 1. Схема ультразвукового устройства с контактнм отражателем звука (ПЗВ): 1 - ПЭП; 2 - объект контроля; 3 - ОЗ; 4 - задняя отражающая звук граница; 5 - передняя отражающая звук граница; 6 - соединительная планка

волны Рэлея на передней границе ОЗ с соответствующим коэффициентом прохождения (или трансформации) по амплитуде $D_{R,St}$ и отражения волны Рэлея R_1 . При пересечении же задней границы ОЗ произойдет обратный процесс, характеризуемый коэффициентом прохождения $D_{St,R}$ и отражения волны Стоунли R_2 . Если пренебречь диссипативными процессами и возможным пространственным расхождением волны, то амплитуда ПЗВ A_p , прошедшая через ОЗ вдоль поверхности образца, и амплитуда A_{r2} , принятая ПЭП после отражения от задней границы, а также отношение амплитуды волны, отраженной от передней границы A_{r1} , имеют вид:

$$A_p \sim D_{R,St} D_{St,R}, \quad A_{r2} \sim A_p R_2, \quad A_{21} = A_{r2} / A_{r1} = D_{R,St} D_{St,R} R_2 / R_1. \quad (1)$$

При этом уравнение баланса потока энергии волны может быть представлено:

$$W_R / W_{R0} = \tilde{D}_{R,St} + \tilde{R}_1 + \tilde{D}_{R,R^*} + \Delta_1 = \tilde{D}_{R,R^*} + \tilde{R}_1 + \tilde{D}_{R,St} (\tilde{D}_{St,R} + \tilde{D}_{St,R^*} + \tilde{R}_2) + \Delta_2 + \Delta_1, \quad (2)$$

где $\tilde{D}_{R,St}$ и $\tilde{D}_{St,R}$ - коэффициенты прохождения по энергии ПЗВ, распространяющейся вдоль контактной поверхности объекта, через переднюю и заднюю границу ОЗ соответственно; \tilde{D}_{R,R^*} и \tilde{D}_{St,R^*} - коэффициенты, характеризующие прохождение энергии ПЗВ в виде волны Рэлея по ближайшей и дальней вертикальной стенке ОЗ соответственно;

\tilde{R}_1 и \tilde{R}_2 – коэффициенты отражения ПАВ от передней (волна Рэлея) и задней (волна Стоунли) границы отражателя; Δ_1 и Δ_2 – неучтенные потери энергии, обусловленные генерацией сопутствующих упругих мод при изменении граничных условий распространения моды.

Таким образом, прохождение ПАВ через акустическую нагрузку сопровождается рядом процессов, связанных с трансформацией мод, отражением и распространением не только вдоль контактной поверхности, но и перпендикулярно ей. Зная приведенные выше коэффициенты, входящие в уравнение акустического тракта (1) и баланса потоков энергии упругих мод (2), представляется возможным оценить и выбрать наиболее оптимальные условия согласования контактирующих материалов (объект-ОЗ) и форму ОЗ, обеспечивающую использование его для создания опорного сигнала при акустических измерениях. Необходимо отметить, что вопросы аналитического описания прохождения ПАВ через контактные ОЗ и отражения представляют значительные трудности из-за сингулярности решений в окрестности разрыва граничных условий. Поэтому и были проведены экспериментальные исследования особенностей отражения и прохождения ПАВ через контактные ОЗ при различном соотношении импедансов контактирующих сред. Ниже представлены результаты исследований особенностей отражения ПАВ от передней и задней отражающей границы ОЗ при варьировании угла падения ПАВ, толщины контактного зазора и акустической нагрузки. На данном этапе в качестве базового объекта настоящих исследований взят образец из алюминия. Необходимо отметить, что часть подобных исследований в высокочастотной области УЗК были выполнены в работе [6], где между нагрузкой и объектом создавался “сухой” акустический контакт.

Результаты экспериментальных исследований. Исследования проведены согласно схеме, приведенной на рисунке 1. Источником и приемником электрических сигналов служили блоки серийного дефектоскопа, а измерение амплитуды отраженных импульсов производилось методом сравнения на двухлучевом осциллографе, где опорный электрический сигнал создавался генератором Г4-107. В качестве ОЗ или акустической нагрузки использованы образцы из алюминия, стали и плексигласа в виде параллелепипеда, устанавливаемого на плоскую поверхность образца через тонкий слой трансформаторного масла. При этом передняя и задняя границы контакта нижней грани ОЗ с объектом (являющиеся локальными зонами отражения и трансформации ПАВ) перпендикулярны плоскости падения ПЭП. Толщина

контактной прослойки между контактной плоскостью ОЗ и объектом выставлялась с помощью эталонных пластин с погрешностью не более 2–3 мкм. Исследование влияние угла падения ПАВ на отражающие звук границы φ производилось путем последовательной установки идентичных ПЭП (по кругу) относительно отражающей звук границы и симметрично нормали к ней.

На рисунках 2 и 3 представлены данные исследования влияния угла падения ПАВ φ на переднюю и заднюю границы ОЗ и толщины контактного слоя на амплитуду отраженного от передней и задней границы ОЗ сигнала.

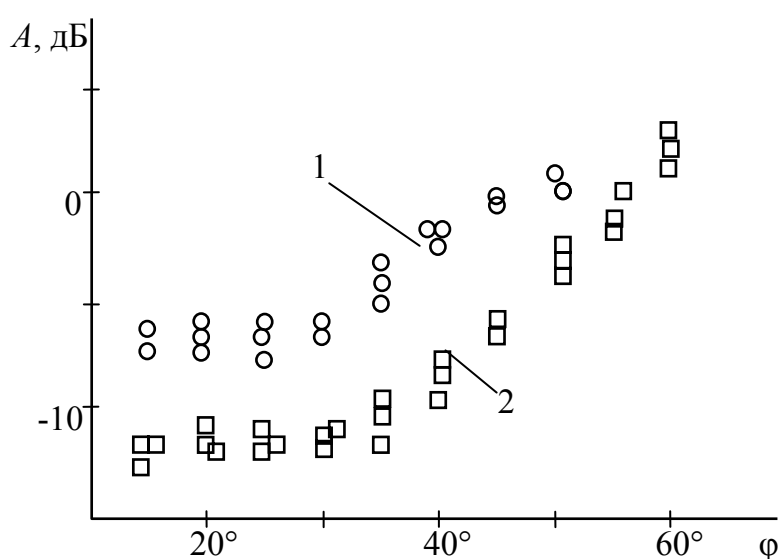


Рис. 2. Отражение ПАВ от передней (1) и задней (2) границ ОЗ, контактирующего с образцом через жидкий слой, в зависимости от угла падения ПАВ φ : образец алюминиевый, ОЗ – стальной

Как видно, увеличение φ в диапазоне $35^\circ = \varphi^* > \varphi \geq 0$ несущественно (1–2 дБ) сказывается на амплитуде отраженных сигналов $A_{ri} = \{A_{r2}, A_{r1}\}$, и при $\varphi > \varphi^* \leq 60^\circ$ A_{ri} возрастают практически в 2–3 раза.

Что касается влияния толщины контактной прослойки на величину A_{ri} (рис. 3), то в случае, когда материал образца алюминий, то $A_{r1}(h_\lambda)$ – преимущественно убывающая функция, а $A_{r2}(h_\lambda)$ – возрастающая, если ОЗ изготовлен из металла. При этом для фиксированной толщины контактной прослойки A_{21} тем больше, чем больше импеданс материала ОЗ. Когда же ОЗ выполнен из плексигласа, то $A_{ri}(h_\lambda)$ – преимущественно монотонно убывающие функции, а их отношение (A_{21}) возрастает до 10 дБ.

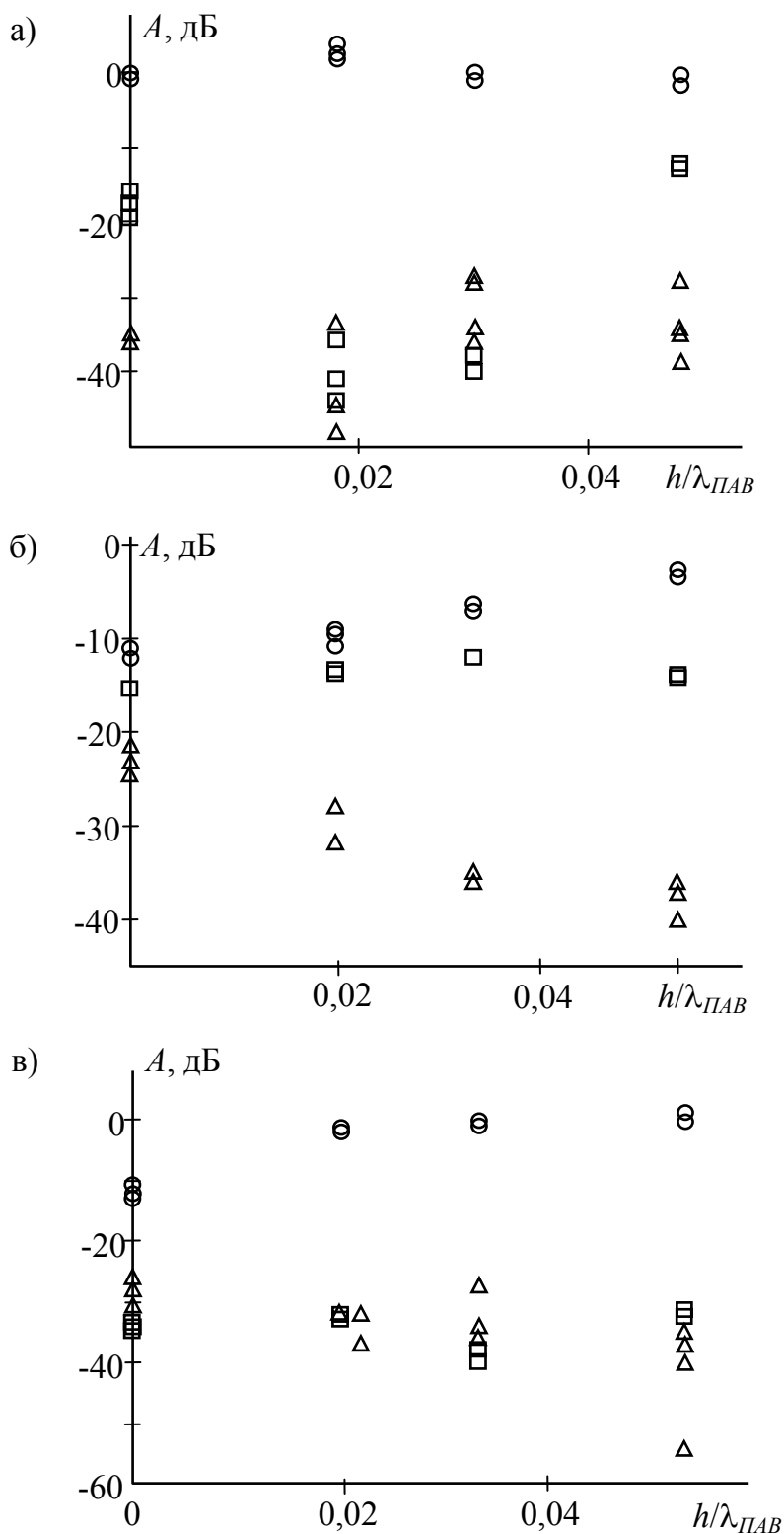


Рис. 3. Влияние толщины контактного слоя на отражение ПАВ от разных границ контакта акустической нагрузки из стали (а, в) и алюминия (б) с образцом из стали (а) и алюминия (б, в) на частоте 1,8 МГц; □ – свободная граница; Δ – передняя граница нагрузки; ○ – задняя граница нагрузки

Необходимо отметить, что увеличение h_λ даже в указанном выше сравнительно небольшом диапазоне может вызвать существенное изменение не только амплитудных параметров волны, но и спектральных, сопровождающееся увеличением длительности импульса и его формы, что, естественно, может привести к значительным погрешностям при проведении измерений скорости звука ПАВ. Однако этот фактор может быть не столь существенным при использовании отражающей границы АН для создания опорного сигнала при выявлении поверхностных дефектов.

Исследования также показали, что наличие акустической нагрузки вызывает уменьшение скорости ПАВ (трансформированной в волну Стоунли) на величину $\sim 0,5-0,7\%$, что согласуется с данными работы [6].

Следует также обратить внимание на тот факт, что в случае выполнения образца из стали и $h_\lambda = h_{\text{ПАВ}}/\lambda_{\text{ПАВ}} \rightarrow 0$ (скользящая граница), отношение A_{21} , являющееся важной характеристикой ОЗ при создании опорного сигнала для измерения скорости ПАВ, принимает максимальное значение и достигает 30–35 дБ.

Таким образом, исследования показали, что независимо от варьирования угла падения ПАВ на ОЗ, толщины контактной прослойки ($h_\lambda = 0-0,05$), материалов образца (сталь, алюминий) и акустической нагрузки (сталь, алюминий, плексиглас) амплитуда отраженного сигнала от передней границы ОЗ существенно меньше, чем от задней границы. Причем отношение этих амплитуд A_{21} может достигать 30–40 дБ.

Исходя из полученных данных, можно заключить, что наилучшая эффективность использования ОЗ для создания опорного сигнала при ультразвуковых измерениях достигается в том случае, когда исследуемый объект стальной. Именно в этом случае наблюдается высокая стабильность опорного сигнала, а влиянием отраженного от передней границы ОЗ сигнала A_{r1} можно в большинстве случаев пренебречь. Однако при прецизионных измерениях скорости ПАВ необходимо минимизировать шумовой фон, создаваемый отраженным от передней границы ОЗ сигналом. Как следует из результатов исследований, для этого рекомендуется изменить геометрию передней границы ОЗ таким образом, чтобы направить отраженный от нее сигнал вне зоны приема ПАВ.

Как показали опытные опробования ОЗ, последний может играть функцию весьма эффективного концентратора и рассеивателя энергии ПАВ.

2. Магнитожидкостные отражатели звука. Анализ особенностей акустического тракта при работе устройств с магнитожидкостным отражателем звука

Магнитожидкостные отражатели звука (МОЗ), как и преобразователи с магнитожидкостным акустическим контактом [5], могут быть использованы для создания опорного сигнала при выявлении несплошностей на поверхности объекта или в пластинчатых материалах. МОЗ (рисунок 4) представляет собой заключенное в корпус тело, на отражающей поверхности которого с помощью магнитной системы удерживается МЖ-звукпровод. Последний представляет собой объем звукопроводной магнитной жидкости, удерживаемый полем между поверхностью объекта и отражателем.

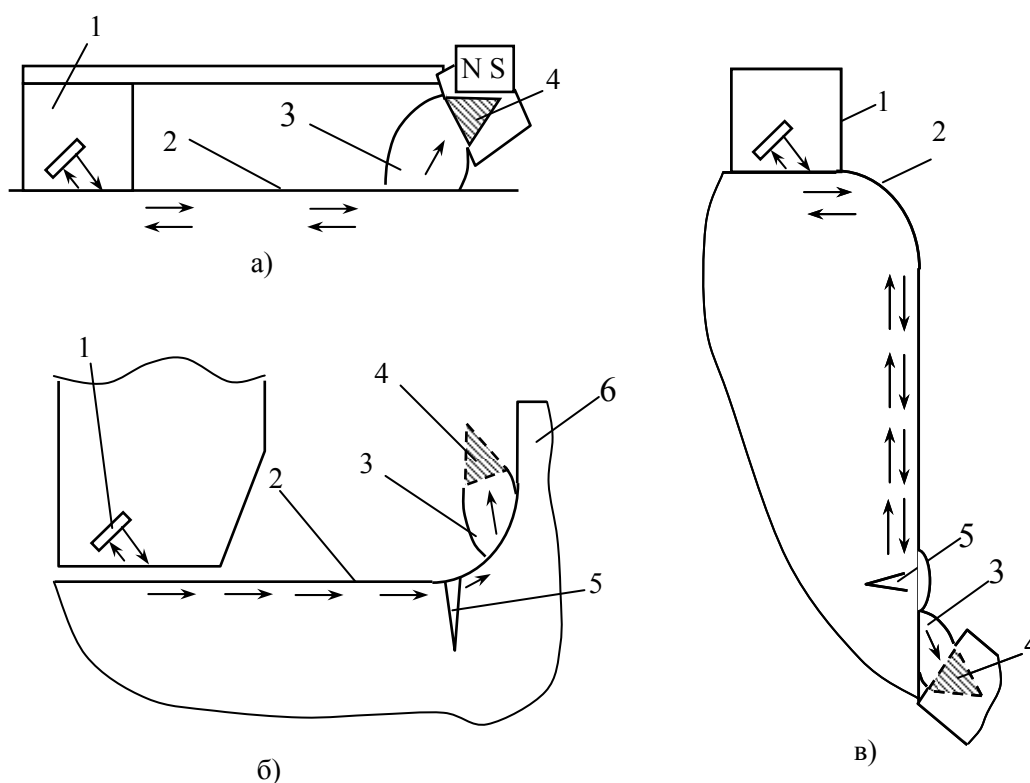


Рис. 4. Схемы построения акустических систем с магнитожидкостным отражателем звука при ультразвуковом контроле: 1 – ПЭП; 2 – поверхность объекта; 3 – МЖ; 4 – ОЗ; 5 – дефект; 6 – замковая зона авиационной лопатки

Суть его работы поясняется на примере контроля объектов поверхностными волнами, где в качестве источника-приемника волн используется наклонный преобразователь.

При поиске поверхностных дефектов возбуждаемые ПАВ проходят контролируемый участок поверхности, затем на границе объект-МЖ они трансформируются в продольные волны, распространяющиеся под углом $\beta = \arcsin \frac{C_{ПАВ}}{C_{МЖ}}$ в жидкости, отражаются от отражателя и после трансформации в ПАВ возвращаются обратно на ПЭП. Как и в традиционных методиках УЗ-контроля, о наличии дефекта судят по появлению на временной развертке дефектоскопа импульса, расположенного во временном промежутке $0 < t_D < t_0$, что соответствует расстоянию $0 < L_d < L_0$, где индекс D соответствует дефекту, а 0 – координате ввода трансформированной волны в МЖ. В процессе контроля возможны вариации амплитуды опорного сигнала из-за нестабильности акустического контакта ПЭП, изменения структуры материала, а также возможны изменения амплитуды из-за пространственного изменения положения отражателя. В особенности это существенно в том случае, когда отражающая звук поверхность плоская. Как показано в работе [8], отклонение угла падения волны β от оптимального β_R всего на $1-2^\circ$ приводит к уменьшению амплитуды опорного сигнала на 7–14 дБ. В процессе сканирования объекта и одновременного перемещения ПЭП с МЖ-отражателем возможно также проявление нестабильности акустического сигнала ПЭП из-за непостоянства структуры материала, наличия на нем загрязнений, рисок и др. Поддержание постоянства амплитуды опорного сигнала достигается путем введения обратной связи, хотя возможно проведение измерений и без этого.

На рисунке 4 (б, в) представлены некоторые принципиальные схемы применения устройств, обеспечивающих локальный ввод УЗК в объекты, и уменьшения влияния структуры материала, макро- и микрогеометрии контактной поверхности на акустические показания путем создания высокостабильного опорного сигнала. При этом используются комбинированные варианты, сочетающие традиционные подходы с предложенным. В частности, на рисунке 4а) изображена наиболее простая конструкция ультразвукового устройства, содержащего наклонный ПЭП волн Рэлея (1), отражатель упругих волн (4), соединенных жесткой опорной планкой, которые установлены на исследуемом объекте.

При наличии поверхностного дефекта в поисковой зоне с отра-

жающей способностью или коэффициентом отражения по амплитуде R_d амплитуда отраженных волн от дефекта P_d и опорного сигнала P_{Ld} примут вид:

$$P_d = F(L_d) K P_0 R_d \exp(-2 \int_0^{L_d} \alpha dx); P_{Ld} = F(L_{Ld}) K P_0 R_0 (D_d)^2 \exp(-2 \int_{L_d}^L \alpha dx), \quad (3)$$

где K – коэффициент, характеризующий нестабильность акустического контакта и электронной схемы возбуждения–приема УЗК; R_0 – коэффициент отражения от отражателя с эффективной шириной $2a$, зависящий от акустических свойств МЖ, отражающего тела и его формы; α – коэффициент ослабления волны, вызванного механизмами рассеяния и поглощения волнового поля; $F(L_d)$ и $F(L_{Ld})$ – функции ослабления и расхождения акустического сигнала с расстоянием.

В некоторых случаях можно положить $D_d \approx 1 - R_d$. Тогда из (3) получим

$$P_{Ld}^* = P_d / P_{Ld} \approx \frac{F(L_{Ld}) R_d}{F(L_d) (1 - R_d)^2} \exp(-2 \int_{L_d}^L \alpha dx). \quad (4)$$

Как можно легко показать из (4), при достаточной близости искусственного и реального отражателей друг к другу достигаются наилучшие условия “отстройки” от нестабильных внешних факторов и наоборот.

При конструировании отражателя учитываются возможные изменения положения его отражающей поверхности относительно контактной поверхности объекта, вызванные следующими факторами: несовершенством геометрии объекта; особенностями ручного контроля и трудностями идеальной пространственной фиксации источника УЗК при сканировании; необходимостью не только перемещать ПЭП по заданной траектории, но и осуществлять его качение в горизонтальной плоскости. Исследование акустического тракта при работе предложенного устройства показало, что для создания опорного сигнала могут быть использованы отражающие звук тела, имеющие не только плоскую, но и криволинейную поверхность, как с положительным, так и отрицательным радиусом кривизны.

Очевидно, что в случае, когда контролируется объект с невысоким затуханием, а мощность ПЭП достаточно высока, то в качестве оптимальной формы отражающего тела может быть использована сфера. Если эта сфера достаточно мала, то смещение ее по вертикали на величину Δz приведет к относительному изменению амплитуды отраженного сигнала

$$A_r \sim \exp[2 \Delta z (\alpha_{RМЖ} \operatorname{ctg} \beta_R - \alpha_{МЖ})], \quad (5)$$

где $\alpha_{МЖ}$ и $\alpha_{RМЖ}$ – коэффициенты ослабления волны, обусловленные прохождением ПАВ в МЖ и вдоль границы объект–МЖ соответственно. Данные для $\alpha_{МЖ}$ получены нами ранее в работе [5], а для оценки $\alpha_{RМЖ}$ были проведены экспериментальные исследования, поясняемые рисунком 5, где представлена схема экспериментальной установки и зависимость затухания ПАВ от удельного акустического сопротивления МЖ.

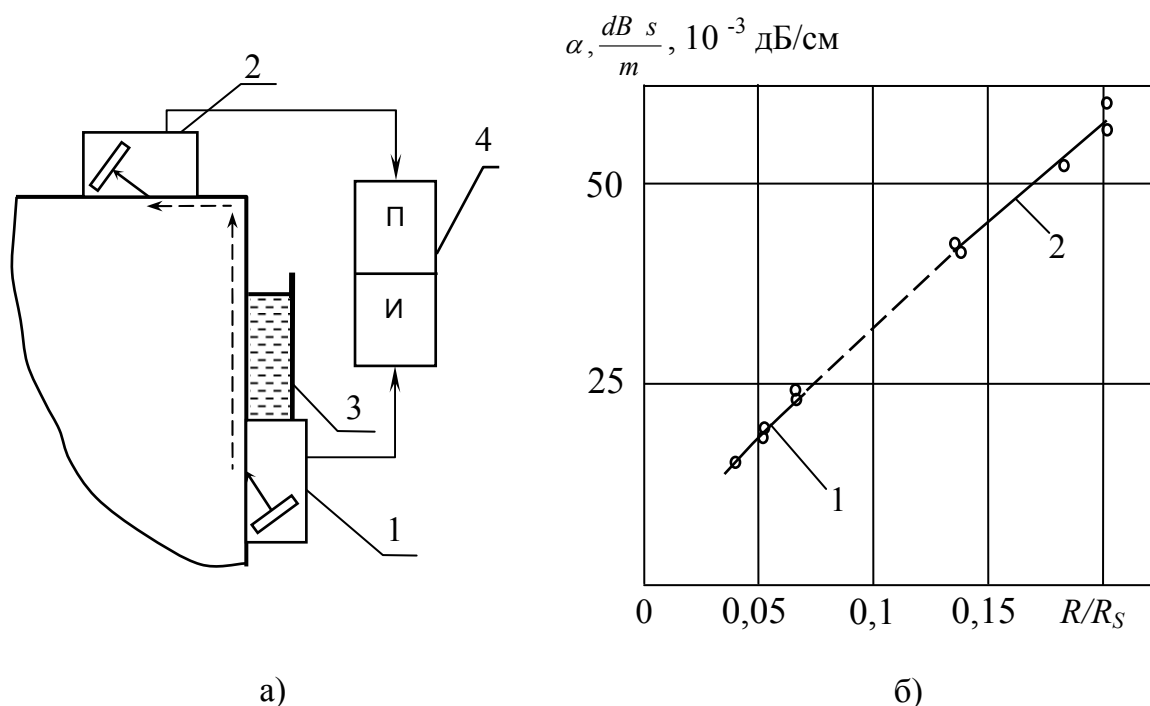


Рис. 5. Схема экспериментальной установки (а) и зависимость затухания ПАВ от удельного акустического сопротивления МЖ (б), полученных в частотном диапазоне $f=1-4$ МГц; а) 1, 2 – излучатель и приемник ПАВ; 3 – МЖ; 4 – электронный блок; б) металл: сталь (зависимость 1); алюминий (2); $\delta_\lambda = 20 \lg(P/P_0) (l \cdot \lambda)^{-1}$

Экспериментальные исследования показали, что функция прохождения зондирующего сигнала по указанной схеме для отражающего тела типа сфера или плоскость является квазилинейной функцией концентрации магнетика в растворе коллоида. При этом максимальная стабильность опорного сигнала обеспечивается для условий, когда в качестве МОЗ служит сфера. Применение таких систем наиболее рационально в тех случаях, когда исследуемый объект имеет достаточно сложный рельеф и изменчивую структуру на пути ожидаемого прохождения звуковой волны.

На рисунке 4 приведены некоторые схемы устройств с МОЗ для контроля трещин на поверхности двух объектов, включая авиационные лопатки и сварные швы. Применение МОЗ позволяет на 6 – 8 дБ и более снизить нестабильность опорного сигнала, что, как правило, вызвано некоторым различием геометрии места отражения ПАВ от лопатки к лопатке.

Разработанная нами миниатюрная конструкция ПЭП содержит три ПЭП, выполненных в одном корпусе и расположенных друг за другом. При этом два ПЭП работают в раздельно-совмещенном режиме, а третий служит для контроля излучаемого сигнала ПАВ. При этом обеспечиваются оптимальные условия разбраковки лопаток в результате следующего: а) локальный ввод (прием) УЗК производится в области, примыкающей к переходной зоне лопатки, где образуются дефекты, причем с противоположной стороны этой зоны располагается МОЗ; поскольку путь пробега волны мал, то существенно уменьшается шумовой фон, вызванный крупнозернистой структурой металла. В схеме в) реализуется вариант контроля сварного шва, расположенного в труднодоступном месте. В этой ситуации контроль шва производится поверхностными волнами. А сам преобразователь с отражающим устройством перемещается по круговой траектории. Согласно указанным выше рекомендациям, МОЗ расположен вблизи сварного шва. При этом признаком появления дефекта служит пропадание или ослабление опорного сигнала с одновременным появлением дополнительного сигнала, лежащего на временной шкале ближе к началу развертки дефектоскопа.

Литература

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль. / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге; под ред. чл.-корр. РАН В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 832 с.
2. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
3. Баев А.Р., Майоров А. Л., Тищенко М.М., Асадчая М.В. Ультразвуковой контроль качества поверхностного упрочнения на основе метода гониометра / Материалы 3-й международной научно-технической конференции «Приборостроение-2010», г. Минск, БНТУ, 10-12 ноября 2010 г. – С. 28–30.
4. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Викторов. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
5. Баев А.Р. Магнитные жидкости в технической акустике и неразрушающем контроле / А.Р. Баев, Г.Е. Коновалов, А.Л. Майоров; под ред. П.П. Прохоренко. – Минск, Беларуская навука, 2000. – 118 с.
6. Гуляев Ю.В., Крылов В.В., Бирюков С.В., Плесский В.П. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах / Москва: Наука, 1991. – 415 с.
7. Аббакумов К.Е., Коновалов Р.С. Влияние нарушения акустического контакта на распределение волн Стоунли вблизи границы твердых полупространств – Дефектоскопия, 2008, №3, с. 52–58.
8. Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Сергеева О.С., Коновалов Г.Е. Особенности возбуждения ПАВ в металлах с поверхностным упрочненным слоем // Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, №3.
9. Бреховских Л.М. Акустика слоистых сред / Л.М. Бреховских, О.А. Годин. – М.: Наука, 1989. – 412 с.
10. Баев А.Р., Майоров А.Л., Тищенко М.А., Асадчая М.В., Коновалов Г.Е. Способ ультразвукового контроля поверхности твердого тела Ультразвуковое устройство. Патент РБ на изобретение №1475, Б.И. №4, 2011. – С. 130–131.

Статья поступила в редакцию 25.03.13

**Шестой республиканский конкурс
«Лучший специалист неразрушающего контроля
Республики Беларусь 2013»**

С 27 мая 2013 года в Республике Беларусь состоится Шестой республиканский конкурс на присвоение звания «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь 2013» при поддержке Департамента по надзору за безопасным ведением работ в промышленности (Госпромнадзор), Института прикладной физики Национальной Академии Наук Беларуси (ГНУ ИПФ НАН Б), Белорусской ассоциации неразрушающего контроля и технической диагностики (БАНКиТД), журналов «Сварщик в Беларуси» и «Промышленная безопасность», Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Диатех», ООО «НДТ Инжиниринг».

1. Время и место проведения конкурса: с 27 по 31 мая 2013 года, регистрация - по адресу: г. Минск, ул. Аэродромная, 4а, ком. 37.

2. Цель конкурса – повышение уровня подготовки и обмен опытом специалистов в области неразрушающего контроля

3. Организатор конкурса – ООО «Научно-производственная компания «Сфера промышленной безопасности».

4. Номинации конкурса:

- визуальный и измерительный контроль (ВИК);
- ультразвуковой контроль (УЗК);
- ультразвуковая толщинометрия (УЗТ);
- радиографический контроль (РГГ);
- капиллярная дефектоскопия (КД);
- магнитопорошковая дефектоскопия (МПД);
- вихретоковый контроль (ВТК).

5. Лауреаты конкурса награждаются дипломами Белорусского промышленного форума и грамотами Белорусской ассоциации нераз-

рушающего контроля и технической диагностики и ценными призами, все участники конкурса отмечаются грамотами.

Участие в конкурсе по неразрушающему контролю (НК) засчитывается **ВСЕМ** участникам (физическим лицам) как прохождение **обязательной периодической аттестации**, согласно требованиям п.п. 8.5÷8.9 **ТКП 054-2007 (02300)** "Техническое диагностирование и продление назначенного ресурса (назначенного срока службы) безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах. Общие положения" и выдается соответствующее удостоверение.

6. Участие одного специалиста в номинации УЗК и РГГ составляет 400 000 белорусских рублей, в номинациях ВИК, ЦД, МПД, ВТК, УЗТ – 200 000 белорусских рублей, участие уполномоченного представителя в составе жюри – 500 000 белорусских рублей.

Цены указаны в бел. рублях без учета НДС.

В стоимость оплаты за участие в конкурсе командировочные расходы и бронирование гостиницы не учтены. Бронирование гостиницы организация, направляющая участника, осуществляет самостоятельно.

7. Организация, принявшая решение участвовать в конкурсе, направляет в адрес организатора конкурса – ООО "Научно-производственная компания "Сфера промышленной безопасности" 220007, г. Минск, ул. Аэродромная, 4а, ком. 37 (цоколь), тел./факс (017) 213 29 31 – **заявку** (форма - согласно приложению), на основании которой выставляется счет-фактура на участие в конкурсе.

8. Программа конкурса с указанием места и времени проведения отдельных номинаций высылается участникам за неделю до начала конкурса по факсу.

9. В теоретической части каждому конкурсанту необходимо:

- ответить на 15 общих вопросов (в виде тестов) по соответствующему методу НК и пять вопросов по технологии контроля);
- предложить свое решение задачи по проведению НК заданного объекта.

В практической части конкурса участники должны разработать технологические карты и провести контроль и выявить дефекты:

- 1-го образца при использовании ВИК, ЦД, МПД, ВТК, УЗК;
- 2-ух рентгеновских снимков при применении РГГ;
- Пяти СОП при УЗТ.

Участник использует собственное оборудование для проведения испытаний (ВИК, УЗК, УЗТ).

10. Победителем в отдельной номинации конкурса считается участник, набравший в сумме (по практической и теоретической части) наибольшее количество баллов. Аналогично определяются участники, занявшие II и III места.

Звание "Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь 2013 года" присваивается специалисту, получившему максимальное количество баллов в сумме по всем номинациям (ВИК, УЗК, УЗТ, РГГ, ЦД, МПД, ВТК).

11. Награждение лауреатов конкурса проводится на официальной церемонии закрытия конкурса 31 мая 2013 г. (время и место будет указано в программе конкурса)

Контакты

Долбик Елена Анатольевна, Шалак Анастасия Михайловна.

Тел./факс 213 29 31.

Velcom (029) 616 90 58.

МТС (029) 275 73 85.

E-mail: npkspb@tut.by, npkspb@yandex.ru.

220007, г. Минск, ул. Аэродромная, 4а, ком. 37 (цоколь).

ЗАЯВКА

на участие в Шестом республиканском конкурсе
по неразрушающему контролю на присвоение звания
Лучший специалист неразрушающего контроля
Республики Беларусь 2013 года
(с 27 по 31 мая 2013 г.)

1. _____
Фамилия, имя, отчество (полностью), дата рождения
2. _____
Должность
3. _____
Паспортные данные (серия, номер, где, кем и когда выдан)
4. _____
Наименование организации
5. _____
По какому методу НК заявляется (УЗК, УЗТ, РГГ, ВИК, ЦД, МПД, ВТК)
6. _____
Стаж работы по НК (УЗК, УЗТ, РГГ, ВИК, ЦД, МПД, ВТК)
7. _____
Место проведения и дата последней аттестации
8. _____
Оборудование, на котором предпочтительно участвовать в практической части конкурса
9. _____
Ответственный исполнитель (по организации), контактный телефон и факс.
10. _____
Адрес, по которому направляется приглашение на участие в конкурсе, контактный телефон.
11. _____
Мобильный телефон участника

ОПЛАТУ ОРГВЗНОСА ЗА УЧАСТИЕ В КОНКУРСЕ ГАРАНТИРУЕМ:

Руководитель _____ / _____ / Ф.И.О.

“ ___ ” _____ 2013 г.

Гл. бухгалтер _____ / _____ / Ф.И.О.

“ ___ ” _____ 2013 г.

Михаил Степанович Высоцкий



25 февраля 2013 г. на 86-м году ушел из жизни выдающийся ученый и конструктор в области машиностроения, один из основоположников белорусской школы грузового автомобилестроения, Герой Беларуси, заслуженный деятель науки и техники БССР, заслуженный работник промышленности СССР, лауреат Государственной премии СССР и Государственной премии БССР, генеральный конструктор по автомобильной технике Республики Беларусь, заместитель генерального директора Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси по научной работе в области автомобильной и карьерной техники, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор **Михаил Степанович Высоцкий**.

Михаил Степанович Высоцкий до последнего дня своей жизни оставался верен избранной им профессии. Он – известный ученый в области механики и комплексного проектирования мобильных машин, академик, доктор технических наук, профессор и выдающийся конструктор, создавший отечественную школу конструирования и исследований грузовых автомобилей.

Ему приходилось решать такие научно-технические задачи, справиться с которыми не мог никто. И он делал это с блеском!

Голос и мнение академика М.С. Высоцкого в области машиностроения очень высоко оценивался не только отечественным, но и международным научно-техническим сообществом. Как человек творческий и инициативный, он всегда находился в движении – вместе с коллегами, учениками, друзьями.

М.С. Высоцкий стоял у истоков и внес решающий вклад в развитие и приумножение достижений отечественного машиностроения, а его уникальные разработки не имеют аналогов во всем мире.

Работая с 1992 года по 1997-й вице-президентом АН БССР, М.С. Высоцкий смог консолидировать усилия ученых и заводских спе-

циалистов в интересах всей автотракторостроительной отрасли республики, что позволило пережить острый экономический кризис в период разрушения СССР, обеспечить становление национального автомобиле- и автобусостроения и выйти на устойчивое динамичное развитие отрасли, экспортного потенциала республики.

С 1993-го по 2001 год М.С. Высоцкий – директор созданного по его инициативе Научного центра проблем механики машин НАН Беларуси, с 2001 года – генеральный директор Научно-инженерного республиканского унитарного предприятия (НИРУП) «Белавтотракторостроение» НАН Беларуси, в 2006-2012 гг. - генеральный директор, а с 2012 г. - заместитель директора по научной работе Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси».

Научно-организационная деятельность академика Высоцкого сочеталась с активной научной деятельностью. Им опубликовано более 450 научных трудов, издано 19 монографий. Он получил 145 авторских свидетельств и патентов

М.С. Высоцким подготовлено 6 докторов, 18 кандидатов наук и создана белорусская школа механики и комплексного проектирования мобильных машин, получившая широкое международное признание.

Михаил Степанович Высоцкий награжден государственными премиями СССР (1970) и БССР (1986). Ему присвоены почетные звания «Заслуженный деятель науки и техники БССР» (1976), «Заслуженный работник промышленности СССР» (1991).

Награжден орденами: Трудового Красного Знамени (1967), Ленина (1974), Отечества III степени (1998) и II степени (2004).

В 2006 году Указом Президента Республики Беларусь от 01.03.2006 г. № 135 за исключительные заслуги в социально-экономическом развитии Республики Беларусь, личный вклад в становление и развитие национального автомобиле- и автобусостроения, белорусской научной школы механики и комплексного проектирования мобильных машин, проведение фундаментальных и прикладных научных исследований, подготовку научных кадров М.С. Высоцкому присвоено звание «Герой Беларуси».

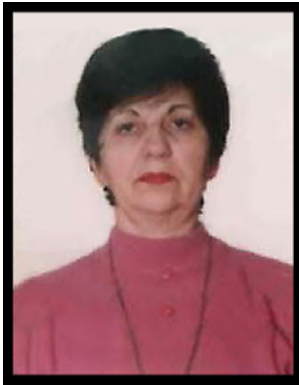
Огромная целеустремленность, творческая энергия, колоссальная работоспособность и, конечно же, незаурядный талант ученого и организатора лежат в основе достигнутых М.С. Высоцким блестящих результатов.

В течение многих лет нам посчастливилось общаться с активным, полным идей и планов ученым, излучающим неиссякаемую энергию организатором и руководителем, мудрым и всегда готовым помочь Человеком.

М.С. Высоцкого отличал широчайший кругозор, глубокие знания и эрудиция, которые в совокупности с требовательным отношением к людям и смелостью в принятии ответственных решений всегда вызвали глубокое уважение и являются ярким примером для подражания.

25 февраля 2013 года вся белорусская наука понесла тяжелую утрату, которую невозможно будет восполнить. Светлая память Михаилу Степановичу Высоцкому!

*Правление Республиканского общественного объединения
«Белорусская ассоциация неразрушающего контроля
и технической диагностики»
Редколлегия журнала «Неразрушающий контроль
и диагностика»*



Светлана Андреевна Попоудина

(31.03.1944 – 01.02.2013)

1 февраля 2013 года на 69 году ушла из жизни **Светлана Андреевна Попоудина**, известная в Республике Беларусь и странах СНГ как один из ведущих специалистов области метрологии средств неразрушающего контроля.

После окончания Харьковского авиационного института Светлана Андреевна работала на Минском авиаремонтном заводе № 407 Гражданской Авиации, а затем в Белорусском Республиканском центре стандартизации и метрологии (в настоящее время – БелГИМ).

Более тридцати лет она посвятила развитию метрологического обеспечения неразрушающего контроля. Свою трудовую деятельность Светлана Андреевна совмещала с активной общественной работой. 18 лет она была исполнительным директором Республиканского общественного объединения «Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики».

По ее инициативе были проведены работы по введению в Республике Беларусь в качестве государственного европейского стандарта EN 473 «Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля. Общие требования» с целью приведения национальных требований по уровню квалификации к единым европейским требованиям. Светлана Андреевна много внимания уделяла вопросу технического переоснащения лабораторий неразрушающего контроля, поддерживая тесные связи с ведущими разработчиками России, Украины и Молдовы.

Всемирный комитет по неразрушающему контролю высоко оценил вклад Беларуси в международную сертификацию персонала по неразрушающему контролю и в 2008 году наградил Попоудину С.А. премией ICNDT Havtrcroft Award «Признание выдающего вклада в международную сертификацию в области неразрушающего контроля».

Светлана Андреевна была великолепной матерью, воспитав двух достойных сыновей Алексея и Вячеслава.

Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики глубоко скорбит в связи с кончиной Светланы Андреевны Попоудиной и выражает соболезнование ее родным и близким.

*Правление РОО «БАНК И ТД»
Редколлегия журнала НКД*



Асадчая Мария Вадимовна
Asadchaya M.V.

кандидат технических наук,
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
старший научный сотрудник
Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16
тел. (+375 17) 331 63 41,
e-mail: asadchaya@iaph.bas-net.by



Баев Алексей Романович
Baev A.R.

доктор технических наук, профессор,
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
главный научный сотрудник
Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16
тел./факс (+375 17) 284 20 02,
e-mail: baev@iaph.bas-net.by



Бурак Вероника Анатольевна
Burak V.A.

кандидат технических наук
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
старший научный сотрудник
Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16
Тел. +(375 17) 284 24 30,
e-mail: veronika.burak@gmail.com



Короткевич Зоя Марковна
Korotkevich Z.M.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
аспирантка
Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16
Тел. +(375 17) 284 24 30,
e-mail: kzm@iaph.bas-net.by



Майоров Александр Леонидович
Mayorov A.L.

кандидат технических наук
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
заведующий лабораторией
Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16
Тел.: (+375 17) 284 20 02,
e-mail: mayorov@iaph.bas-net.by



Матюк Владимир Федорович

Matyuk V.F.

доктор технических наук
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
заведующий лабораторией
Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16
Тел. +(375 17) 284 18 55,
e-mail: matyuk@iaph.bas-net.by



Мельгуй Олег Владимирович

M.A. Melgui

доктор технических наук, профессор,
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
главный научный сотрудник
Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16
Тел.: +(375 17) 284 24 11,
e-mail: melgyi@iaph.bas-net.by



Осипов Александр Александрович

A.A. Osipov

кандидат технических наук
ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
ведущий научный сотрудник
Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16
Тел.: +(375 17) 284 24 17,
e-mail: osipov@iaph.bas-net.by



Сергеева Ольга Сергеевна

Sergeeva O.S.

ГУВПО «Белорусско-Российский университет», кафедра «Физиче-
ские методы контроля»,
аспирантка
Тел. (0222) 22-52-12,
e-mail: o.s.serg@mail.ru

**Правила для авторов
научно-практического журнала
«Неразрушающий контроль и диагностика»**

Для публикации оригинальной статьи авторы должны представить в редакцию следующие материалы:

1. Авторское заявление с указанием контактной информации (в электронном и бумажном виде).

2. Направление от организации, в которой выполнялась работа (в бумажном виде на бланке организации). Направление не требуется, если работа выполнялась за рубежом.

3. Файл с текстом статьи в формате WinWord, а также в бумажном виде или в электронном в формате pdf. Если одновременно с русским текстом статьи по желанию авторов публикуется ее английский перевод, он представляется отдельно.

4. Файлы в формате WinWord с текстом аннотации на русском и английском языках. Перевод на английский язык осуществляется авторами. Каждая аннотация, кроме собственно текста, должна включать в себя заглавие статьи, фамилии и инициалы авторов, также на русском и английском языках.

5. Файл в формате WinWord, в котором следует указать информацию для Авторского указателя:

- на русском языке – сведения об авторах (фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, звание, должность, место работы, телефон, факс, адрес электронной почты и другая контактная информация по усмотрению автора);

- на английском языке – транслитерацию фамилий и имен авторов, а также название учреждений, где выполнялась работа.

6. Фотографии авторов в электронном виде для размещения в Авторском указателе. Фамилия автора должна входить в имя файла с фотографией.

Бумажные версии документов могут быть представлены в редакцию любым из следующих способов:

- отправлены по факсу редакции: **(+375 17) 284 17 40;**

- присланы обычной почтой или переданы непосредственно по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 16, **Государственное предприятие «Диатех», редакция журнала «Неразрушающий контроль и диагностика».**

Электронные версии документов должны быть присланы в редакцию по электронной почте на адрес *info@science.by*.

К публикации в журнале «Неразрушающий контроль и диагностика» принимаются статьи, прошедшие рецензирование. Поступившая в редакцию рукопись направляется по выбору редакции на отзыв специалисту в данной области исследований. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала на основании экспертных оценок рецензентов с учетом соответствия представленных материалов тематической направленности журнала, их научной значимости и актуальности. Рукопись, получившая отрицательные отзывы двух независимых рецензентов, решением редколлегии отклоняется.

Как правило, объем статьи не должен превышать 10-15 страниц машинописного текста (включая таблицы и список литературы на отдельных страницах), количество иллюстраций – не больше четырех. Объем научного обзора не должен превышать 25 страниц.

Статьи должны быть написаны на русском (или английском) языке, отредактированы и оформлены в соответствии с нижеследующими требованиями.

Основной текст статьи

Каждая статья должна представлять собой файл, содержащий текст, набранный в редакторе WinWord, шрифт Cambria, кегль 14 пунктов, 1 интервал. При отсутствии установленного шрифта Cambria допустимо использовать шрифт Times New Roman. Должен быть включен режим автоматического переноса.

Перед текстом статьи отдельной строкой в левом верхнем углу обязательно должен быть приведен код универсальной десятичной классификации (УДК) тематики статьи (шрифт – кегль 12).

Статья начинается с заголовка, который пишется строчными буквами полужирным шрифтом размером 16 пунктов. Далее следует список авторов в формате «фамилия, инициалы», который пишется полужирным шрифтом 14 пунктов. Имена авторов разделяются запятыми.

Текст аннотации в виде абзаца с выравниванием по ширине с отступами 5 мм справа и слева шрифтом 12 пунктов.

Страницы статьи не должны быть пронумерованы. Поля на странице должны быть: левое и правое – по 25 мм, верхнее – 30 мм, нижнее – 32 мм.

Графические иллюстрации

Таблицы, иллюстрации и подписи к ним размещаются в тексте статьи при первом их упоминании. При этом следует избегать использования опции «обтекание текста».

Таблицы снабжаются тематическими заголовками и нумеруются арабскими цифрами в порядке их упоминания в тексте. Все графы в таблицах должны иметь заголовки. Сокращение слов в таблицах не допускается. Все аббревиатуры должны быть расшифрованы в сносках к таблице.

Графики и схемы должны выполняться с помощью графического редактора CorelDraw. Использование графических средств Microsoft Office крайне нежелательно из-за частых искажений рисунков при верстке, преобразовании в pdf-формат и печати. Рисунки следует присылать в виде отдельных файлов с сохранением форматов, использованных для их создания. Недопустимо использовать при создании рисунков «волосяные» линии (1/4 пункта). Эти линии хорошо видны на экране монитора, но исчезают в печатной версии документа.

Фотографии представляются в виде отдельных файлов в форматах jpeg, tiff, bmp, png с разрешением 300-600 dpi.

Штриховые рисунки, выполненные от руки, должны быть отсканированы в режиме bitmap с разрешением не ниже 600 dpi и сохранены в формате tiff.

Формулы

Математические формулы набираются в WinWord встроенным редактором формул, в качестве которого в последних версиях WinWord используется упрощенный вариант редактора формул MathType. В случае недостаточности упрощенного варианта необходимо установить полную коммерческую версию MathType. Уравнения располагаются по центру строки и нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках в порядке их упоминания в тексте. Номера уравнений выравниваются по правому краю строки. Уравнения отделяются от текста сверху и снизу одной пустой строкой. При написании нескольких уравнений они также разделяются пустой строкой.

В НОМЕРЕ

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ	3
Приборы магнитной структуроскопии на основе локального циклического импульсного перемагничивания <i>Матюк В.Ф.</i>	3
Влияние температуры закалки и отпуска на структурное состояние и магнитные свойства инструментальных быстрорежущих сталей <i>Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Короткевич З.М., Осипов А.А., Бурак В.А.</i>	28
Создание опорного сигнала при ультразвуковых измерениях <i>Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Сергеева О.С.</i>	42
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СООБЩЕНИЯ	56
Шестой республиканский конкурс «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь 2013»	56
ПАМЯТИ УЧЕНОГО	60
Михаил Степанович Высоцкий	60
ПАМЯТИ ТОВАРИЩА	63
Светлана Андреевна Попоудина	63
Авторский указатель	64
Правила для авторов	66

Немецкое общество по неразрушающему контролю
проводит ежегодную встречу
6 - 8 мая 2013 года в г. Дрезден



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

DGZFP-JAHRESTAGUNG 2013
Zerstörungsfreie Materialprüfung

6. – 8. Mai 2013
Wiedersehen in

DRESDEN

ZIP IN FORSCHUNG, ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG

