

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 620.179.14

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-398-405>

Поступила в редакцию 26.07.2019

Received 26.07.2019

З. М. Короткевич, В. А. Бурак*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ СТАЛИ У8А ПРИ ДВУХПОЛЯРНОМ НЕСИММЕТРИЧНОМ ИМПУЛЬСНОМ
НАМАГНИЧИВАНИИ**

Аннотация. Выявление воздействия отклонений от требуемого режима термообработки изделий из инструментальной углеродистой стали У8А является одной из важных задач обеспечения качества изготавливаемой продукции. Анализ проведенных ранее исследований показал, что для большинства стандартных магнитных характеристик инструментальных углеродистых сталей характерна неоднозначная зависимость их величин от режима проведенной термообработки, что не позволяет использовать стандартные магнитные характеристики инструментальных углеродистых сталей для неразрушающего контроля. В работе приводятся результаты исследований магнитных параметров инструментальной высококачественной углеродистой стали У8А при импульсном режиме перемагничивания в разомкнутой магнитной цепи с использованием прибора для измерения магнитной индукции ферромагнитных стержней в процессе импульсного намагничивания-перемагничивания ИМИ–И на цилиндрических образцах. Установлено, что для контроля температуры нагрева под закалку изделий из инструментальной углеродистой стали У8А можно использовать величину разности $\delta_{B_{mp}-B_r}$ между магнитной индукцией при максимальной амплитуде размагничивающего импульса и остаточной магнитной индукцией. Выявить недогрев и перегрев под закалку рассматриваемой марки стали можно по величинам коэрцитивной силы H_c и коэрцитивной силы по несимметричной петле магнитного гистерезиса H_{ca} , однако контроль температуры закалки по этим параметрам затруднителен. Показано, что контроль низкотемпературного (до 350 °С) отпуска с достаточно высокой (не менее 40 % на 100 °С) чувствительностью возможен по таким параметрам, как остаточная магнитная индукция по несимметричной петле B_{ra} и магнитная индукция $B\delta_{mH}$ при напряженности магнитного поля, соответствующей максимальной разности δ_{mH} вдоль оси H .

Ключевые слова: инструментальная углеродистая сталь, магнитное поле, петля магнитного гистерезиса, импульсное намагничивание, информативные параметры, импульс магнитного поля, термическая обработка, структурное состояние

Для цитирования: Короткевич, З. М. Особенности контроля качества термообработки изделий из стали У8А при двухполярном несимметричном импульсном намагничивании / З. М. Короткевич, В. А. Бурак // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, № 4. – С. 398–405. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-398-405>

Z. M. Korotkevich, V. A. Burak*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***FEATURES OF HEAT TREATMENT QUALITY TESTING OF U8A STEEL ARTICLES DURING PULSED
BIPOLAR ASYMMETRIC MAGNETIZATION**

Abstract. To detect deviations of required heat treatment temperature of tool carbon steel U8A is one of the important tasks of manufactured products quality assurance. By analyzing researchings, held earlier, it was found that most of instrumental carbon steels standard magnetic characteristics have ambiguous dependence from the heat treatment temperature and cannot be used for purposes of nondestructive testing. Results of researching magnetic parameters of high-quality tool carbon steel U8A, which are good for heat treatment quality testing, are considered. The parameters were defined on steel cylindrical samples by the instrument IMI–I, suited for measuring the ferromagnetic rods magnetic induction during pulsed magnetization in open magnetic circuit. Applicability of the difference $\delta_{B_{mp}-B_r}$ between the magnetic induction of maximum demagnetizing pulse amplitude and the residual magnetic induction for tool carbon steel U8A hardening temperature testing is determined. The coercive force H_c and the coercive force taking on asymmetric magnetic hysteresis loop H_{ca} of the steel can be used to determine underheating and overheating during hardening but these magnetic parameters are inapplicable for hardening temperature testing. It is given that the magnetic induction taking on asymmetric magnetic hysteresis loop B_{ra} and the magnetic induction $B\delta_{mH}$ of the magnetic field strength of maximum difference δ_{mH} along the axis H can give measurement sensitivity more than 40 % per 100 °C in low temperature (under 350 °C) tempering testing.

Keywords: tool carbon steel, magnetic field, magnetic hysteresis loop, pulsed magnetization, informative parameters, pulse of magnetic field, heat treatment, structural state

For citation: Korotkevich Z. M., Burak V. A. Features of heat treatment quality testing of U8A steel articles during pulsed bipolar asymmetric magnetization. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 398–405 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-398-405>

Введение. Сталь марки У8А относится к инструментальным углеродистым высококачественным сталям и используется для изготовления инструмента, работающего в условиях, которые не вызывают разогрева режущей кромки. Для достижения необходимых механико-технологических свойств изделия, изготовленные из стали У8А, подвергаются закалке для обеспечения необходимой твердости и вязкости и последующему отпуску для снятия закалочных напряжений либо отжигу (ГОСТ 1435-99 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общие технические условия»).

Одной из задач неразрушающего магнитного контроля структурного состояния этой стали является выявление отклонений температуры проведенной термообработки от требуемой в соответствии с технологическим процессом. Это связано с тем, что недогрев изделия до необходимой температуры закалки может привести к снижению его твердости, а перегрев выше температуры, определенной ГОСТ 1435-99, – к снижению прочности металла, что неблагоприятно проявится на эксплуатационных свойствах инструмента. Для решения указанной задачи необходимо установить магнитные параметры, однозначно и с достаточной точностью обеспечивающие контроль режима термообработки изделий из стали У8А.

Ранее проводились исследования магнитных характеристик стали марки У8А на кольцевых образцах в замкнутой магнитной цепи в статическом и квазистатическом режимах перемагничивания [1–5]. Эти измерения трудоемки, особенно в условиях массового контроля. В связи с этим более перспективными являются измерения магнитных свойств с использованием импульсных режимов намагничивания. Новые информативные параметры предполагается выявить при намагничивании изделия несимметричными импульсами магнитного поля.

Повышение достоверности неразрушающего контроля качества термообработки стали У8А следует ожидать и за счет применения многопараметрового контроля с использованием новых информативных параметров, выявленных при несимметричном импульсном намагничивании [6].

В работе приводятся результаты исследований по установлению магнитных параметров инструментальной высококачественной углеродистой стали У8А, измеренных в импульсном режиме перемагничивания на цилиндрических образцах в разомкнутой магнитной цепи с использованием прибора для измерения магнитной индукции ферромагнитных стержней в процессе импульсного намагничивания-перемагничивания ИМИ–И [7].

Режимы термообработки. Для получения достаточной для инструментов твердости 48–51 HRC сталь У8А нагревают под закалку в воду на 30–50 °С выше критической точки A_{C3} , что соответствует температуре закалки $T_{зак} = 780–800$ °С, а затем подвергают низкотемпературному отпуску на воздухе на троостит при температуре $T_{отп} = 275–350$ °С [8].

Одной из особенностей эвтектоидной стали У8А, как и других инструментальных углеродистых сталей, является широкий диапазон используемых температур отпуска для получения изделий с необходимыми механическими свойствами (твердостью, прочностью, вязкостью). Так, для сохранения высокой твердости стали (62–64 HRC) температура отпуска не должна превышать 200 °С, а для повышения вязкости инструмент отпускают при температуре 400 °С [8, 9].

Исследования выполнены на цилиндрических образцах из стали У8А диаметром 10 мм и длиной 190 мм. Образцы подвергались закалке в воду от температур 700, 750, 770, 790, 820, 850, 900 °С. Образцы, закаленные от 790 °С, подвергались последующему отпуску при 230, 280, 300, 330, 380, 470, 580 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением образцов на воздухе. Проведение различной термообработки обеспечило разную структуру материала образцов, в которой присутствуют феррит, мартенсит, карбиды и остаточный аустенит и к появлению которой чувствительными являются разные магнитные характеристики.

Ранее полученные результаты. Проведенные ранее исследования при квазистатическом режиме перемагничивания в замкнутой магнитной цепи на закаленных и отпущенных кольцевых образцах из стали У8А на установке для измерения магнитных характеристик (УИМХ) [10]

позволили сделать вывод, что наиболее чувствительными информативными параметрами для контроля качества проведенной закалки во всем диапазоне возможных температур нагрева под закалку является отношение некоторых полевых характеристик к магнитным проницаемостям. Для контроля качества отпуска можно использовать сочетание намагниченностей насыщения M_m , релаксационной намагниченности M_r , коэрцитивной силы H_c . Параметры, связанные с магнитной проницаемостью, чувствительны к термообработке, но в то же время стабильность их определения в открытой магнитной цепи низкая. Поэтому задача выявления магнитных характеристик, устойчивых к внешним воздействиям, является актуальной.

Режимы намагничивания. Для определения новых магнитных параметров, по которым однозначно на всем диапазоне температур термообработки можно будет судить о качестве изделий из инструментальной углеродистой стали У8А, а также для повышения точности и стабильности контроля намагничивание осуществлялось двумя последовательно следующими импульсами и передним фронтом намагничивающего импульса (для замыкания петли) разной полярности и амплитуды в разомкнутой магнитной цепи. Для этого использовался разработанный в Институте прикладной физики НАН Беларуси измеритель магнитной индукции импульсный ИМИ–И с дополнительным шунтом и дросселем, что позволило увеличить передний фронт намагничивающего импульса [7].

Измерялась магнитная индукция образца в процессе его двухполярного несимметричного импульсного намагничивания-перемагничивания в проходном соленоиде прибора ИМИ–И. При этом первый намагничивающий импульс имел амплитуду порядка 40 кА/м, что достаточно для доведения материала образца до состояния, близкого к техническому насыщению, а размагничивающий – около 15 кА/м. Для замыкания петли магнитного гистерезиса образец снова намагничивали импульсом исходной полярности амплитудой порядка 40 кА/м (передним фронтом). Длительность каждого из импульсов составляла 400 мс, длительность переднего фронта первого и третьего импульсов – 80 мс, а второго – 130 мс. Форма и последовательность импульсов магнитного поля представлены на рис. 1.

При таком режиме намагничивания-перемагничивания образца получается несимметричная петля магнитного гистерезиса, представляющая собой часть предельной петли и часть частной петли. Форма этой петли и измеряемые по ней характеристики, как стандартные, так и новые, а также начальная кривая намагничивания, представлены на рис. 2. При этом воздействию переднего фронта первого импульса на данном рисунке соответствует участок 0–1 (начальная кривая намагничивания), заднего фронта этого импульса – участок 1–2 (первая часть нисходящей ветви), переднего фронта второго импульса – участок 2–3 (вторая часть нисходящей ветви), заднего фронта второго импульса – участок 3–4 (первая часть восходящей ветви), переднего фронта третьего импульса – участок 4–1 (вторая часть восходящей ветви).

В процессе намагничивания-перемагничивания измерялись или рассчитывались:

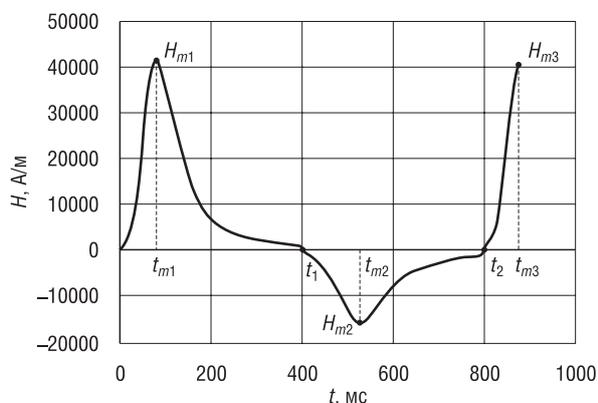


Рис. 1. Форма и последовательность импульсов намагничивания-перемагничивания

Fig. 1. A shape and a sequence of magnetization-remagnetization pulses

по начальной кривой намагничивания:

μ_m – максимальная магнитная проницаемость; $H_{\mu m}$ – величины поля при максимальной магнитной проницаемости по начальной кривой; B_m – максимальная магнитная индукция;

по нисходящей ветви: B_r – остаточная магнитная индукция; H_c – коэрцитивная сила; B_{mp} – магнитная индукция при максимальной амплитуде размагничивающего импульса;

по восходящей петле: H_{ca} – коэрцитивная сила по несимметричной петле (знак зависит от амплитуды размагничивающего импульса); B_{ra} – остаточная магнитная индукция по несимметричной петле (знак зависит от амплитуды размагничивающего импульса).

Кроме того, определяли площадь S между начальной кривой намагничивания и первой

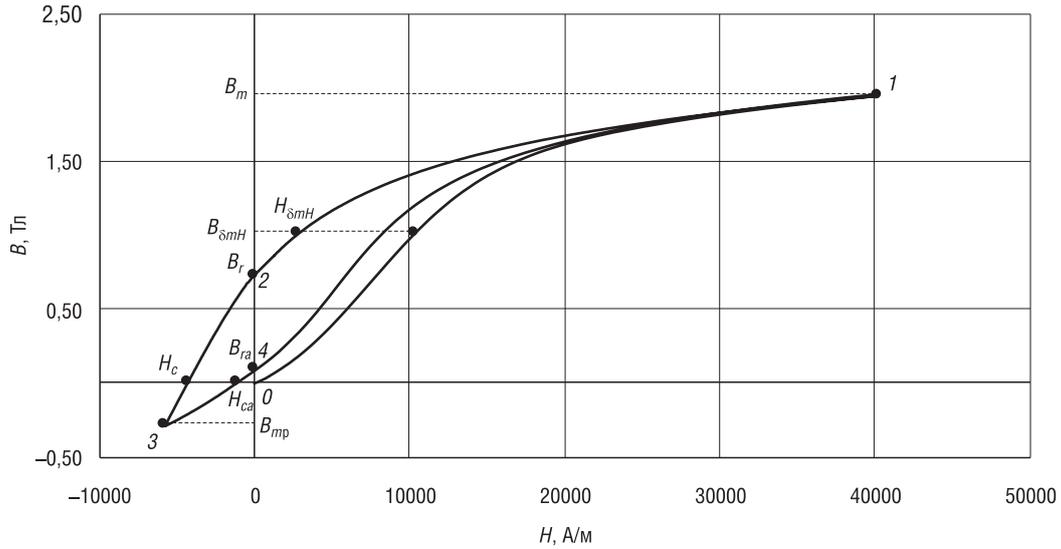


Рис. 2. Информативные параметры по начальной кривой намагничивания и несимметричной петле магнитного гистерезиса

Fig. 2. Informative parameters of the initial magnetization curve and asymmetric magnetic hysteresis loop

частью ниспадающей ветви; максимальную разницу δ_{mH} вдоль оси H между начальной кривой намагничивания и первой частью ниспадающей ветви; магнитную индукцию $B_{\delta mH}$, а также напряженность магнитного поля $H_{\delta mH}$ по нисходящей ветви при δ_{mH} и разность $\delta_{B_{mp}-B_r}$ между магнитной индукцией при максимальной амплитуде размагничивающего импульса и остаточной магнитной индукции.

Результаты исследования. Импульсный магнитный контроль температуры закалки инструментальной стали У8А. Для получения качественного инструмента из стали У8А необходимо провести его термическую обработку и получить требуемую структуру. Для этого обеспечивают нагрев до требуемых по ГОСТ 1435-99 температур (780–800 °С) при закалке, так как в первую очередь именно она позволяет получить те механические свойства, которые характеризуют высокое качество инструмента.

На рис. 3 представлены зависимости магнитных параметров, измеренных по несимметричной петле магнитного гистерезиса, от температуры закалки испытуемых образцов стали У8А.

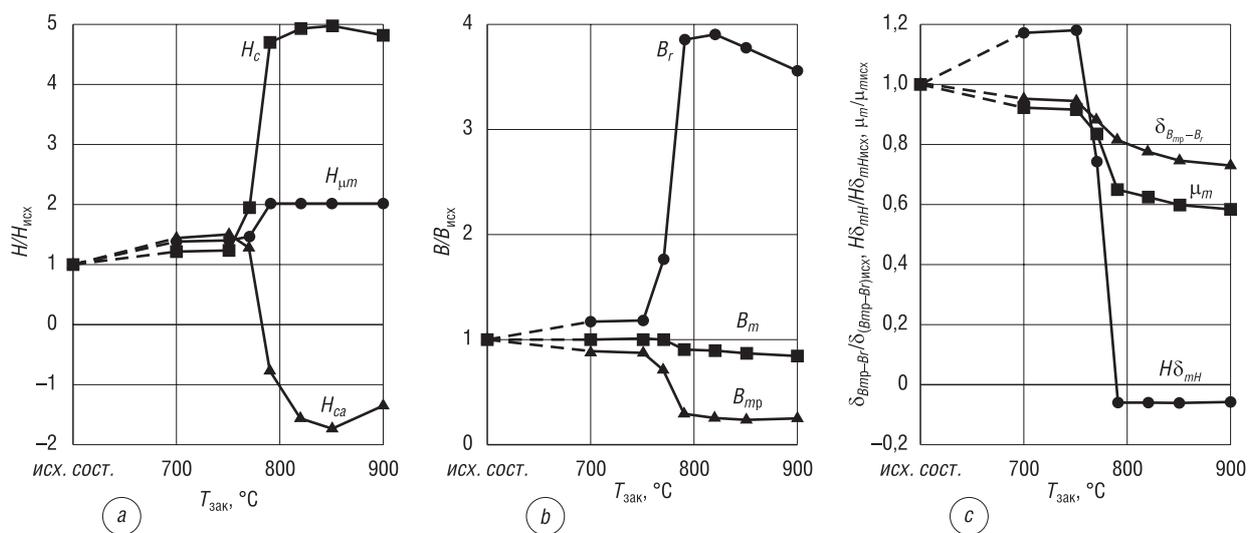


Рис. 3. Зависимость магнитных параметров стали У8А при импульсном двухполярном несимметричном намагничивании от температуры нагрева под закалку в относительных единицах

Fig. 3. Dependence of U8A steel magnetic parameters and hardening temperature during pulsed bipolar asymmetric magnetization in relative units

Для наглядности и простоты сравнения параметры были взяты в относительных единицах от соответствующих величин для незакаленного состояния. Такой подход к представлению результатов эксперимента позволяет оценить не только пригодность того или иного магнитного параметра для импульсного магнитного контроля качества термообработки, но и чувствительность к температуре закалки.

Внешний вид хода зависимостей параметров, измеренных при импульсном намагничивании в проходном датчике, подобен зависимостям аналогичных магнитных параметров, измеренных при квазистатическом режиме намагничивания в замкнутой магнитной цепи [2]. Для всех рассматриваемых параметров характерно резкое изменение их величин для образцов, закаленных от температур, при которых в материале происходят основные структурные превращения, а именно появление мартенсита. Дальнейшее увеличение температуры нагрева образцов под закалку не приводит к значительным изменениям величин всех магнитных параметров.

Скорость изменения измеряемых величин с ростом температур закалки образцов различна для разных параметров, например, при повышении температуры закалки от 750 до 790 °С величина коэрцитивной силы H_c образцов изменяется более чем в 3,5 раза, а для максимальной магнитной индукции B_m это изменение составляет около 10 %. Для величин характеристик напряженностей магнитного поля имеет место резкий рост с увеличением температуры нагрева под закалку, конкретные значения которых зависят от рассматриваемых магнитных параметров (рис. 3, а). Так, для коэрцитивной силы H_c и коэрцитивной силы по несимметричной петле H_{ca} он наблюдается до температуры, равной 820 °С, а для поля $H_{\text{ум}}$ – до температуры 790 °С.

С дальнейшим ростом температуры закалки коэрцитивная сила H_c и коэрцитивная сила по несимметричной петле H_{ca} меняются неоднозначно, в то же время параметр $H_{\text{ум}}$ практически не меняет своей величины. Это не позволяет использовать параметры H_c , H_{ca} и $H_{\text{ум}}$ при магнитном контроле температуры нагрева под закалку во всем диапазоне, но по величинам H_c и H_{ca} можно выявлять перегрев и недогрев под закалку образцов стали У8А.

Если для всех рассматриваемых параметров, связанных с напряженностью магнитного поля, наблюдается резкое изменение величин (в 3,5 раза для коэрцитивной силы H_c , в 2,5 раза для коэрцитивной силы по несимметричной петле H_{ca} и в 1,5 раза для напряженности поля $H_{\text{ум}}$ при максимальной магнитной проницаемости по начальной кривой), то для значений магнитной индукции (см. рис. 3, б) такое резкое изменение величины параметра характерно только для остаточной магнитной индукции B_r (приблизительно в 3 раза в интервале изменения температур закалки от 700 до 790 °С).

Величина магнитной индукции $B_{\text{мп}}$ при максимальной амплитуде размагничивающего импульса изменяется на 40 %, а максимальной магнитной индукции B_m – на 10 %.

Дальнейшее увеличение температуры нагрева под закалку приводит к уменьшению величины B_r и практически постоянным значениям $B_{\text{мп}}$ и B_m .

Неоднозначная зависимость остаточной магнитной индукции B_r , нечувствительность параметра $B_{\text{мп}}$ в области температур свыше 790 °С и низкая чувствительность максимальной магнитной индукции B_m к изменению температуры нагрева под закалку, которая составляет менее 15 % во всем диапазоне изменения температур, не позволяют использовать эти параметры для импульсного магнитного контроля качества термообработки инструментальной углеродистой стали У8А.

Максимальная магнитная проницаемость μ_m , определяемая по начальной кривой (рис. 3, с), имеет однозначную зависимость от температуры нагрева под закалку, однако при перегреве под закалку чувствительность этого параметра незначительна и составляет не более 5 % на 100 °С, что препятствует контролю всего диапазона изменения температур закалки. Недогрев под закалку по параметру μ_m можно осуществлять с чувствительностью около 30 % на 100 °С.

Напряженность магнитного поля $H\delta_{mH}$ по ниспадающей ветви при δ_{mH} (см. рис. 3, с), как и большинство рассматриваемых магнитных параметров, чувствительна к недогреву под закалку, но не может быть применена для контроля перегрева под закалку, так как эта величина в диапазоне изменения температур закалки от 790 до 900 °С остается практически постоянной.

Разность $\delta_{B_{\text{мп}}-B_r}$ между магнитной индукцией при максимальной амплитуде размагничивающего импульса и остаточной магнитной индукцией является наиболее оптимальным параметром для импульсного магнитного контроля в проходном датчике (см. рис. 3, с). Для этой величины наблюдается однозначный ход зависимости от температуры нагрева под закалку, причем уменьшение величины $\delta_{B_{\text{мп}}-B_r}$ с ростом температуры в области структурных превращений про-

исходит со скоростью около 15 % на 100 °С, что является приемлемой чувствительностью для целей неразрушающего контроля.

Таким образом, исследования показали, что выявление недогрева при закалке возможно по целому ряду магнитных параметров, полученных по начальной кривой намагничивания и несимметричной петле магнитного гистерезиса в процессе импульсного намагничивания в проходном датчике. Для выявления годной структуры углеродистой инструментальной стали У8А можно использовать такие параметры, как коэрцитивная сила H_c и коэрцитивная сила по несимметричной петле H_{ca} , а контроль температуры закалки во всем диапазоне ее возможных изменений с достаточной чувствительностью возможен только по величине разности $\delta_{B_{mp}-B_r}$ между магнитной индукцией при максимальной амплитуде размагничивающего импульса и остаточной магнитной индукцией.

Импульсный магнитный контроль температуры отпуска инструментальной стали У8А.

Задача неразрушающего контроля качества отпуска изделий из инструментальной углеродистой стали У8А усложняется тем, что требуется обеспечение достаточно высокой точности контроля в широком диапазоне возможных температур отпуска.

Для наглядности, как и при исследовании влияния температуры нагрева под закалку, зависимости магнитных параметров от температуры отпуска представлены в относительных единицах от их величин, измеренных на закаленном образце (рис. 4). Из рисунка видно, что все рассматриваемые магнитные параметры чувствительны к структурным изменениям, вызываемым нагревом при отпуске, однако дальнейшее увеличение температуры отпуска приводит к сложным и неоднозначным изменениям их величин.

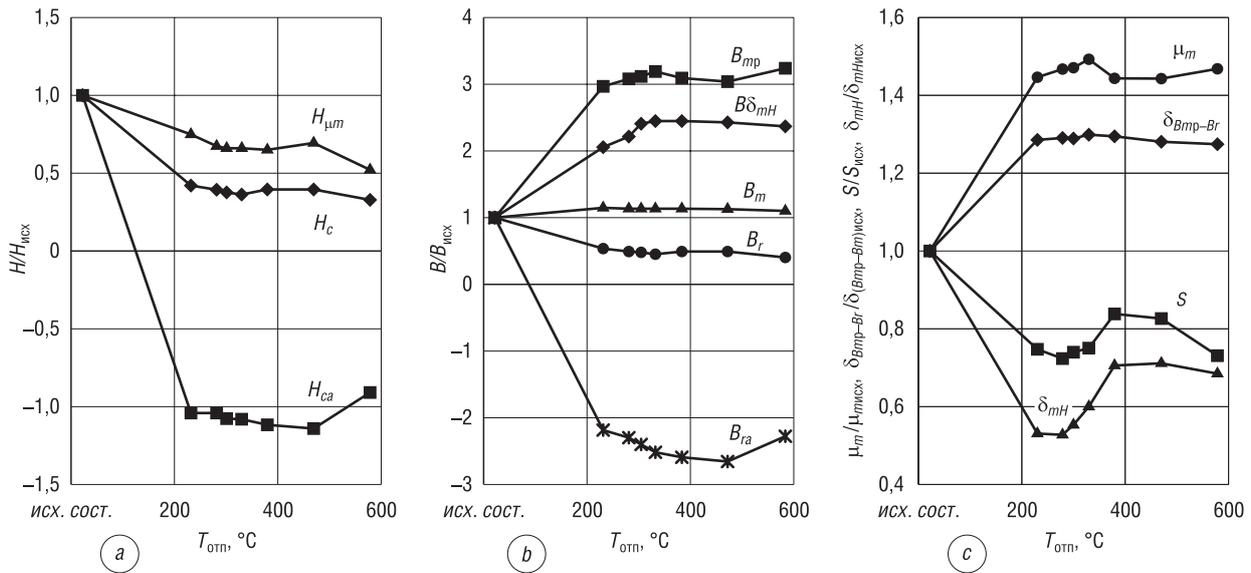


Рис. 4. Зависимость магнитных параметров стали У8А при импульсном двухполярном несимметричном намагничивании от температуры отпуска в относительных единицах

Fig. 4. Dependence of U8A steel magnetic parameters and tempering temperature during pulsed bipolar asymmetric magnetization in relative units

Величины коэрцитивной силы H_c и коэрцитивная сила по несимметричной петле H_{ca} , представленные на рис. 4, а, после резкого уменьшения значений при достижении температуры отпуска, превышающей точку A_0 , практически не изменяются вплоть до температуры 500 °С. При дальнейшем повышении температуры отпуска наблюдается незначительное изменение H_c и H_{ca} , обусловленное изменением количества и дисперсности слабомагнитной карбидной фазы [1].

Напряженность магнитного поля $H_{ум}$, соответствующая максимальной магнитной проницаемости по начальной кривой намагничивания, убывает до температуры 280 °С, соответствующей нижней границе требуемых по ГОСТ 1435-99 режимов термообработки, затем практически не меняется в области температур, наиболее часто выдерживаемых при отпуске изделий из стали У8А, а после

незначительно уменьшается при температуре отпуска выше 500 °С. Параметр $H_{\text{лн}}$ может быть использован для выявления недогрева при отпуске, однако контроль в области режимов термообработки, обеспечивающих разные эксплуатационные свойства, по этому параметру невозможен.

Величины, связанные с магнитной индукцией, такие как остаточная магнитная индукция B_r , остаточная магнитная индукция по несимметричной петле B_{ra} , магнитная индукция B_{mp} при максимальной амплитуде размагничивающего импульса и магнитная индукция $B\delta_{mH}$ при δ_{mH} (рис. 4, *b*) однозначно изменяются с ростом температуры отпуска до 330 °С, хотя в области температур 275–350 °С, рекомендуемых ГОСТ, их чувствительность меняется от почти 50 % на 100 °С для $B\delta_{mH}$ до 10 % на 100 °С для B_r . Дальнейшее повышение температуры отпуска приводит к неоднозначной зависимости рассматриваемых параметров. Результаты эксперимента позволяют сделать вывод о пригодности использования параметров B_r , B_{mp} и $B\delta_{mH}$ только для контроля низко- и среднетемпературного отпуска.

Иначе ведет себя максимальная магнитная индукция B_m (рис. 4, *b*), зависимость которой от температуры отпуска образцов стали У8А монотонно убывает при температурах, где начинаются структурные превращения. Данный магнитный параметр мог бы быть перспективным для контроля отпуска стали У8А, однако, как и для контроля закалки, его существенным недостатком является чрезвычайно низкая чувствительность, составляющая не более 2 % на 100 °С.

Другие магнитные параметры, представленные на рис. 4, *c*, не могут быть использованы для контроля качества отпуска. Так, максимальная магнитная проницаемость, определяемая по начальной кривой намагничивания, μ_m и разность $\delta_{B_{mp}-B_r}$ между магнитной индукцией при максимальной амплитуде размагничивающего импульса и остаточной магнитной индукцией после начала структурных превращений при достижении температуры отпуска 200 °С практически не изменяются с дальнейшим повышением температуры отпуска. Площадь S между начальной кривой намагничивания и первой частью ниспадающей ветви и максимальная разница δ_{mH} вдоль оси H между начальной кривой намагничивания и первой частью ниспадающей ветви имеют неоднозначный ход зависимости от температуры отпуска с падением значений в диапазоне до 280 °С, ростом в интервале изменения температур от 280 до 380 °С и дальнейшим уменьшением.

В результате проведенного анализа влияния температуры отпуска на магнитные параметры, измеренные при импульсном намагничивании в проходном датчике в разомкнутой цепи, можно сделать вывод о невозможности использования какого-либо из рассмотренных параметров для контроля отпуска стали У8А в широком диапазоне температур его изменения. Контроль низкотемпературного отпуска (до 350 °С) с достаточной точностью и чувствительностью возможен по остаточной магнитной индукции по несимметричной петле B_{ra} и магнитной индукции $B\delta_{mH}$ при напряженности магнитного поля соответствующего максимальной разности δ_{mH} вдоль оси H .

Выводы. 1. Впервые при импульсном несимметричном режиме намагничивания исследованы магнитные характеристики термообработанной стали У8А по начальной кривой и несимметричной петле магнитного гистерезиса в проходном датчике в разомкнутой магнитной цепи. Установлено, что зависимости магнитных параметров по начальной кривой намагничивания и несимметричной петле гистерезиса от температуры термообработки образцов инструментальной углеродистой стали У8А при импульсном двухполярном несимметричном намагничивании в проходном датчике в разомкнутой магнитной цепи аналогичны зависимостям рассмотренных параметров, полученных при квазистатическом намагничивании образцов из этой стали в замкнутой магнитной цепи.

2. Для контроля температуры нагрева под закалку изделий из инструментальной углеродистой стали У8А можно использовать величину разности $\delta_{B_{mp}-B_r}$ между магнитной индукцией при максимальной амплитуде размагничивающего импульса и остаточной магнитной индукцией. Выявить недогрев и перегрев под закалку рассматриваемой марки стали можно по величинам коэрцитивной силы H_c и коэрцитивной силе по несимметричной петле H_{ca} , однако контроль температуры закалки во всем диапазоне по этим параметрам затруднителен.

3. Контроль низкотемпературного (до 350 °С) отпуска с достаточно высокой, не менее 40 % на 100 °С, чувствительностью возможен по таким параметрам, как остаточная магнитная индукция по несимметричной петле B_{ra} и магнитная индукция $B\delta_{mH}$ при напряженности магнитного поля соответствующего максимальной разности δ_{mH} вдоль оси H .

4. Контроль температуры отпуска стали У8А в широком диапазоне изменения температур при импульсном двухполярном несимметричном намагничивании в разомкнутой магнитной цепи невозможен. Для решения этой задачи требуется поиск принципиально новых информативных параметров или их сочетаний.

Список использованных источников

1. Морозова, В.М. Магнитные и электрические свойства закаленных и отпущенных углеродистых сталей / В.М. Морозова, М.Н. Михеев // Тр. Ин-та физики металлов. – М.: Изд. Акад. наук СССР, 1965. – Вып. 24. – С. 26–35.
2. Короткевич, З.М. Информативные параметры для магнитного контроля качества закалки инструментальной углеродистой стали У8А / З.М. Короткевич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 2. – С. 17–28.
3. Бурак, В.А. Информативные параметры для магнитного контроля качества отпуска инструментальной углеродистой стали У8А / В.А. Бурак, З.М. Короткевич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2013. – № 4. – С. 31–41.
4. Влияние температур закалки и отпуска на структуру и магнитные свойства инструментальных углеродистых сталей / В.Ф. Матюк [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 1. – С. 25–49.
5. Матюк, В.Ф. Измерение магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий при квазистатическом перемагничивании / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – № 4. – С. 3–34.
6. Матюк, В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального двухполярного импульсного намагничивания / В.Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 4. – С. 20–45.
7. Прибор для измерения магнитной индукции ферромагнитных стержней в процессе импульсного намагничивания-перемагничивания / З.М. Короткевич [и др.] // Приборостроение-2013: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 нояб. 2013 г. / редкол.: О.К. Гусев (предс.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 70–72.
8. Лахтин, Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1980. – 493 с.
9. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – М.: Металлургия, 1968. – 568 с.
10. Матюк, В.Ф. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов // Дефектоскопия. – 2007. – № 3. – С. 12–25.

References

1. Morozova V. M., Miheev M. N. Magnetic and electrical properties of hardened and tempered carbon steels. *Trudy Instituta fiziki metallov* [Proceedings of Institute of Metal Physics], 1965, iss. 24, pp. 26–35 (in Russian).
2. Korotkevich Z. M. Informative parameters for magnetic tool carbon steel U8A hardening quality testing. *Nerazrushaiushchii kontrol' i diagnostika* [Nondestructive Testing and Diagnostics], 2012, no. 2, pp. 17–28 (in Russian).
3. Burak V. A., Korotkevich Z. M. Informative parameters for magnetic tool carbon steel U8A tempering quality testing. *Nerazrushaiushchii kontrol' i diagnostika* [Nondestructive Testing and Diagnostics], 2013, no. 4, pp. 31–41 (in Russian).
4. Matyuk V. F., Burak V. A., Korotkevich Z. M., Osipov A. A. The effect of hardening and tempering temperatures on the structure and magnetic properties of tool carbon steels. *Nerazrushaiushchii kontrol' i diagnostika* [Nondestructive Testing and Diagnostics], 2012, no. 1, pp. 25–49 (in Russian).
5. Matyuk V. F., Osipov A. A. Measurement of magnetic characteristics of soft magnetic materials and products in quasi-static reversal magnetization. *Nerazrushaiushchii kontrol' i diagnostika* [Nondestructive Testing and Diagnostics], 2011, no. 4, pp. 3–34 (in Russian).
6. Matyuk V. F. Magnetic structuroscopy instruments based on local bipolar pulsed magnetization. *Nerazrushaiushchii kontrol' i diagnostika* [Nondestructive Testing and Diagnostics], 2012, no. 4, pp. 20–45 (in Russian).
7. Korotkevich Z. M., Matyuk V. F., Tsukerman V. L., Osipov A. A. An instrument for measuring the magnetic induction of ferromagnetic rods during the pulsed magnetization-magnetic reversal process. *PriBORostroenie-2013. Materialy 6-i Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii* [Instrument Making'2013: Proc. of the 6th International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 2013, pp. 70–72 (in Russian).
8. Lahtin U. M., Leont'eva V. P. *Materials Science*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 493 p. (in Russian).
9. Geller U. A. *Tool Steels*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968. 568 p. (in Russian).
10. Matyuk V. F., Osipov A. A. Installation UIMH for measuring the magnetic characteristics of soft magnetic materials and products. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2007, no. 3, pp. 143–153. <https://doi.org/10.1134/s1061830907030035>

Информация об авторах

Короткевич Зоя Марковна – научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kzm@iaph.bas-net.by

Бурак Вероника Анатольевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: veronika.burak@gmail.com

Information about the authors

Zoya M. Korotkevich – Researcher, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kzm@iaph.bas-net.by

Veronika A. Burak – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: veronika.burak@gmail.com