

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ / METAL SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS AND ALLOYS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.167>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА НА МАГНИТНЫЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СТАЛИ ШХ15СГ

Научная статья

Михайлов Л.В.^{1,*}, Михайлов А.В.², Костин В.Н.³, Смородинский Я.Г.⁴

²ORCID : 0000-0001-9342-8986;

³ORCID : 0000-0003-4651-5002;

^{1,2,3,4} Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (mikhaylov_lv[at]imp.uran.ru)

Аннотация

В работе исследовано влияние температуры низкотемпературного отпуска стали ШХ15СГ на ее структуру, а также магнитные (коэрцитивная сила, намагниченность насыщения, магнитная восприимчивость) и механические свойства (твердость по Роквеллу). Исследование проводилось на пяти закаленных при температуре 850 °С образцах с варьированием температуры отпуска от 20 до 250 °С. Измерение магнитных характеристик образцов было выполнено с помощью современного измерительного комплекса «Remagraph C-500». Выявлено, что увеличение температуры отпуска ведет к увеличению намагниченности насыщения и магнитной восприимчивости, а также к уменьшению коэрцитивной силы и твердости. Представлены фотографии микроструктуры. Исследование дает представление о структурных изменениях, вызванных изменением температуры отпуска, и уточняет взаимосвязь температуры, магнитных и механических свойств.

Ключевые слова: ШХ15СГ, низкотемпературный отпуск, температура отпуска, магнитные свойства, механические свойства, структурные изменения, коэрцитивная сила, намагниченность насыщения, магнитная восприимчивость, твердость по Роквеллу, материаловедение, металлургия.

A STUDY OF THE INFLUENCE OF DRAWBACK TEMPERATURE ON MAGNETIC, MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF SHC15CG STEEL

Research article

Mikhailov L.V.^{1,*}, Mikhailov A.V.², Kostin V.N.³, Smorodinskii Y.G.⁴

²ORCID : 0000-0001-9342-8986;

³ORCID : 0000-0003-4651-5002;

^{1,2,3,4} M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (mikhaylov_lv[at]imp.uran.ru)

Abstract

The work studies the influence of the low-temperature drawback of SHC15CG15G steel on its structure, as well as magnetic (coercive force, saturation magnetization, magnetic susceptibility) and mechanical properties (Rockwell hardness). The research was carried out on five samples tempered at 850 C temperature with temperature varying from 20 to 250 C. The magnetic characteristics of the samples were measured using the modern measuring complex «Remagraph C-500». It has been shown that an increase in the drawback temperature leads to an increase in the magnetization of saturation and magnetic susceptibility, as well as to a decrease in the coercive force and hardness. Pictures of microstructure are presented. The study gives an idea of the structural changes caused by the drawback temperature and clarifies the relationship of temperature, magnetic and mechanical properties.

Keywords: SHC15CG, low-temperature drawback, drawback temperature, magnetic properties, mechanical properties, structural changes, coercivity, saturation magnetization, magnetic susceptibility, Rockwell hardness, materials science, metallurgy.

Введение

В процессе эксплуатации машин и агрегатов их узлы испытывают высокие нагрузки, вследствие чего упругие механические напряжения могут приводить к нагреву деталей. Как следствие, происходит изменение прочностных свойств металла из-за перераспределения углерода, обусловленное фазовыми превращениями во время циклов нагрева и остывания. Своевременный контроль фазового состава может помочь избежать поломок и аварий.

Для контроля фазового состава сталей широко применяются магнитные методы контроля. В работе [2] исследованы, систематизированы и представлены в качестве справочного материала магнитные и механические свойства закаленной и отпущенной подшипниковой стали ШХ15. Сталь марки ШХ15СГ, имеющая более глубокую прокаливаемость и заменяющая сталь ШХ15 в случаях, требующих использования деталей больших размеров [4, С. 11], после низкотемпературного отпуска является менее стабильной ввиду неполного разложения остаточного аустенита [1, С. 88]. Данная работа наряду с магнитными и механическими свойствами рассматривает структуру закаленной и отпущенной в низкотемпературном интервале стали ШХ15СГ.

Целью настоящей работы является исследование влияния низкотемпературного отпуска с различными температурами на размеры карбидов в микроструктуре образцов стали марки ШХ15СГ, на магнитные характеристики (коэрцитивную силу, намагниченность насыщения, магнитную восприимчивость) и твердость. Результаты исследования могут быть использованы в магнитной структуроскопии [6], [7], [8], [10] для контроля качества термической обработки изделий.

Методы и принципы исследования

Для проведения исследования были изготовлены 5 образцов с линейными размерами $66,2 \times 11,6 \times 5,7$ мм (рис. 1). Состав стали ШХ15СГ представлен в табл. 1.

Таблица 1 - Химический состав стали ШХ15СГ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.167.1>

C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	S, %	P, %	Cr, %	Cu, %	Fe, %
0,95-1,05	0,17 - 0,37	0,2 - 0,4	до 0,3	до 0,02	до 0,027	1,3 - 1,65	до 0,25	около 96

Образцы были закалены с температурой нагрева $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отпущены соответственно номерам при температурах: 20, 100, 150, 200 и $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. После термообработки на образцах измеряли коэрцитивную силу, намагниченность насыщения, магнитную восприимчивость, твердость и размеры карбидов. Для измерения магнитных свойств использовалась автоматическая установка «Remagraph C-500», для измерения твердости – твердомер «Точприбор ТР-5006». Микроструктура рассматривалась с помощью металлографического оптического микроскопа «Neophot 32»; для подготовки поверхности образцы шлифовались, полировались и травились в 4% спиртовом растворе азотной кислоты для лучшего различения карбидной фазы.



Рисунок 1 - Внешний вид изготовленных образцов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.167.2>

Основные результаты

На рис. 2 представлены петли гистерезиса для каждого образца с соответствующей ему температурой отпуска; по оси ординат отложена магнитная поляризация $J = B - \mu_0 H$ [5]. Зависимости коэрцитивной силы, намагниченности насыщения, магнитной восприимчивости и твердости по Роквеллу от температуры отпуска показаны на рис. 3. Результаты измерения размеров карбидной фазы приведены в табл. 2.

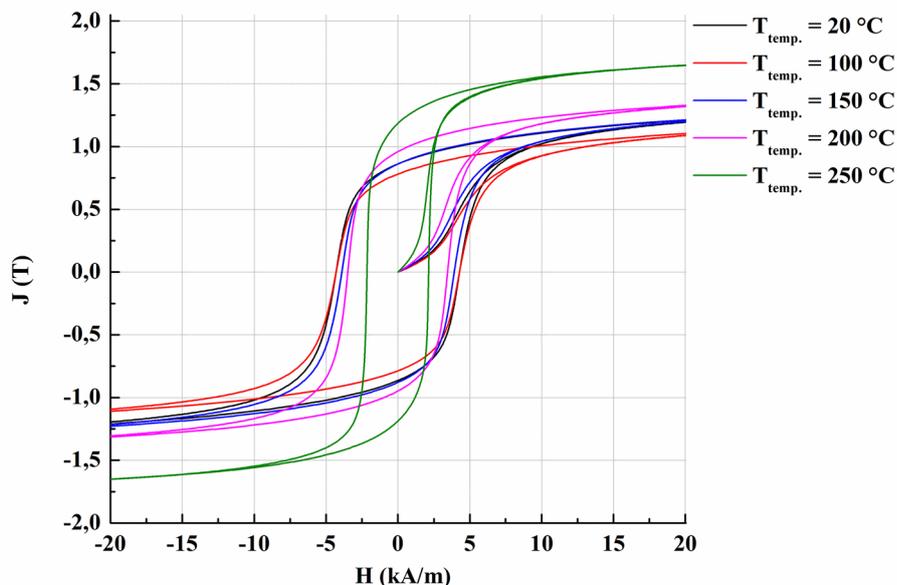


Рисунок 2 - Кривые намагничивания для образцов с различными температурами отпуска

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.167.3>

Выравнивание магнитных свойств по объему образцов в результате распада мартенсита во время низкотемпературного отпуска приводит к уменьшению коэрцитивной силы. Чем выше температура отпуска, тем ниже коэрцитивная сила. Парамагнитный остаточный аустенит, образующийся в результате закалки в небольших количествах, распадается при температурах отпуска выше 150 °С, вследствие чего намагниченность насыщения резко возрастает с увеличением температуры отпуска. Твердость стали убывает с увеличением температуры отпуска, что объясняется распадом мартенсита и остаточного аустенита [11].

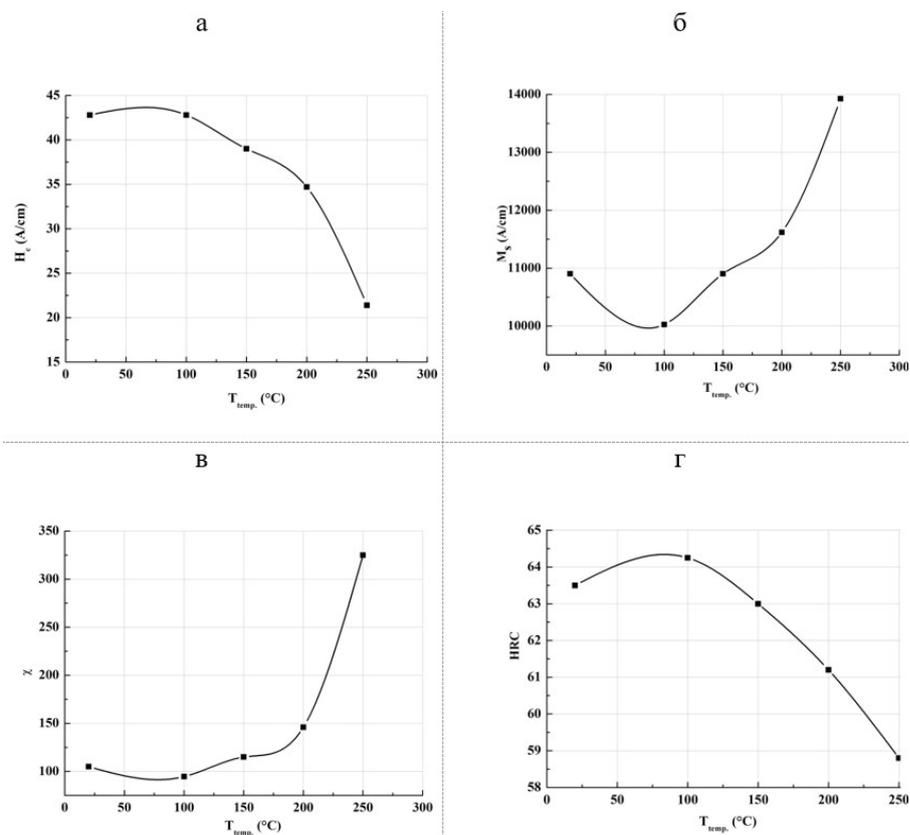


Рисунок 3 - Зависимости от температуры отпуска

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.167.4>

Примечание: а - коэрцитивной силы, б - намагниченности насыщения, в - магнитной восприимчивости, г - твердости по шкале Роквелла

Микроструктура образцов представляет собой мартенсит, остаточный аустенит и карбиды (рис. 4). Для лучшего различения карбидов фотографии были переведены в монохромные цвета. Черные области снимков – мартенсит, яркие белые – карбиды. Объемная доля и морфология карбидов изменяются при варьировании температуры отпуска. С увеличением температуры отпуска количество углерода, переходящего из растворяющихся мартенсита и аустенита в новые карбидные образования, увеличивается, вследствие чего дисперсность карбидов увеличивается, а их размеры уменьшаются (см. табл. 2).

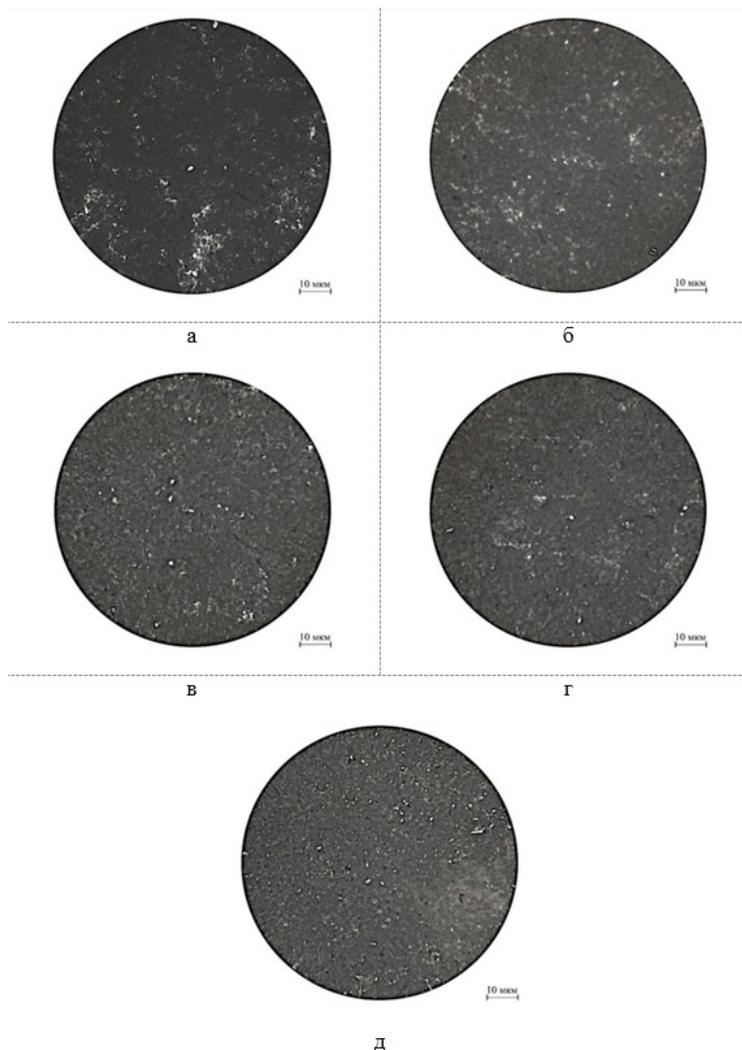


Рисунок 4 - Микроструктура образцов при температурах отпуска
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.167.5>

Примечание: а) 20 °С, б) 100 °С, в) 150 °С, г) 200 °С, д) 250 °С

Таблица 2 - Зависимость размеров карбидной фазы от температуры отпуска

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.167.6>

$T_{\text{отп}}, ^\circ\text{C}$	Наибольшие размеры карбидов (длина × ширина), мкм
20	7 × 3
100	6 × 3
150	2 × 1

200	1,25 × 1
250	1 × 0,5

В каждом из полученных результате исследования выбиваются данные для образца с температурой отпуска 100 °С: значения либо такие же, как при температуре 20 °С, либо незначительно отклонены в обратных направлениях общих тенденций изменения измеряемых величин. Это происходит ввиду того, что в углеродистых сталях первое превращение мартенсита при отпуске происходит в интервале температур (90 – 180 °С), в результате чего образуется т.н. отпущенный мартенсит с меньшей концентрацией углерода, при этом остается также не испытывавший распада мартенсит [2, С. 6]. Это, вероятно, приводит к увеличению внутренних механических напряжений.

В ходе проведения исследования возникли трудности пробоподготовки из данной стали для металлографических исследований, заключающиеся в получаемой на конечном этапе подготовки образцов шероховатости. Шероховатость представляет из себя лунки диаметром, приблизительно равным размеру зерна на абразивном инструменте с меньшей зернистостью. Это объясняется тем, что применяемыми абразивами с меньшей зернистостью, наряду с типичными для данного абразива, образуются риски с большей глубиной. Данные риски не удаляются на следующих стадиях, и различить их невооруженным глазом в процессе подготовки образцов не представляется возможным. Такой результат пробоподготовки является неудовлетворительным для проведения металлографических исследований.

Причины, по которым получается вышеописанный результат при подготовке поверхности подобных образцов:

1. Рекомендуются площадь образца для металлографии составляет от 2 до 5 см². [3, С. 26]. В данном случае площадь составляет около 7 см² и важную роль здесь играет отношение длины образца к его ширине. При шлифовании вдоль основания образца отделенные частицы металла с большей долей вероятности могут оставить глубокую царапину;

2. Приложение недостаточного или избыточного усилия к образцу при шлифовании абразивами различной зернистости. Как было отмечено, вопрос о прилагаемом к образцу усилие недостаточно изучен. Если усилие на крупнозернистых абразивах было выше усилия на последующих абразивах, избавиться от рисков, оставленных с предыдущего этапа, может быть затруднительно из-за все того же попадания частиц металла и абразива в глубокие риски;

3. Неоконченное шлифование абразивом одной зернистости и последующий переход на абразив с большей зернистостью.

Опытным путем была получена и проверена на 5 образцах одинаковых размеров методика по подготовке поверхности для металлографических исследований. Эта методика позволяет добиться зеркальности поверхности и избавиться от шероховатости.

Сформулированы следующие правила:

1. Абразивные бумаги должны быть сухими и очищены от частиц металла, оставленных от предыдущего их использования;

2. Поверхность, на которой лежит абразивная бумага, на которой шлифуется образец, должна быть ровной. Для соблюдения этого условия необходимо использовать, например, стекло;

3. Шлифование нужно проводить не на одной подложенной абразивной бумаге, а на нескольких для того, чтобы уменьшить жесткость возможных неровностей. После завершения шлифования на одной абразивной бумаге, ее следует убирать, чтобы избежать попадания оторванных частиц металла и абразива на следующую;

4. После завершения шлифования на каждой абразивной бумаге образец нужно промывать водой, а затем тщательно сушить, протирая сухой бумагой;

5. Шлифование на абразиве одной зернистости нужно проводить до полного исчезновения рисков от предыдущего абразива. Для проверки этого условия при осмотре поверхности рекомендуется менять ориентацию образца на свету или использовать микроскоп на наименьшем приближении.

Заключение

1. В работе исследованы изменения магнитных и механических свойств, а также структуры стали ШХ15СГ в зависимости от температуры отпуска. Получены кривые зависимостей величин, характеризующих магнитные и механические свойства стали, от температуры отпуска.

2. Опытным путем получены и сформулированы рекомендации по пробоподготовке образцов из данной стали.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации «Разработка физических методов, сенсоров и интеллектуальных средств контроля и диагностики перспективных материалов и технических систем» (тема «Диагностика», Г.р. № 122021000030-1).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation "Development of Physical Methods, Sensors and Intelligent Means of Monitoring and Diagnostics of Advanced Materials and Technical Systems" (topic "Diagnostics", G.R. No. 122021000030-1).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Беленко Н.А. Влияние остаточного аустенита на эксплуатационную надежность подшипников / Н.А. Беленко, Г.А. Околович // Ползуновский вестник. — № 4. — 2019. — С. 85-89. — DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.04.019 — EDN BKLUVS
2. Бида Г.В. Магнитные свойства сталей после закалки и отпуска. I. Общие положения. Углеродистые стали / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук, Т.П. Царькова // Дефектоскопия. — № 2. — 2001. — С. 3-25. — EDN EJXXEG.
3. Металлография железа. Т. 1. «Основы металлографии» (с атласом микрофотографий). — Перев. с англ. «Металлургия», 1972. — 240 с.
4. Спектор А.Г. Структура и свойства подшипниковых сталей / А.Г. Спектор, Б.М. Зельбет, А.М. Киселева. — «Металлургия», 1980. — 264 с.
5. Костин В.Н. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция / В.Н. Костин, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. — № 7. — 2017. — С. 23-34. — EDN YTLAEL.
6. Костин В.Н. Многопараметровые методы структуроскопии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества / В.Н. Костин, А.А. Осинцев, А.Н. Сташков [и др.] // Дефектоскопия. — № 3. — 2004. — С. 69-82. — EDN PARQPV.
7. Щербинин В.Е. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / В.Е. Щербинин, Э.С. Горкунов. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996. — 266 с.
8. Щербинин В.Е. Магнитный контроль качества металлов / В.Е. Щербинин, Э.С. Горкунов. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996. — 267 с. — ISBN 5-7691-0655-7. — EDN WLRGXP.
9. Bida G.V. Magnetic Characteristics of an Article as the Parameters of Nondestructive Quality Control (NDC) of Tempering of Quench Steels (review) / G.V. Bida // Defektoskopiya. — No. 6. — 2002. — P. 19-33. — EDN MPNMBV.
10. Горкунов Э.С. Контроль качества термической обработки труб нефтегазового сортамента методами магнитной структуроскопии / Э.С. Горкунов, С.М. Задворкин, Е.А. Путилова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — Т. 81. — № 10. — 2015. — С. 32-36. — EDN UMUEOJ.
11. Tan E. Influence of Repeated Tempering on the Machinability and Microstructure of an AISI 52100 Steel / E. Tan, I. Ovali, A. Mavi [et al.] // Materials Testing. — V. 57 — 2015. — P. 947-953. — DOI:10.3139/120.110805

Список литературы на английском языке / References in English

1. Belenko N.A. Vliyanie ostatochnogo austenita na ekspluatacionnyu nadezhnost' podshipnikov [The Effect of Residual Austenite on the Operational Reliability of Bearings] / N.A. Belenko, G.A. Okolovich // Polzunovskij vestnik [Polzunovsky Bulletin]. — № 4. — 2019. — P. 85-89. — DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.04.019 — EDN BKLUVS [in Russian]
2. Bida G.V. Magnitnye svojstva stalej posle zakalki i otpuska. I. Obshchie polozheniya. Uglerodistye stali [Magnetic Properties of Steels after Quenching and Tempering. I. General provisions. Carbon Steels] / G.V. Bida, A.P. Nichipuruk, T.P. Car'kova // Defektoskopiya [Flaw Detection]. — № 2. — 2001. — P. 3-25. — EDN EJXXEG [in Russian].
3. Metallografiya zheleza. V. 1. «Osnovy metallografii» (s atlasom mikrofotoğrafij) [Metallography of Metal. V. 1. "Fundamentals of Metallography" (with atlas of microphotographs)]. — Translated from the English "Metallurgiya", 1972. — 240 p. [in Russian]
4. Spektor A.G. Struktura i svojstva podshipnikovyh stalej [Structure and Properties of Bearing Steels] / A.G. Spektor, B.M. Zel'bet, A.M. Kiseleva. — «Metallurgy», 1980. — 264 p. [in Russian]
5. Kostin V.N. Mnogocelevyje apparatno-programmnye sistemy aktivnogo elektromagnitnogo kontrolya kak tendenciya [Multi-purpose Hardware and Software Systems of Active Electromagnetic Control as a Trend] / V.N. Kostin, YA.G. Smorodinskij // Defektoskopiya [Flaw Detection]. — № 7. — 2017. — P. 23-34. — EDN YTLAEL [in Russian].
6. Kostin V.N. Mnogoparametrovyje metody strukturoskopii stal'nyh izdelij s ispol'zovaniem magnitnyh svojstv veshchestva [Multiparameter Methods of Structuroscopy of Steel Products Using the Magnetic Properties of a Substance] / V.N. Kostin, A.A. Osincev, A.N. Stashkov [et al.] // Defektoskopiya [Flaw Detection]. — № 3. — 2004. — P. 69-82. — EDN PARQPV [in Russian].
7. SHCHerbinin V.E. Magnitnye metody struktornogo analiza i nerazrushayushchego kontrolya [Magnetic Methods of Structural Analysis and Non-destructive Testing] / V.E. SHCHerbinin, E.S. Gorkunov. — Yekaterinburg: UrB RAS, 1996. — 266 p. [in Russian]

8. SHCHerbinin V.E. Magnitnyj kontrol' kachestva metallov [Magnetic Quality Control of Metals] / V.E. SHCHerbinin, E.S. Gorkunov. — Yekaterinburg: UrB RAS, 1996. — 267 p. — ISBN 5-7691-0655-7. — EDN WLRGXP [in Russian].
9. Bida G.V. Magnetic Characteristics of an Article as the Parameters of Nondestructive Quality Control (NDC) of Tempering of Quench Steels (review) / G.V. Bida // Defektoskopiya. — No. 6. — 2002. — P. 19-33. — EDN MPNMBV.
10. Gorkunov E.S. Kontrol' kachestva termicheskoy obrabotki trub neftegazovogo sortamenta metodami magnitnoj strukturoskopii [Quality Control of Heat Treatment of Oil and Gas Grade Pipes by Magnetic Structroscopy Methods] / E.S. Gorkunov, S.M. Zadvorkin, E.A. Putilova // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory Laboratory. Diagnostics of Materials]. — V. 81. — № 10. — 2015. — P. 32-36. — EDN UMUEOJ [in Russian].
11. Tan E. Influence of Repeated Tempering on the Machinability and Microstructure of an AISI 52100 Steel / E. Tan, I. Ovali, A. Mavi [et al.] // Materials Testing. — V. 57 — 2015. — P. 947-953. — DOI:10.3139/120.110805