

**ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ДЛЯ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОТПУСКА
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ У8А**
*Informative parameters for magnetic testing grade
of tempering tool carbon steel У8А*

Бурак В.А., Короткевич З.М.
Burak V.A., Korotkevich Z.M.

На основе анализа влияния температуры отпуска на магнитные свойства инструментальной углеродистой стали У8А, измеренных в квазистатическом режиме перемагничивания в замкнутой магнитной цепи, предложены новые информативные параметры для магнитного контроля, позволяющие оценивать температуру отпуска во всем диапазоне изменения.

Based on the analysis of the influence of tempering temperature on the structure and magnetic properties of tool carbon steel У8А measured in the quasi-static remagnetization mode in a closed magnetic circuit, the new informative parameters for the magnetic testing which allow to reliably detect the whole range of tempering temperature of the steel are proposed.

Введение

Одной из важных и актуальных задач машиностроения и металлообработки, требующей однозначного и достоверного решения, является контроль качества термообработки инструментальных сталей, к которым относится и углеродистая сталь У8А. Эта марка стали широко используется на машиностроительных предприятиях для изготовления таких инструментов, как метчики ручные, рашпили, надфили, пилы для обработки древесины и др. [1].

Температуру отпуска инструментальных углеродистых сталей, согласно [2], однозначно можно контролировать по величинам твердости и удельного электрического сопротивления. Низкотемпературный отпуск углеродистых инструментальных сталей контролируют по величине релаксационной коэрцитивной силы, среднетемпературный – по максимальной магнитной проницаемости и дифференциальной магнитной проницаемости, а высокотемпературный отпуск контролировать невозможно ни по какой стандартной магнитной ха-

рактике. Поэтому поиск новых информативных параметров для контроля температуры отпуска инструментальных углеродистых сталей и, в частности, стали У8А, во всем диапазоне ее изменения является весьма актуальной задачей.

В настоящей работе приводятся результаты исследований возможности использования комбинаций стандартных магнитных характеристик инструментальной высококачественной углеродистой стали У8А, измеренных при квазистатическом перемагничивании в замкнутой магнитной цепи, для однозначного определения температуры, при которой проводился отпуск после закалки от 790 °С.

Режимы термообработки и методика измерений. Химический состав стали У8А согласно ГОСТ представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав стали У8А (ГОСТ 1435–99) [3]

| Массовая доля элемента, % | | | | |
|---------------------------|-----------|-----------|----------|---------|
| Углерода | Кремния | Марганца | Серы | Фосфора |
| | | | не более | |
| 0,75–0,84 | 0,17–0,33 | 0,17–0,28 | 0,018 | 0,025 |

Также сталь У8А может содержать примеси других, помимо перечисленных в таблице 1, химических элементов: до 0,40 % Cr, до 0,25 % Ni и до 0,25 % Cu.

Для получения достаточной для инструментов твердости 48–51 HRC эвтектоидную сталь У8А нагревают под закалку в воду на 30–50 °С выше критической точки $A_{с3}$, что соответствует $T_{зак} = 780–800$ °С, и подвергают низкотемпературному отпуску на воздухе на троостит при температуре $T_{отп} = 275–350$ °С [1].

Одной из особенностей эвтектоидной стали У8А, как и других инструментальных углеродистых сталей, является широкий диапазон используемых температур отпуска для получения на выходе изделий с необходимыми механическими свойствами (твердостью, прочностью, вязкостью). Так, например, для сохранения высокой твердости (62–64 HRC) температура отпуска не должна превышать 200 °С, а для повышения вязкости инструмент отпускают при температуре 400 °С [1].

Измерения магнитных свойств стали У8А проводились на кольцевых образцах, имевших внешний диаметр 17 мм, внутренний диаметр 13,2 мм, высоту 10 мм. Перемагничивание образцов в квазистатическом режиме в замкнутой магнитной цепи с частотой 0,05 Гц осуществлялось на установке УИМХ [4].

Для получения разных механических свойств образцы стали У8А нагревались под закалку в течение 10 минут от рекомендуемой по ГОСТ температуры $T_{\text{зак}} = 790 \text{ }^\circ\text{C}$ в среде, защищающей металл от обезуглероживания, с охлаждением в воде, а затем отпускались в течение 1 часа с охлаждением на воздухе при температурах 100, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 350, 400, 450, 500, 550 и 600 $^\circ\text{C}$.

Анализ стандартных магнитных характеристик. По основной кривой намагничивания определялись следующие стандартные характеристики: максимальная намагниченность M_m ; начальная μ_n и максимальная μ_m магнитные проницаемости; напряженность намагничивающего поля $H_{\mu m}$, при котором достигается μ_m ; намагниченности $M_{\mu m}$, M_{H_c} и M_{2H_c} при магнитном поле, равном $H_{\mu m}$, коэрцитивной силе H_c и двум коэрцитивным силам $2H_c$ соответственно.

По предельной петле магнитного гистерезиса определялись: остаточная намагниченность M_r ; коэрцитивная сила H_c ; релаксационная коэрцитивная сила H_r ; релаксационная намагниченность M_{H_r} ; остаточная намагниченность M_{r_c} после снятия поля, равного H_c ; максимальная дифференциальная магнитная проницаемость μ_{dm} и дифференциальная магнитная проницаемость μ_{dH_c} при размагничивающем поле, равном коэрцитивной силе H_c ; напряженность намагничивающего поля $H_{\mu dm}$, соответствующая максимуму дифференциальной магнитной проницаемости.

По результатам измерений стандартных характеристик по основной кривой намагничивания и по предельной петле магнитного гистерезиса рассчитывались: намагниченность насыщения M_s (по закону приближения к насыщению), релаксационная магнитная проницаемость $\mu_r = M_{H_r}/H_r + 1$, магнитная проницаемость $\mu_{rc} = M_{rc}/H_c + 1$ на кривой возврата от поля равного коэрцитивной силе и параметр $K_n = 1 - M_r/M_m$.

Поведение стандартных магнитных характеристик. Зависимости стандартных магнитных характеристик образцов из стали У8А, закаленных от 790 $^\circ\text{C}$ и отпущенных при разных температурах, представлены на рисунке 1.

Изменения магнитных свойств эвтектоидной углеродистой инструментальной стали У8А при отпуске при разных температурах обусловлены сложными структурными изменениями, происходящими в материале.

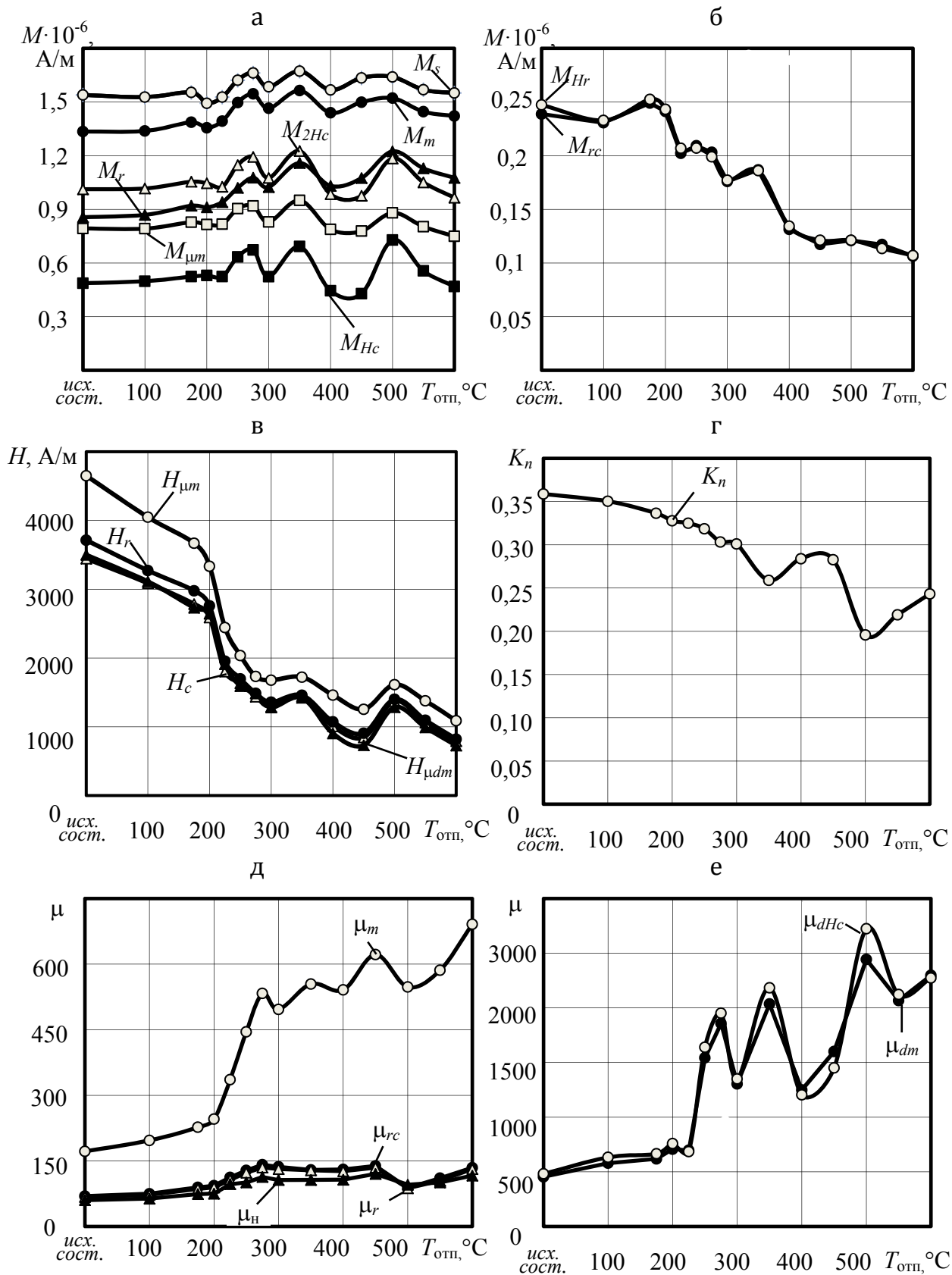


Рис. 1. Зависимость магнитных параметров стали У8А при квазистатическом перемагничивании от температуры отпуска

Нагрев образцов до температуры отпуска 175 °С плавно уменьшает величины полевых магнитных параметров H_c , H_r , $H_{\mu m}$ и $H_{\mu dm}$ в среднем на 20 %, практически не изменяет величины намагниченностей и незначительно увеличивает магнитные проницаемости. Эти изменения объясняются уменьшением концентрации углерода в мартенсите, полученном после закалки, и снижением напряжений [5].

Увеличение температуры отпуска до 300 °С приводит к резкому изменению всех магнитных характеристик стали У8А. Так, например, величины H_c , H_r , $H_{\mu m}$ и $H_{\mu dm}$ уменьшаются в 2-2,5 раза, намагниченности M_m , M_s , M_{Hc} , M_{2Hc} , $M_{\mu m}$ и M_{Hr} имеют минимальное значение при 225 °С, затем следует резкое увеличение этих магнитных параметров с ростом температуры отпуска, и при 275 °С наблюдается максимальное значение этих намагниченностей. Все рассматриваемые в данной работе магнитные проницаемости также ведут себя неоднозначно в рассматриваемом интервале изменения температур отпуска и имеют максимальное значение при 275 °С. Это обусловлено распадом остаточного аустенита на отпущенный мартенсит и карбиды, что снижает твердость и повышает вязкость материала [6].

Дальнейшее повышение температуры отпуска до 400 °С не приводит к значительным изменениям величин магнитных проницаемостей μ_n , μ_r и μ_{rc} , магнитная проницаемость μ_m при температуре 350 °С имеет небольшой перегиб, а у дифференциальных магнитных проницаемостей μ_{dHc} и μ_{dm} при этой температуре отпуска наблюдается резкое увеличение. Некоторый незначительный рост величин (порядка 5 %) наблюдается при 350 °С у полевых характеристик H_c , H_r , $H_{\mu m}$ и $H_{\mu dm}$ и всех рассматриваемых намагниченностей.

В диапазоне изменения температуры отпуска от 400 до 600 °С однозначную зависимость от температуры отпуска имеет только намагниченность M_{Hr} . Остальные рассматриваемые магнитные параметры изменяются неоднозначно. Полевые величины H_c , H_r , $H_{\mu m}$ и $H_{\mu dm}$ и намагниченности M_{Hc} , M_{2Hc} , $M_{\mu m}$ на этом диапазоне имеют два перегиба – минимум при 450 °С и максимум при 500 °С. Для магнитных проницаемостей μ_m , μ_n , μ_r и μ_{rc} характерен также неоднозначный ход зависимостей в этом диапазоне изменения температуры отпуска, однако при 450 °С наблюдается максимум, а при 500 °С – минимум. Остальные рассматриваемые магнитные параметры имеют характерный максимум при 500 °С, что объясняется количеством и дисперсностью слабомагнитной карбидной фазы [6].

Анализ представленных выше зависимостей магнитных парамет-

ров стали У8А от изменения температуры отпуска позволяет говорить, что низкотемпературный отпуск исследуемой стали надежно выявляется по ряду стандартных магнитных характеристик (H_c , H_r , $H_{\mu m}$, $H_{\mu dm}$, μ_m , μ_{rc}), а высокотемпературный отпуск можно определить по величине намагниченности M_{Hr} . Среднетемпературный отпуск проконтролировать однозначно не представляется возможным ни по одной из рассмотренных магнитных характеристик.

Таким образом, исходя из отсутствия однозначной зависимости стандартных магнитных характеристик от температуры отпуска во всем диапазоне ее изменения, необходимо установить иные информативные параметры для контроля качества отпуска стали У8А.

Информативные параметры для контроля. Одним из наиболее простых способов решения задачи контроля температуры отпуска стали У8А с достаточной достоверностью и надежностью является измерение несколько магнитных характеристик и поиск комплексного параметра, их связывающего. Так, в литературе [7] имеется ряд примеров использования двух и более магнитных характеристик, для контроля качества отпуска используются такие два параметра, как коэрцитивная сила H_c и намагниченность насыщения M_s или коэрцитивная сила H_c и релаксационная магнитная проницаемость μ_r .

В качестве информативных параметров для контроля температуры отпуска стали У8А во всем диапазоне изменения рассматривали различные комбинации стандартных магнитных характеристик этой стали. Для нивелирования влияния порядка величин в общий вклад комплексного информативного параметра арифметические операции проводили над значениями исследуемых стандартных характеристик, взятыми относительно закаленного состояния (рис. 2). При исследовании новых информативных параметров учитывалась необходимость обеспечения их чувствительности во всем диапазоне изменения температур отпуска. Кроме того, учитывалась и данная в [7] рекомендация о целесообразности отказа от магнитных характеристик, определяемых на кривой намагничивания и имеющих аналоги на предельной петле магнитного гистерезиса и кривой возврата, по причине зависимости точности их определения от качества размагничивания контролируемых изделий и сложности измерения той или иной магнитной характеристики.

Предварительный анализ кривых зависимостей магнитных характеристик в относительной форме (рис. 2) позволяет исключить из рассмотрения ряд характеристик (M_m , $M_{\mu m}$, M_{Hc} , M_{2Hc} , M_r , M_s , μ_{dm} и μ_{dHc}) по причине их малой чувствительности и сложной неоднозначной связи с температурой отпуска.

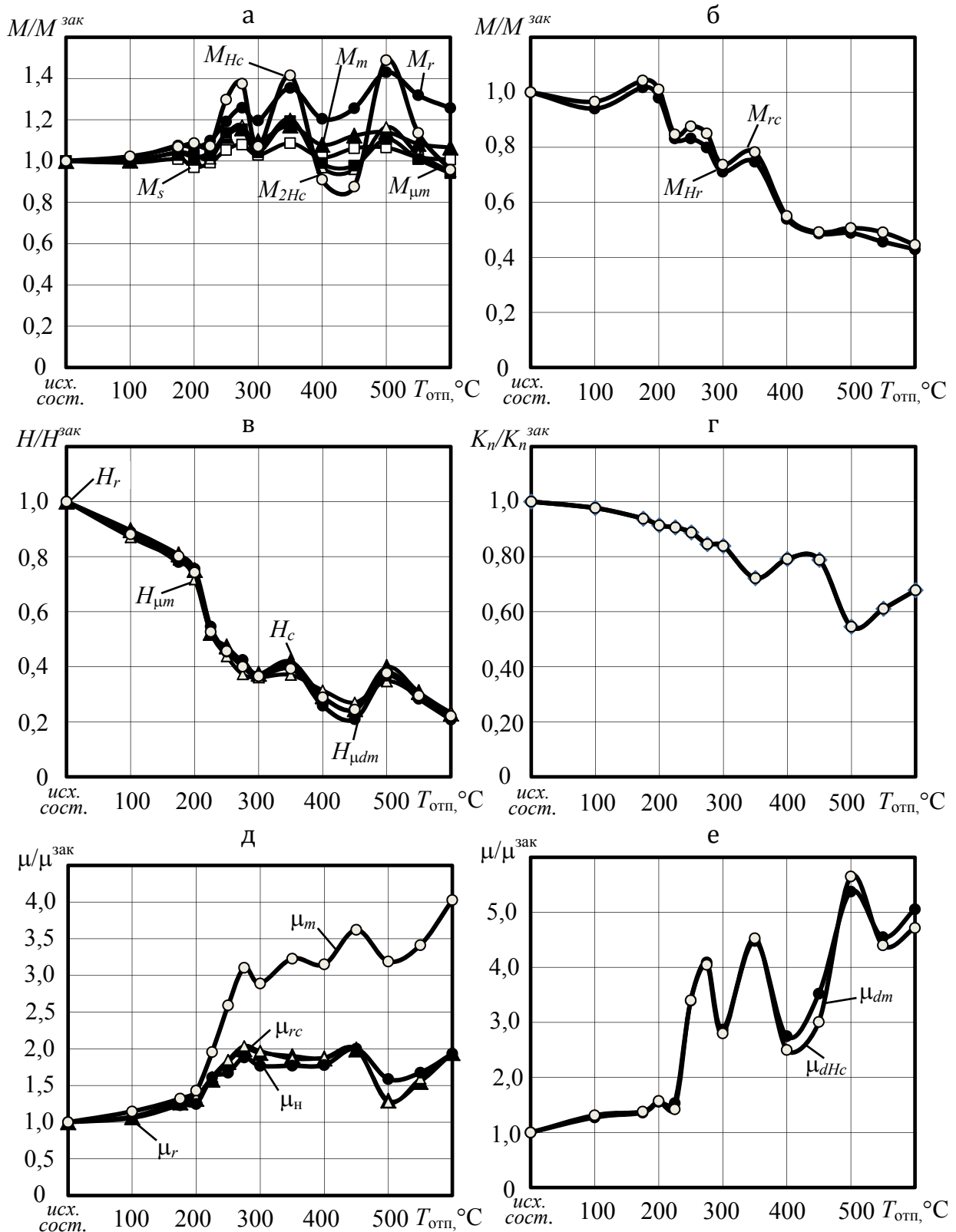


Рис. 2. Зависимость магнитных параметров стали У8А при квазистатическом перемагничивании от температуры отпуска в относительных единицах

Для использования в качестве информативного параметра разности магнитных характеристик необходимо, чтобы магнитные характеристики имели различный ход зависимости. Исходя из этого, можно выделить два информативных параметра:

$$U_1 = \frac{H_c}{H_c^{\text{зак}}} - \frac{\mu_m}{\mu_m^{\text{зак}}}; U_2 = \frac{M_{rc}}{M_{rc}^{\text{зак}}} - \frac{\mu_m}{\mu_m^{\text{зак}}} \quad (1)$$

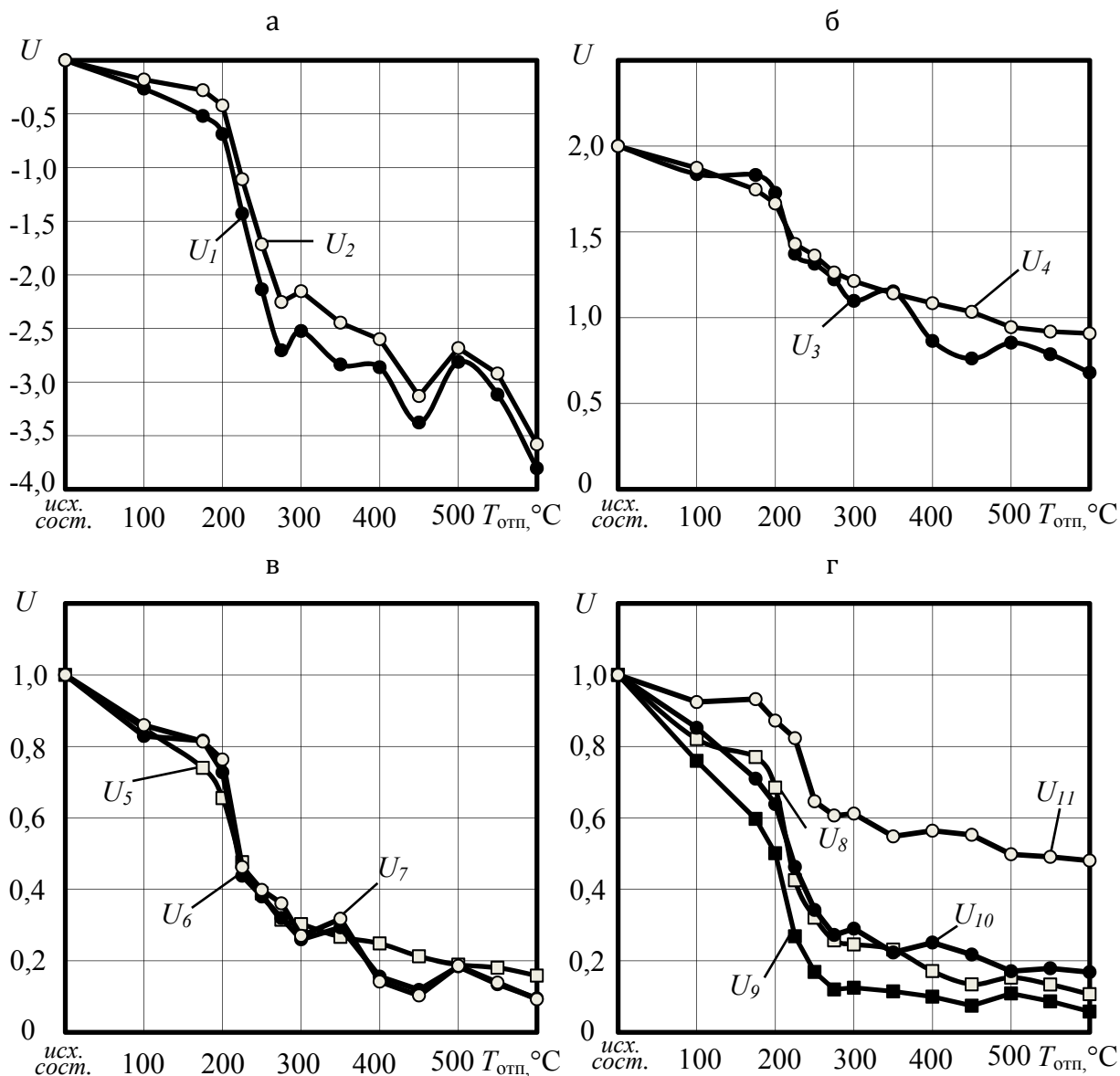


Рис. 3. Зависимость информационных параметров $U_1 - U_{11}$ стали У8А от температуры нагрева под отпуск

Зависимости параметров U_1 и U_2 от температуры нагрева под закалку представлены на рисунке 3, а. Средняя чувствительность во всем диапазоне температур отпуска составляет около 0,6 %/°C для U_1 и U_2 , однако однозначная зависимость с хорошей чувствительностью (0,8 %/°C) для этих параметров наблюдается только в области низкотемпературного отпуска, соответственно, использование этих параметров для контроля перегрева при отпуске нецелесообразно.

Очевидным условием повышения чувствительности при использовании в качестве информативного параметра суммы относительных значений магнитных характеристик является их одновременный рост или убыль с изменением температуры отпуска.

Суммирование дает наилучшие результаты для следующих сочетаний:

$$U_3 = \frac{H_{\mu n}}{H_{\mu n}^{\text{зак}}} + \frac{M_{rc}}{M_{rc}^{\text{зак}}}; U_4 = \frac{H_c}{H_c^{\text{зак}}} + \frac{K_n}{K_n^{\text{зак}}} \quad (2)$$

Зависимость информативных параметров U_3 и U_4 от температуры отпуска представлены на рисунке 3, б. Чувствительность этих параметров во всем диапазоне температур отпуска составляет: 0,25 %/°C для U_3 и 0,17 %/°C для U_4 . Для параметра U_4 характерна к тому же однозначная связь с температурой отпуска, однако его использование затруднено по причине низкой чувствительности в области высокотемпературного отпуска (порядка 0,02 %/°C).

Перемножение магнитных параметров по сравнению с их суммированием позволяет повысить чувствительность информативных параметров в несколько раз. Наиболее результативными комбинациями магнитных параметров при перемножении являются U_5-U_7 , где

$$U_5 = \frac{H_{\mu n}}{H_{\mu n}^{\text{зак}}} \cdot \frac{K_n}{K_n^{\text{зак}}}; U_6 = \frac{M_{Hr}}{M_{Hr}^{\text{зак}}} \cdot \frac{H_r}{H_r^{\text{зак}}}; U_7 = \frac{H_{\mu dm}}{H_{\mu dm}^{\text{зак}}} \cdot \frac{M_{\mu dm}}{M_{\mu dm}^{\text{зак}}} \quad (3)$$

Чувствительность параметров U_5 и U_6 во всем диапазоне температур отпуска составляет 0,13 %/°C для U_5 и 0,17 %/°C для U_6 и U_7 , т.е. эти информативные параметры имеют более высокую чувствительность. Как видно из рисунка 3, в, для параметра U_5 характерна однозначная зависимость от изменения температуры отпуска.

Деление как способ получения информативных параметров позволяет повысить чувствительность магнитных характеристик, одна из которых возрастает с увеличением температуры отпуска, а другая убывает. Такими параметрами были выбраны:

$$U_8 = \frac{M_{Hr} / M_{Hr}^{зак}}{\mu_m / \mu_m^{зак}}; U_9 = \frac{H_{\mu m} / H_{\mu m}^{зак}}{\mu_m / \mu_m^{зак}}; U_{10} = \frac{K_n / K_n^{зак}}{\mu_m / \mu_m^{зак}}; U_{11} = \frac{\mu_H / \mu_H^{зак}}{\mu_m / \mu_m^{зак}} \quad (4)$$

При делении информативные параметры имеют вид, представленный на рисунке 3, г. Средняя чувствительность всех этих параметров к температуре отпуска во всем диапазоне составляет около 0,16%/°С, однако однозначности не наблюдается.

Таким образом, по представленным зависимостям для неразрушающего контроля температуры отпуска инструментальной углеродистой стали У8А во всем диапазоне его изменения можно рекомендовать в качестве информативных параметров сумму параметра K_n и коэрцитивной силы H_c и произведение параметра K_n и напряженности намагничивающего поля $H_{\mu m}$, при котором достигается максимальная магнитная проницаемость.

Выводы

Использование комбинаций различных магнитных параметров стали У8А, взятых относительно закаленного состояния, позволяет повысить точность и обеспечить контроль температуры отпуска во всем диапазоне изменения. Установлено, что использование в качестве информативных параметров для контроля качества отпуска инструментальной углеродистой стали У8А в квазистатическом режиме перемагничивания в замкнутой магнитной цепи суммы параметра $K_n = 1 - M_r / M_m$ и коэрцитивной силы H_c и произведения параметра K_n и напряженности намагничивающего поля $H_{\mu m}$, при котором достигается максимальная магнитная проницаемость, обеспечивает магнитный контроль качества отпуска во всем диапазоне изменения температуры.

Литература

1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение. 1980. – 493 с.
2. Матюк В.Ф., Бурак В.А., Короткевич З.М., Осипов А.А. Влияние температур закалки и отпуска на структуру и магнитные свойства инструментальных углеродистых сталей. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 1, с. 25–49.
3. Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Обще-технические технические условия: ГОСТ 1435-99. – Введ. 01.09.2001. – Минск.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. – 21 с.
4. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий. – Дефектоскопия, 2007, № 3, с. 12–25.
5. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1968. – 568 с.
6. В.М. Морозова, М.Н. Михеев Магнитные и электрические свойства закаленных и отпущенных углеродистых сталей. – тр. Ин-та физики металлов. – М.: Изд. Акад. наук СССР, 1965. – Вып. 24. – С. 26–35.
7. Горкунов Э.С., Костин В.Н., Тартачная М.В., Глазистов А.Г., Шалаев В.Н. Магнитный контроль изделий из сталей 7ХЗ, 9ХФ, 50ХНМ, У10А после низко- и средне-температурного отпуска. – Дефектоскопия, 1990, № 1, с. 70–76.

Статья поступила в редакцию 05.11.13