

СЕЛЕКТИВНЫЙ МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ И СТЕПЕНИ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА СТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ

© 2021 г. А.В. Бызов^{1,*}, Д.Г. Ксенофонов^{1,**}, В.Н. Костин¹, О.Н. Василенко¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург,
ул. Софьи Ковалевской, 18

E-mail: *byzovav@imp.uran.ru; **ksenofontov@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 23.09.2021; после доработки 24.09.2021

Принята к публикации 24.09.2021

Исследованы зависимости локально измеряемых магнитных характеристик поверхностно упрочненных стальных объектов от толщины и физических свойств их поверхностных слоев. Теоретически и экспериментально показано, что изменение толщины упрочненного слоя на поверхности стальных объектов в наибольшей степени влияет на величину тангенциальной составляющей поля на поверхности объекта в межполюсном пространстве, а изменение прочностных свойств слоя — на величину магнитного потока в цепи «преобразователь—объект». Это различие магнитных параметров предложено использовать для селективного контроля качества поверхностного упрочнения. Показано, что локально измеряемая по внутреннему полю коэрцитивная сила и максимальная величина магнитного потока, которые могут быть измерены в одном измерительном цикле с помощью единственного преобразователя, могут быть использованы в качестве диагностических параметров.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, слой, сердцевина, моделирование, коэрцитивная сила, магнитный поток, аппаратно-программная система магнитной структуроскопии.

DOI: 10.31857/S0130308221120046

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностное упрочнение стальных изделий является широко распространенным способом повышения их износостойкости и сопротивления усталостному разрушению [1—4]. Толщина поверхностно упрочненных слоев может варьироваться в очень широких пределах: 0,2—1,0 мм — после лазерного нагрева; 1,5—3 мм — для конструкций, подвергаемых усталостному износу; 3—7 мм — для различных деталей машиностроения и автомобилестроения; 10—20 мм и более — для изделий, которые должны выдерживать повышенные контактные нагрузки (например, катки гусеничной техники, валки холодной прокатки).

Наиболее известными методиками определения толщины упрочненного слоя являются акустические [5—7], вихретоковые [8, 11] и магнитные [9—18]. Акустические методики используются при наличии выраженной границы между упрочненным слоем и сердцевиной и толщине слоя больше длины ультразвуковой волны. Вихретоковые — для определения малых (1—2 мм и менее) толщин поверхностного упрочнения.

Наибольшее практическое применение нашла коэрцитиметрическая методика определения толщины и прочности (твердости) поверхностно упрочненных слоев, основанная на локальном измерении средней по промагниченному объему коэрцитивной силы H_c с помощью преобразователей различных типоразмеров [9—12, 14]. Используемые преобразователи обеспечивают различную глубину промагничивания испытуемого изделия. Для раздельного определения глубины и толщины слоя в зоне контроля необходимо выполнять два измерения величины H_c . Сначала проводят измерение с помощью преобразователя с малой глубиной промагничивания, а результат говорит о твердости упрочненного слоя. Затем проводят измерение величины H_c с помощью преобразователя с большой глубиной промагничивания и по полученному результату с учетом показаний первого преобразователя судят о толщине упрочненного слоя. Таким образом, коэрцитиметрический контроль упрочнения является достаточно трудоемкой и продолжительной процедурой. Кроме того, использование двух преобразователей различных размеров увеличивает погрешности контроля, связанные с несовпадением зон намагничивания и различной чувствительностью используемых преобразователей к таким мешающим факторам, как неконтролируемый зазор в измерительной цепи или перекосящий преобразователь относительно поверхности контролируемого объекта.

Вследствие очевидных недостатков коэрцитиметрической методики на протяжении многих лет велись разработки альтернативных магнитных методик контроля качества поверхностного упрочнения. Для повышения чувствительности к глубине слоя было предложено частично размагничить

вать достаточно намагниченный по предельной петле гистерезиса двуслойный объект постоянным или переменным полем [15] или несколькими сериями импульсов магнитного поля [16]. Однако амплитуда и временные характеристики таких полей могут сильно различаться и оптимальные алгоритмы перемагничивания должны подбираться экспериментально для каждого типоразмера контролируемых объектов, что сильно затрудняет практическое применение этих методик.

В работах [17, 18] предложены методика и устройства определения параметров упрочненного слоя, основанные на перемагничивании объектов по предельной петле гистерезиса и измерении полей, при которых наблюдаются максимумы дифференциальной магнитной проницаемости. Поскольку поле максимума дифференциальной проницаемости материала практически совпадает с его коэрцитивной силой, то по этим полям можно определять качество (твердость) этих слоев. Но к настоящему времени отсутствуют методики и устройства для локального измерения полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости.

Существующие методики и средства измерений предполагают последовательное определение глубины и прочности поверхностных слоев с помощью существенно различающихся методик и устройств. Трудоемкость и стоимость такого контроля даже выше, чем у коэрцитиметрического. Таким образом, актуальной задачей остается разработка достаточно простой и достоверной методики селективного определения параметров упрочненных слоев на ферромагнитных изделиях. Разработка такой методики является задачей настоящей работы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ

В нашей работе [19] путем численного решения методом конечных элементов системы уравнений Максвелла [20] с использованием программы FEMM [21] было установлено, что при увеличении толщины упрочненного слоя (d) меняется соотношение магнитных потоков, проходящих между полюсами электромагнита по упрочненному слою и сердцевине, и увеличивается глубина проникновения магнитного потока, создаваемого приставным U-образным электромагнитом при фиксированной величине намагничивающего тока. Магнитный поток в слое монотонно увеличивается в несколько раз, что приводит к монотонному росту тангенциальной составляющей поля H_x в межполюсном пространстве на поверхности двуслойного стального объекта. Увеличение d также приводит к монотонному уменьшению нормальной компоненты магнитного потока в полюсе электромагнита B_y . Уменьшение твердости поверхностного слоя, сопровождающееся увеличением его магнитной проницаемости, увеличивает значения B_y . Таким образом, различная чувствительность величин H_x и B_y к изменению толщины и магнитных свойств упрочненного слоя может быть физической основой для селективной оценки качества поверхностного упрочнения стальных изделий.

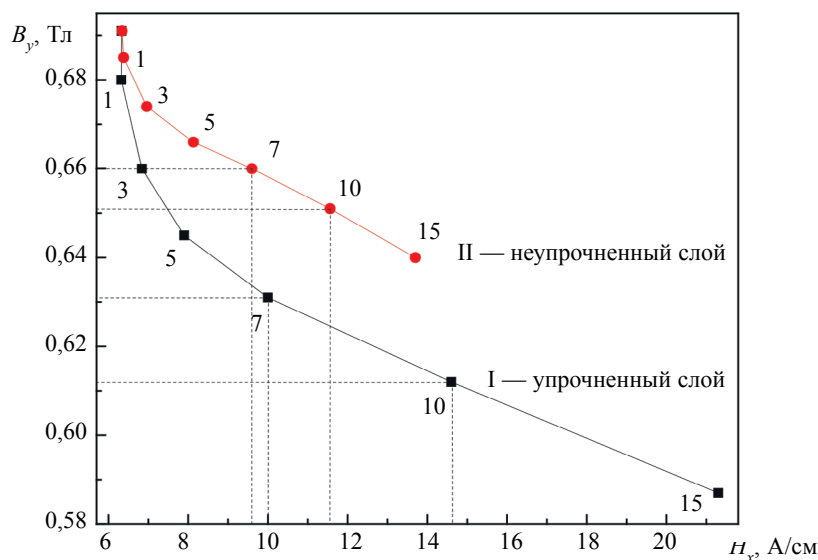


Рис. 1. К пояснению алгоритма селективной оценки качества поверхностного упрочнения при одностороннем ограничении толщины слоя.

На рис. 1 приведены полученные по данным работы [19] значения поля H_x и индукции B_y для различных глубин упрочненного (кривая I) и неупрочненного (кривая II) слоев. Покажем, что эти данные могут быть использованы для селективной оценки качества поверхностного упрочнения.

На практике толщина упрочненного слоя может иметь либо одностороннее ограничение (задается минимальная допустимая толщина слоя), либо двустороннее (задается диапазон допустимых значений толщины слоя).

Одностороннее ограничение глубины снизу. Допустим, что минимальная глубина слоя должна равняться 10 мм. Тогда, в соответствии с кривой I, должно быть 14,6 А/см, 0,612 Тл. Если глубина слоя нормальная, а сам слой имеет пониженную твердость (из-за недогрева при закалке или недостаточно быстрого охлаждения), то его магнитные свойства будут соответствовать кривой II, т. е. при том же значении толщины будет 0,612 Тл. Если 14,6 А/см, а соответствующие значения лежат на кривой I или ниже, то это означает пониженную глубину слоя с нормальной твердостью. Если пониженным значениям соответствуют повышенные значения (т.е. экспериментальные значения лежат между кривыми I и II), то это свидетельствует о пониженной глубине слоя и его недостаточном упрочнении.

Аналогичные результаты получаются и для других заданных глубин слоя. На рис. 1 также приведен пример для заданной величины слоя 7 мм.

Однако указанный выше алгоритм имеет ограничение на диапазон оцениваемых слоев. Как видно из рис. 1, начальные участки зависимостей I и II практически сливаются при слое около 1 мм, при этом достаточное для использования различие зависимостей I и II существует при глубинах упрочненного слоя 3 мм и больше.

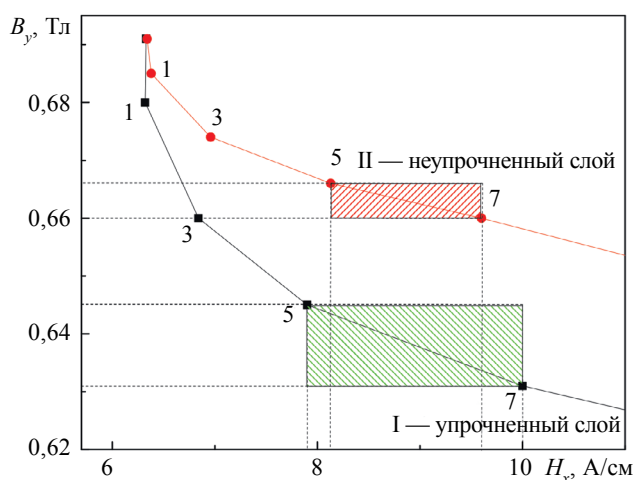


Рис. 2. К пояснению алгоритма селективной оценки качества поверхностного упрочнения при двустороннем ограничении толщины слоя.

Двустороннее ограничение глубины. В этом случае глубина слоя должна укладываться в определенный интервал. Пусть допустимая глубина нормально упрочненного слоя лежит в пределах $5 \leq d_{\text{упр}} \leq 7$ мм. Тогда, как показано на рис. 2, измеренные магнитные параметры должны соответствовать нижней заштрихованной области на плоскости (H_x , B_y).

Если глубина слоя находится в допустимых пределах, но слой является неупрочненным, то измеренные магнитные параметры должны соответствовать верхней заштрихованной области на рис. 6. Если значения измеренных магнитных параметров соответствуют области между линиями I и II, но вне заштрихованных областей, то это означает несоответствие слоя заданным требованиям ни по глубине, ни по степени упрочнения.

Однако, как видно из рис. 1 и 2, начальные участки зависимостей I и II практически сливаются при слое около 1 мм, при этом достаточное для практического использования различие зависимостей I и II существует при толщинах упрочненного слоя 3 мм и больше. Таким образом, описанные выше алгоритмы селективного определения толщины и прочности могут быть использованы при толщине слоя 3 мм и более.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для экспериментальной проверки описанной выше методики селективного определения толщины и прочности поверхностного слоя был изготовлен моделирующий магнитомягкую сердцевину прямоугольный параллелепипед из отожженной стали 3 с размерами 23,3×34,5×97 мм и коэрцитивной силой 2,1 А/см, а также набор пластин из закаленной стали 60С2А различной толщины с площадью 40,5×90,7 мм и коэрцитивной силой 32,5 А/см, с помощью которого варьировалась толщина упрочненного слоя. Измерение указанных выше параметров H_x и B_y было выполнено с помощью магнитного мультитестера ММТ-3, который позволяет локально измерять предельную петлю магнитного гистерезиса [22, 23]. На рис. 3 приведены рассчитанные в [19] и экспериментально определенные зависимости параметров H_x и B_y от толщины упрочненного слоя d . Видно хорошее качественное совпадение расчета и эксперимента, что подтверждает возможность практического применения параметров H_x и B_y для селективной оценки качества поверхностного упрочнения с использованием одного измерительного преобразователя и единственного цикла измерений. Однако вопрос об оптимальности предлагаемых параметров остается открытым.

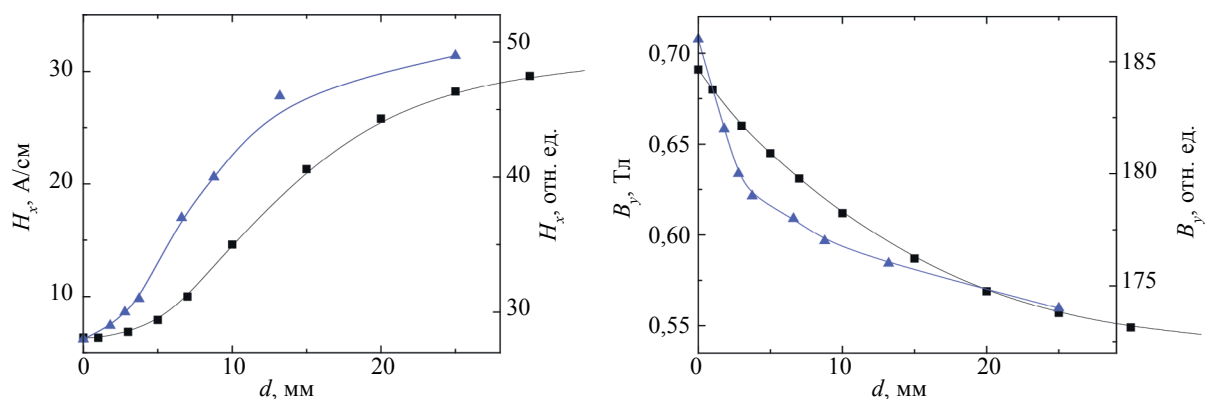


Рис. 3. Расчетные (■) и экспериментальные (▲) зависимости параметров H_x и B_y от глубины упрочненного слоя.

Использование дополнительного магнитного параметра позволяет придать новые возможности коэрцитиметрическому контролю. На рис. 4 приведена зависимость показаний I_{H_c} коэрцитиметра КИФМ-1 с U-образным электромагнитом и сечением полюсов 12×28 мм [9–12] от толщины упрочненного слоя, который был имитирован пластинами различной толщины и обладающих различной твердостью и магнитными свойствами. При увеличении толщины слоя

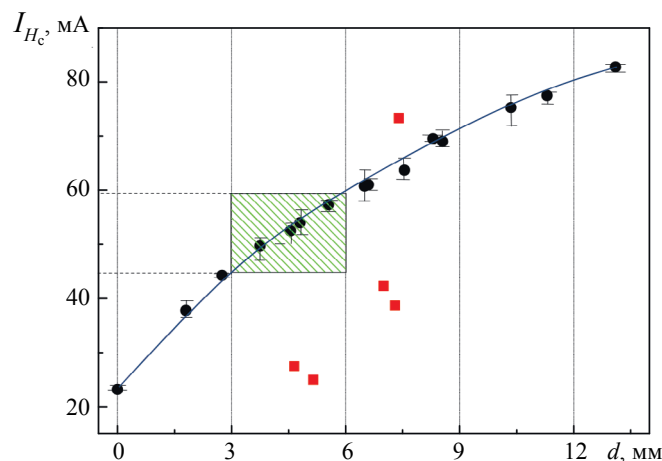


Рис. 4. Зависимость показаний коэрцитиметра КИФМ-1 от толщины нормально упрочненных (●), а также отличающихся по магнитным свойствам (■) поверхностных слоев на магнитомягкой сердцевине.

от 0 до 13 мм величина I_{H_c} возрастает в 4 раза. При этом видны значительные отклонения показаний от градуировочной кривой для поверхностных слоев с отличающимися магнитными свойствами. Покажем, что учет дополнительного параметра, аналогичного по чувствительности величине B_y , позволяет отделить такие слои от нормально упрочненных (закаленных) слоев.

На рис. 5 для того же набора образцов приведена зависимость измеренного с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.15M [23] максимального магнитного потока Φ_m . По аналогии с измерениями с помощью прибора КИФМ-1 измерения величины Φ_m выполнены с помощью датчика с U-образным электромагнитом и сечением полюсов 12×28 мм. Видно, что, как и указанная выше величина B_y , магнитный поток монотонно падает при увеличении толщины нормально упрочненных слоев. При увеличении толщины слоя до 13 мм величина Φ_m уменьшается на 11 %.

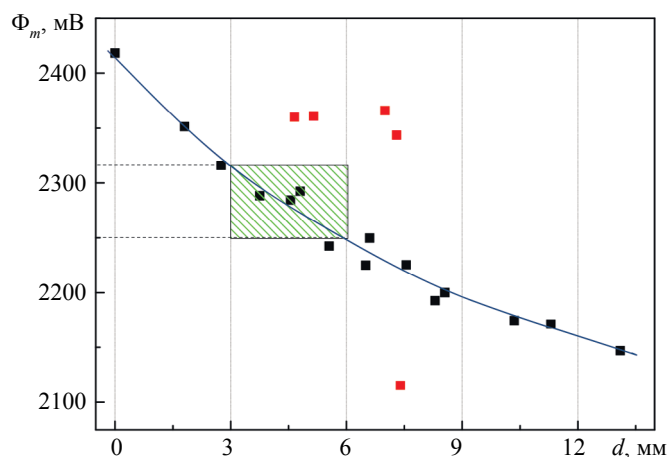


Рис. 5. Зависимость величины максимального магнитного потока в измерительной цепи «преобразователь—объект» от толщины нормально упрочненных (■) и отличающихся по магнитным свойствам (■) поверхностных слоев на магнитомягкой сердцевине.

Пусть допустимый диапазон толщин составляет (3—6) мм. В случае нормально упрочненных слоев, имеющих допустимые значения толщины, измеренные значения величин I_{H_c} и Φ_m должны одновременно попадать в заштрихованные на рис. 4 и рис. 5 области. Выпадающим из этих областей двум образцам соответствуют пониженные значения I_{H_c} и завышенные значения Φ_m , что свидетельствует об их недостаточном поверхностном упрочнении. Аналогичные результаты получаются и для других диапазонов толщины слоя. Таким образом, селективный контроль качества поверхностного упрочнения может быть реализован с помощью двух таких параметров, как I_{H_c} и Φ_m .

Однако для измерения параметров I_{H_c} и Φ_m были использованы различные измерительные устройства. Актуальным является вопрос о параметрах, измеряемых одним и тем же устройством. Для определения такой возможности с помощью АПС DIUS-1.15M на тех же образцах была определена зависимость измеряемой по внутреннему магнитному полю [24] величины коэрцитивной силы H_c от толщины поверхностно упрочненных слоев. Результаты приведены на рис. 6. Видно, что полученная зависимость во многом напоминает представленную на рис. 4 зависимость коэрцитивной силы, измеренной по размагничивающему току, однако при $d \leq 2$ мм чувствительность величины H_c к толщине слоя меньше, чем чувствительность величины I_{H_c} . В то же время зависимость $H_c(d)$ полностью соответствует приведенной на рис. 3 зависимости $H_x(d)$. Таким образом, при толщине упрочненных слоев более 2-3 мм двухпараметровая селективная методика оценки качества поверхностного упрочнения может быть практически реализована с использованием параметров H_c и Φ_m , которые могут быть измерены аппаратно-программной системой DIUS-1.15M [23, 24] в одном измерительном цикле с помощью одного преобразователя. Общее время измерения указанных параметров не превышает 10 с.

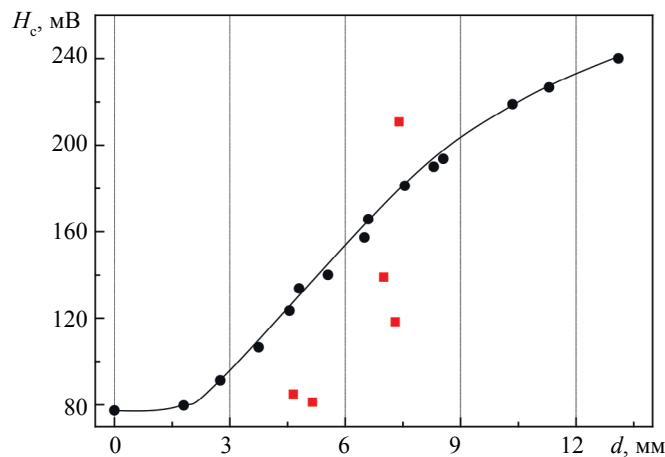


Рис. 6. Зависимость локально измеренной по внутреннему полю коэрцитивной силы от толщины нормально упрочненных (■) и отличающихся по магнитным свойствам (●) поверхностных слоев на магнитомягкой сердцевине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически и экспериментально показано, что тангенциальная компонента внутреннего поля в межполюсном пространстве U-образного электромагнита H_x и нормальная компонента магнитного потока B_y имеют различные чувствительности к изменению толщины и физических свойств упрочненного слоя на стальных объектах, что является физическим основанием новой методики селективной оценки качества поверхностного упрочнения стальных изделий. Предложен алгоритм селективной оценки толщины слоя и степени его упрочнения, предполагающий одновременное попадание значений диагностических параметров в заранее заданные интервалы. В качестве диагностических параметров предложено использовать локально измеряемые значения коэрцитивной силы H_c и потока в цепи «преобразователь—объект» Φ_m , которые могут быть измерены с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.15M или других аналогичных устройств.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of hard coating, deposition technologies, properties and applications / Ed. by R.F. Bunshah, Noyes Publications, 2001.
2. Surface Hardening of Steels, Understanding the Basics / Ed. by J.R. Davis, ASM International, 2002.
3. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин / Учебное пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. 64 с.
4. Wagha Santoshkumar V., Bhatt Bhananjan V., Menghanic Jyoti V., Bhavikattid Shivnanda S. Effects of laser hardening process parameters on hardness depth of Ck45 steel using Taguchi's optimization technique / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 810. P. 012027. IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/810/1/012027
5. Баев А.Р., Майоров А.Л., Тищенко М.А. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий // Литье и металлургия. 2010. № 4. С. 267—271.
6. Baqeri R., Honarvar F., Mehdizad R. Case depth profile measurement of hardened components using ultrasonic backscattering method / 18th World Conference on Nondestructive Testing. Durban, South Africa, April, 16—20, 2012.
7. Salchak Y.A., Sednev D.A., Kroening M., Ardashkin I.B. Method of case hardening depth testing by using multifunctional ultrasonic testing instrument // Materials Science and Engineering. 2015. № 81. С. 1—8.
8. Cuffe J., Sun H., Plotnikov Y., Nath Sh., Sheila-Vadde A. Eddy current measurement of case hardened depth of steel components / 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, October, 25—28, 2008.
9. Буда Г.В., Михеев М.Н., Костин В.Н. Определение размеров приставного электромагнита, предназначенного для неразрушающего контроля глубины и твердости поверхностно-упрочненных слоев // Дефектоскопия. 1984. № 8. С. 10—16.

10. Михеев М.Н., Бида Г.В., Костин В.Н., Михайлова А.А. Контроль глубины и твердости закаленных с нагрева ТВЧ слоев на шейках коленчатого вала автомобиля // Дефектоскопия. 1985. № 8. С. 12—17.
11. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. 266 с.
12. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 3—28.
13. Lo C.C.H., Kinser E.R., Jiles D.C. Magnetic non-destructive characterization of case depth in surface-hardened steel components / Presented at: Quantitative Nondestructive Evaluation, Brunswick, ME, USA, 31 July — 5 August 2005. AIP Conference Proceedings. V. 820. P. 1253—1260.
14. Муриков С.А., Артемьев И.А., Муриков Е.С., Кудряшов А.А., Урцев В.Н., Ничипурук А.П., Сташков А.Н. Возможности коэрцитиметрии для диагностики технического состояния валков стана горячей прокатки // Сталь. 2011. V. 11. P. 68—70.
15. Горкунов Э.С., Лapidус Б.М., Валтышева И.А. Устойчивость магнитных состояний двуслойных ферромагнетиков к воздействию постоянного и переменного магнитных полей // Дефектоскопия. 1986. № 4. С. 77—84.
16. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пинчуков Д.А. Способ контроля качества поверхностно-упрочненного слоя изделий из ферромагнитных материалов / Патент РФ № 2006136959/28, 18.10.2006. Патент России № 2330275. 2008. Бюл. № 21.
17. Горкунов Э.С., Лapidус Б.М., Загайнов А.В., Воронов С.А., Бушмелева Г.Я. Использование дифференциальной магнитной проницаемости для контроля качества поверхностного упрочнения // Дефектоскопия. 1988. № 7. С. 7—13.
18. Горкунов Э.С., Махов В.Н., Поволоцкая А.М., Тузанкин С.В., Субботин Ю.С., Лapidус Б.М. Магнитно-измерительный комплекс для магнитоструктурных исследований // Дефектоскопия. 1999. № 3. С. 78—84.
19. Byzov A.V., Ksenofontov D.G., Kostin V.N., Vasilenko O.N. Magnetic field distribution in steel objects with different properties of hardened layer // Advances in computational design. 2022. In print.
20. Tumanski S. Handbook of Magnetic Measurements. Warsaw University of Technology. Taylor & Francis Group, LLC, 2011. 383 p.
21. <https://cxem.net/software/finiteElementMethodMagnetics.php>
22. Костин В.Н., Осинцев А.А., Сташков А.Н., Ничипурук А.П., Костин В.Н., Сажина Е.В. Мобильные средства многопараметровой магнитной структуроскопии // Дефектоскопия. 2008. № 4. С. 66—77.
23. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Byzov A.V. DIUS-1.15M Mobile Hardware—Software Structuroscopy System // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 654—661.
24. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Mikhailov A.V., Lukinykh N.P., Ksenofontov D.G. On the Advantages of Local Measurement of Coercive Force of Ferromagnetic Objects Based on Internal Field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. P. 574—580.