

УДК 620.179.14

ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗАКАЛКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ У8А

INFORMATIVE PARAMETERS FOR MAGNETIC TESTING GRADE OF HARDENING TOOL CARBON STEEL U8A

Короткевич З.М.

Korotkevich Z.M.

На основе анализа влияния температуры закалки на структуру и магнитные свойства инструментальной углеродистой стали У8А, измеренные в квазистатическом режиме перемангничивания в замкнутой магнитной цепи, предложены новые информативные параметры для магнитного контроля, позволяющие достоверно выявлять как недогрев, так и перегрев при закалке данной стали.

Based on the analysis of the influence of hardening temperature on the structure and magnetic properties of tool carbon steel U8A 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 both subcooling and superheat during hardening of the steel are proposed.

Введение

Инструментальная углеродистая сталь У8А широко используется на машиностроительных предприятиях для изготовления инструментов, работающих в условиях, не вызывающих существенный разогрев режущей кромки, подвергающихся ударам и толчкам и требующих достаточной вязкости при умеренной твердости (метчиков ручных, рашпелей, надфилей, пил для обработки древесины, гладких калибров, топоров, зубил, клейм, кузнечного оборудования, матриц для холодной штамповки) [1].

Особенностью инструментальных углеродистых сталей, к которым относится и эвтектоидная сталь У8А, является высокая чувствительность к перегреву под закалку, проблема неразрушающего контроля которого для данного класса сталей является весьма важной и до настоящего времени в полной мере не решенной [2, 3].

Структурное состояние изделий из инструментальных углеродистых сталей при недогреве под закалку хорошо выявляется по

большинству стандартных магнитных характеристик. Однако перегрев под закалку этих сталей выявить по стандартным магнитным характеристикам практически невозможно [4]. Поэтому поиск новых информативных параметров для контроля температурного режима закалки инструментальных углеродистых сталей и, в частности, стали У8А, 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 проводилась закалка данной стали.

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

Таблица 1. Химический состав стали У8А (ГОСТ 1435–99) [5]

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

Помимо перечисленных в таблице 1 химических элементов сталь У8А может содержать до 0,40 % Cr, до 0,25 % Ni и до 0,25 % Cu.

Сталь У8А прокатывают при температуре выше критической точки A_{cm} (765 °С). Поэтому после охлаждения она принимает структуру пластинчатого перлита различной дисперсности, что приводит к повышенной твердости и плохой обрабатываемости резанием. Для снижения твердости и улучшение обрабатываемости резанием сталь У8А подвергается отжигу и приобретает структуру зернистого перлита (смесь феррита с цементитом). Данная структура позволяет применять накатку, насечку и другие высокопроизводительные технологические процессы изготовления инструмента благодаря их невысокой твердости (не более 187 НВ) в отожженном состоянии и получать при последующей термообработке наиболее однородные свойства. Оптимальная температура отжига должна превышать критическую точку A_{c1} на 10–20 °С (для стали У8А $A_{c1} = 730$ °С) [5, 6].

Для получения твердости 48–51 HRC эвтектоидную сталь У8А следует нагревать под закалку на 30–50 °С выше критической точки A_{c3} и подвергать низкотемпературному отпуску на троостит [7]. Рекомендуемые режимы термообработки стали У8А: температура нагрева

под закалку $T_{\text{зак}} = 780\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (HRC 63–65) и температура отпуска $T_{\text{отп}} = 275\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (HRC 48–51). Закалочная среда – вода, отпуск проводится на воздухе. При закалке в масле $T_{\text{зак}}$ повышают на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5].

Большим недостатком эвтектоидной стали У8А, как и других инструментальных углеродистых сталей, является узкий интервал закалочных температур и необходимость закалки с охлаждением в воде (вследствие низкой прокаливаемости). Однако закалка в воде усиливает деформацию и коробление инструмента и приводит к образованию трещин, а превышение температуры нагрева под закалку на $10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ сверх рекомендуемой по [5] сильно снижает прочность и вязкость, что связано с ростом зерна аустенита [8].

Для защиты от окисления и обезуглероживания целесообразно нагрев под закалку инструмента из стали У8А диаметром до 120 и длиной до 250 мм проводить в соляных ваннах (72 % BaCl_2 + 28 % NaCl). При нагреве более крупного инструмента в камерных печах без защитной атмосферы необходимо применять упаковочные материалы. Для сталей с температурой закалки до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ в качестве упаковочного материала используется древесный уголь + карбюризатор или смесь свежей и пережженной чугушной стружки [8].

Сталь У8А имеет малую прокаливаемость (10–12 мм даже при охлаждении в воде) из-за малой устойчивости переохлажденного аустенита. Поэтому прокаливаться насквозь после закалки в воде могут только изделия малого диаметра или малой толщины. Время выдержки под закалку на 1 мм диаметра (толщины) изделия из стали У8А составляет: 20–35 с при нагреве в ванне и 50–80 с при нагреве в печи [8].

Измерение магнитных свойств образцов стали У8А осуществляли в квазистатическом режиме перемагничивания в замкнутой магнитной цепи (на кольцевых образцах) на установке УИМХ [9]. Поэтому размеры кольцевых образцов для исследований были выбраны в соответствии с рекомендациями [9] и составляли: внешний диаметр 17 мм; внутренний диаметр 13,2 мм, высота 10 мм. С учетом этих же рекомендаций были выбраны и параметры намагничивающей и измерительной обмоток. Частота перемагничивания составляла 0,05 Гц.

Для получения при закалке стали У8А разной структуры металла (недогрев под закалку, рекомендуемая температура нагрева по ГОСТ и перегрев под закалку) нагрев образцов проводился при температурах 710, 740, 770, 790, 820, 850 и 880 $^{\circ}\text{C}$ в среде, защищающей металл от обезуглероживания. Исходя из толщины боковой стенки образцов, время выдержки при нагреве под закалку было выбрано равным 10 минутам. Охлаждение проводилось в воде.

Анализ стандартных магнитных характеристик. По основной кривой намагничивания определялись: 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_{Hr} ; остаточная намагниченность M_{rc} 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 рассчитывалась намагниченность насыщения M_s (по закону подхода к насыщению), релаксационная магнитная проницаемость $\mu_r = M_{Hr}/H_r + 1$ и магнитная проницаемость на кривой возврата от коэрцитивного поля $\mu_{rc} = M_{rc}/H_c + 1$.

Поведение стандартных магнитных характеристик. Зависимости стандартных магнитных характеристик образцов из стали У8А, закаленных от разных температур, представлены на рисунке 1. Штриховыми линиями указан рекомендуемый диапазон температур нагрева под закалку [5].

Изменения магнитных свойств эвтектоидной углеродистой инструментальной стали У8А при закалке от разных температур обусловлены мартенситным превращением.

Нагрев образцов под закалку до температуры 710 °С существенных структурных изменений и фазовых превращений в стали У8А не вызывает [3]. Поэтому большинство ее магнитных характеристик и твердость в данном диапазоне температур нагрева под закалку изменяются незначительно.

Увеличение нагрева под закалку свыше точки A_{c1} обуславливает появление мартенсита – более жесткой в магнитном отношении и в отношении твердости фазы, что вызывает заметное изменение магнитных, электрических свойств и твердости стали У8А.

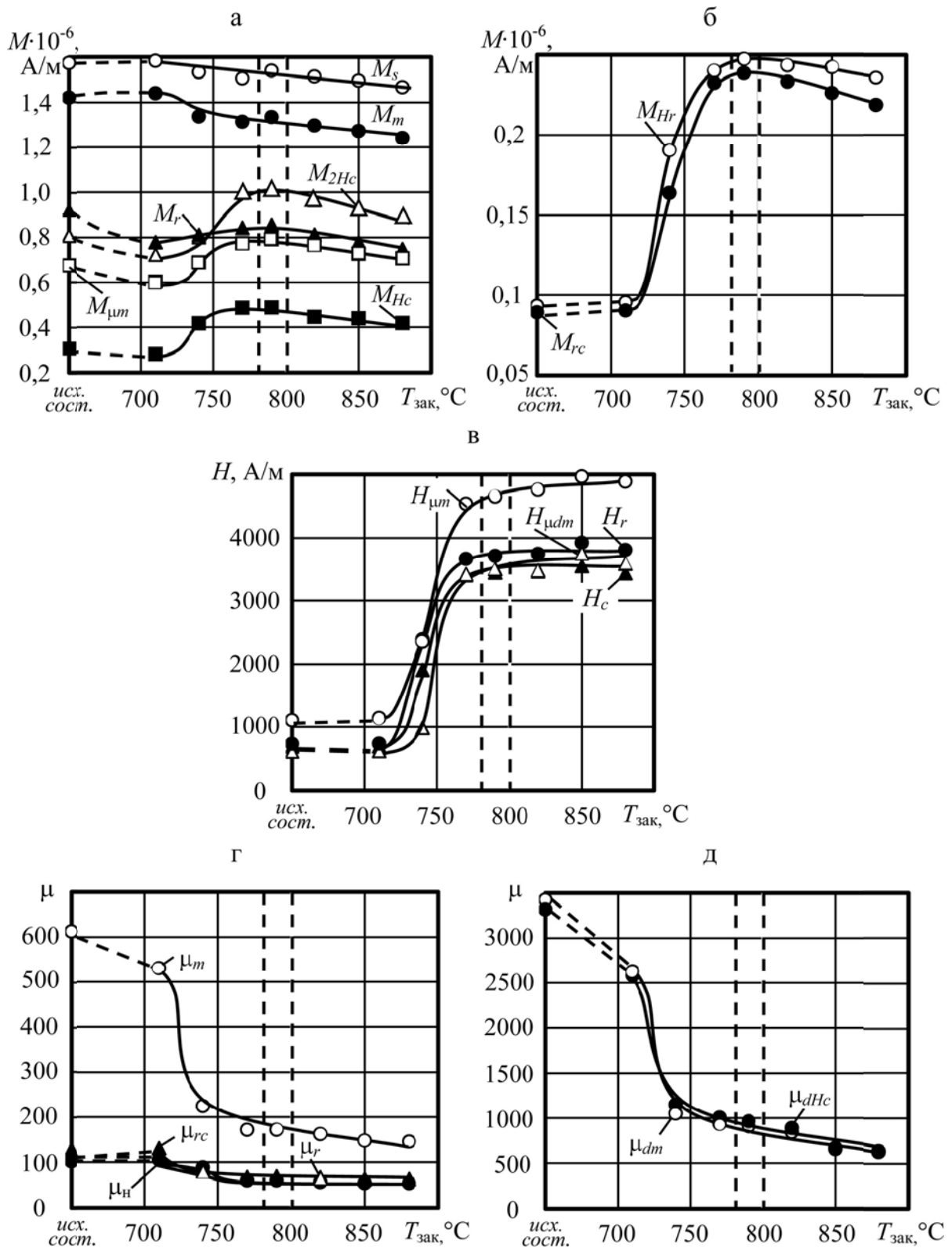


Рис. 1. Зависимость магнитных параметров стали У8А при квазистатическом перемagnetничивании от температуры нагрева под закалку

Так, при закалке испытуемых образцов от температуры 740 °С наблюдается убыль на 4 % намагниченности насыщения M_s и на 7 % максимальной намагниченности M_m , что связано с увеличением в структуре закаленной стали немагнитной фазы (остаточного аустенита). Остаточная намагниченность M_r при этом изменяется очень незначительно.

Рост по отношению к исходному состоянию коэрцитивной силы H_c в 5,2 раза, релаксационной коэрцитивной силы H_r в 5,4 раза, напряженностей $H_{\mu m}$ в 4,5 раза и $H_{\mu dm}$ в 6,2 раза и уменьшение магнитных проницаемостей μ_n , μ_m , μ_r и μ_{rc} на 50–76 %, а μ_{dm} и μ_{dHc} – на 81–82 % обусловлены появлением в стали мартенсита, являющегося более жесткой в магнитном и более твердой в механических отношениях фазой по сравнению с исходной структурой (перлит + цементит).

Увеличение намагниченностей M_{Hc} , $M_{\mu m}$, M_{2Hc} , M_{Hr} и M_{rc} при закалке от 740 °С (по сравнению с исходным состоянием металла) во многом связано со значительным ростом соответствующих им полей (H_c , $H_{\mu m}$, $2H_c$, H_r).

При нагреве под закалку свыше 740 °С намагниченность M_s насыщения и максимальная намагниченность M_m продолжают убывать до 770 °С. Для других видов намагниченности (M_r , M_{rc} , M_{Hc} , M_{2Hc} , $M_{\mu m}$ и M_{Hr}) в области температур 780–800 °С наблюдаются небольшие максимумы. Значения коэрцитивной силы H_c , релаксационной коэрцитивной силы H_r , напряженностей $H_{\mu m}$ и $H_{\mu dm}$ намагничивающего и перемагничивающего поля продолжают расти до температуры 770 °С так, что по сравнению с исходным состоянием их рост составляет от 4,1 до 5,6 раз.

Нагрев образцов под закалку свыше 770 °С резко замедляет скорость изменения всех магнитных характеристик стали У8А, что связано с увеличением количества остаточного аустенита и увеличением областей остаточного аустенита до размеров больших средней толщины доменных границ [10]. Все виды намагниченности (M_s , M_r , M_m , M_{rc} , M_{Hc} , M_{2Hc} , $M_{\mu m}$ и M_{Hr}) и магнитной проницаемости (μ_n , μ_m , μ_r , μ_{rc} , μ_{dm} и μ_{dHc}) плавно уменьшаются. Значение коэрцитивной силы H_c стабилизируется, а изменения находятся в пределах ошибки измерений. Для релаксационной коэрцитивной силы H_r , напряженности $H_{\mu dm}$ и намагниченности $H_{\mu m}$ наблюдается небольшой рост.

Анализ зависимостей перечисленных выше магнитных параметров от температуры закалки стали У8А показывает, что недогрев

под закалку исследуемой стали надежно выявляется по ряду стандартных магнитных характеристик (M_{Hr} , M_{rc} , H_c , H_r , $H_{\mu m}$, $H_{\mu dm}$, μ_m , μ_{dHc} и μ_{dm}). Другие магнитные характеристики слабо чувствительны к недогреву под закалку (M_s , M_m , M_r , M_{Hc} , M_{2Hc} , $M_{\mu m}$, μ_n , μ_r и μ_{rc}).

На перегрев под закалку реагируют M_m , $H_{\mu m}$, $H_{\mu dm}$, μ_{dm} и μ_{dHc} . Однако чувствительность этих характеристик к перегреву под закалку невысока. Другие магнитные характеристики либо нечувствительны к перегреву образцов под закалку (H_c , H_r , μ_m , μ_n , μ_r и μ_{rc}), либо по ним трудно отличить структурное состояние металла, перегретого под закалку, от недогретого (M_r , M_{Hr} , M_r , M_{Hr} , M_{rc}).

Поэтому для повышения чувствительности контроля перегрева под закалку стали У8А необходимы иные информативные параметры.

Информативные параметры для контроля. Повысить надежность выявления перегрева под закалку изделий из стали У8А можно за счет измерения несколько магнитных характеристик. Так в [10] для этой цели рекомендуется использовать два параметра: коэрцитивную силу H_c и намагниченность насыщения M_s или коэрцитивную силу H_c и релаксационную магнитную проницаемость μ_r . Однако при перегреве стали У8А под закалку ее коэрцитивная сила почти не изменяется, а чувствительности намагниченности насыщения и релаксационной проницаемости к превышению температуры нагрева рекомендуемой величины также невысока.

В качестве информативных параметров для контроля перегрева под закалку стали У8А рассматривали сумму, разность, произведение и частное от деления друг на друга стандартных магнитных характеристик этой стали. Арифметические операции проводили над значениями исследуемых стандартных характеристик относительно исходного состояния стали до закалки (рисунок 2). При исследовании новых информативных параметров учитывали необходимость сохранения их чувствительности к недогреву под закалку. Учитывали также рекомендации, данные в [10], согласно которым от магнитных характеристик, определяемых на кривой намагничивания и имеющих аналогии на предельной петле магнитного гистерезиса и кривой возврата, можно отказаться, поскольку точность их определения существенно зависит от качества размагничивания контролируемых изделий. Принимали во внимание также и сложность измерения той или иной магнитной характеристики.

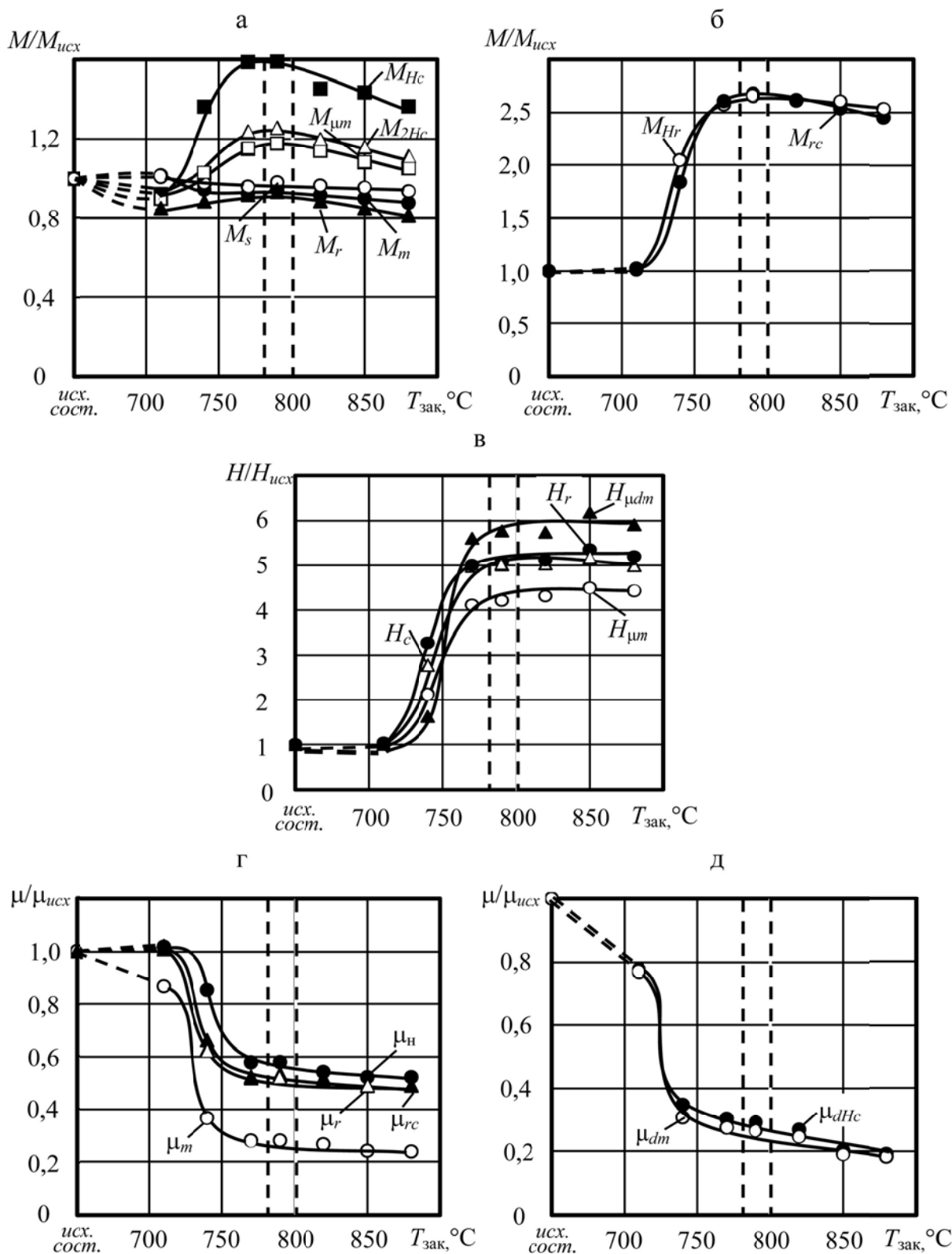


Рис. 2. Зависимость магнитных параметров стали У8А при квазистатическом перемагничивании от температуры нагрева под закалку в относительных единицах

Разность параметров с высокой чувствительностью к недогреву под закалку и имеющих тенденцию к снижению значений с увеличением температуры закалки сверх рекомендуемой позволяет получить информативные параметры, обеспечивает контроль проведенной закалки во всем возможном диапазоне изменения температуры нагрева. Наиболее чувствительными в диапазоне температур 740–880 °С являются параметры U_1 – U_4 :

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= H_{\mu dm} - \mu_{dm}; & U_2 &= H_{\mu dm} - \mu_{dHc}; \\ U_3 &= H_r - M_{Hc}; & U_4 &= H_c - M_{Hc}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Зависимости параметров U_1 – U_4 от температуры нагрева под закалку представлены на рисунке 3, а. Средняя чувствительность в диапазоне температур нагрева 740–880 °С составляет: 3,2 %/°С для U_1 и U_2 ; 1,4 %/°С для U_3 ; 1,6 %/°С для U_4 . Исходя из наибольшей чувствительности и технической возможности измерений магнитных характеристик из данной группы, наиболее предпочтительным для контроля недогрева под закалку являются параметр U_1 и U_2 . Вследствие невысокой чувствительности в диапазоне 790–880 °С, которая составляет 0,2 и 0,3 %/°С соответственно, использование этих параметров для контроля перегрева под закалку нецелесообразно.

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

Суммирование дает наилучшие результаты для сочетаний $H_{\mu dm}$, $H_{\mu m}$, H_r и H_c . Зависимости информативных параметров U_5 – U_9 , где

$$\left. \begin{aligned} U_5 &= H_{\mu dm} + H_r; & U_6 &= H_r + H_c; & U_7 &= H_{\mu dm} + H_{\mu m}; \\ U_8 &= H_r + H_{\mu m}; & U_9 &= H_c + H_{\mu m}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

от температуры нагрева под закалку представлены на рисунке 3, б (штриховыми линиями указан рекомендуемый диапазон температур нагрева под закалку [5]). Чувствительность этих параметров к недогреву под закалку в диапазоне температур нагрева 740–880 °С составляет: 4,4 %/°С для U_5 ; 3,0 %/°С для U_6 и U_8 ; 4,7 %/°С для U_7 ; 3,2 %/°С для U_9 . Однако для установления перегрева эти параметры непригод-

ны, так как их средняя чувствительность в диапазоне 790–880 °С составляет 0,1–0,4 %/°С.

Перемножение стандартных параметров по сравнению с их суммированием позволяет повысить величину значений информативных параметров в несколько раз. Наиболее результативными комбинациями магнитных параметров при перемножении являются U_{10} – U_{15} , где

$$\left. \begin{aligned} U_{10} &= H_{\mu dm} \cdot H_r; & U_{11} &= H_{\mu dm} \cdot H_c; & U_{12} &= H_{\mu dm} \cdot H_{\mu m}; \\ U_{13} &= H_r \cdot H_c; & U_{14} &= H_c \cdot H_{\mu m}; & U_{15} &= H_r \cdot H_{\mu m}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

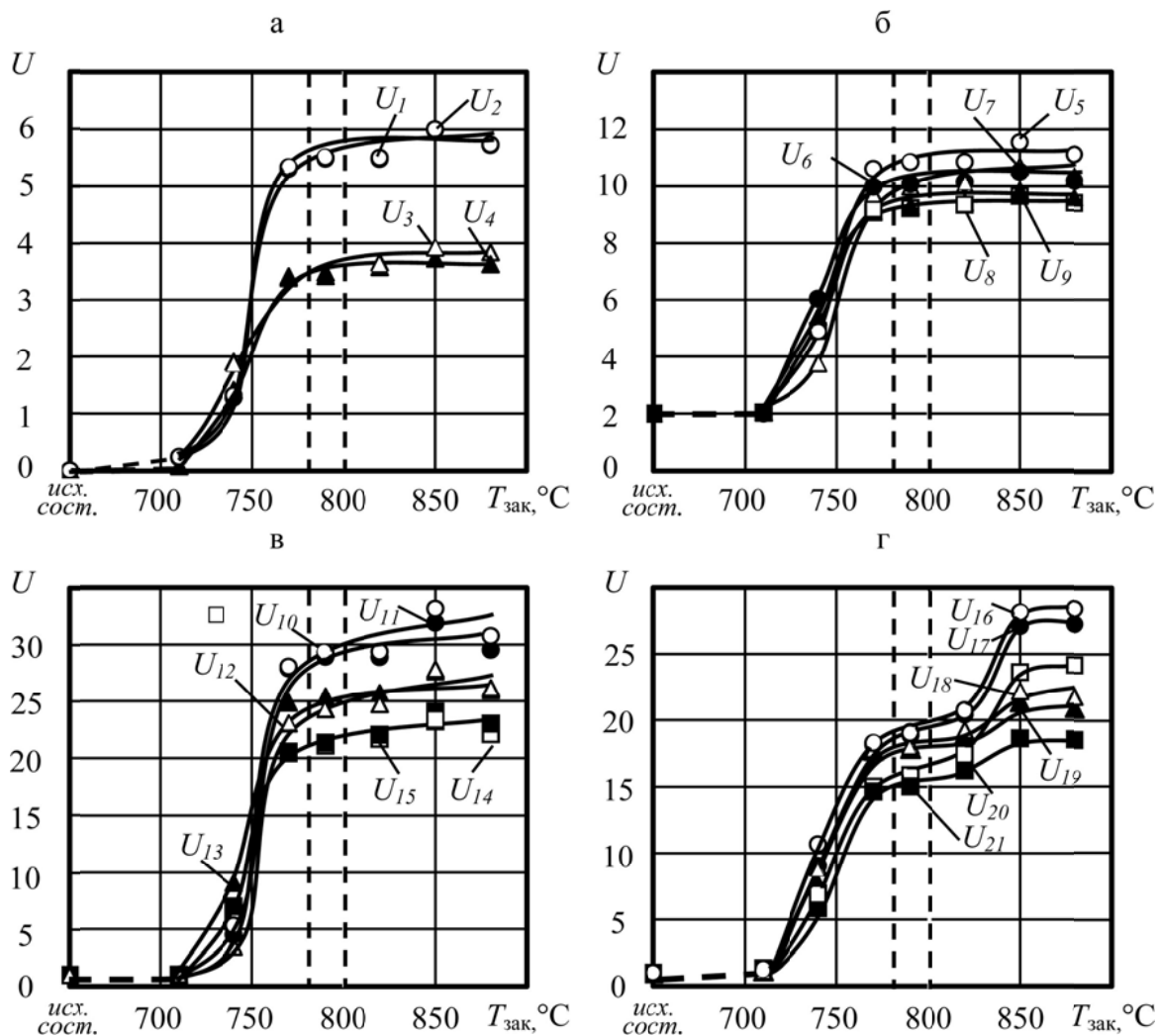


Рис. 3. Зависимость информационных параметров U_1 – U_{21} стали У8А от температуры нагрева под закалку

Чувствительность данных параметров во всем диапазоне температур (710–880 °С) составляет от 12,4 %/°С для U_{14} до 17,5 %/°С для U_{10} . Эти информационные параметры имеют более высокую чувствительность к перегреву под закалку в диапазоне 790–880 °С 1,6 %/°С для U_{10} ; 0,7 %/°С для U_{11} ; 2,1 %/°С для U_{12} ; 0,6 %/°С для U_{13} ; 1,1 %/°С для U_{14} ; 1,8 %/°С для U_{15} . Информационные параметры, полученные путем перемножения магнитных характеристик, представлены на рисунке 3, в.

Наилучшие результаты получаются при использовании в качестве информативного параметра частного от деления относительных величин коэрцитивной силы H_c , релаксационной коэрцитивной силы H_r и напряженности $H_{\mu m}$ на относительные величины магнитных проницаемостей μ_{dm} и μ_m , что связано с увеличением полевых характеристик с ростом температуры нагрева под закалку и уменьшением магнитных проницаемостей.

При делении информативные параметры имеют вид (рисунок 3, г):

$$\left. \begin{aligned} U_{16} &= \frac{H_r}{\mu d_m}; U_{17} = \frac{H_c}{\mu d_m}; U_{18} = \frac{H_r}{\mu_m}; U_{19} = \frac{H_c}{\mu_m}; \\ U_{20} &= \frac{H_{\mu m}}{\mu d_m}; U_{21} = \frac{H_{\mu m}}{\mu_m}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Средняя чувствительность этих параметров к температуре закалики в диапазоне 740–880 °С составляет: 15,9 %/°С для U_{16} ; 15,3 %/°С для U_{17} ; 12,1 %/°С для U_{18} ; 11,6 %/°С для U_{19} ; 13,4 %/°С для U_{20} и 10,2 %/°С для U_{21} . Чувствительность к недогреву (710–790 °С) этих же параметров изменяется от 17,3 %/°С для U_{21} до 22,2 %/°С для U_{16} . Для этих параметров так же характерна и высокая чувствительность к перегреву под закалку (790–880 °С) 10,3 %/°С для U_{16} ; 9,3 %/°С для U_{17} ; 4,1 %/°С для U_{18} ; 3,4 %/°С для U_{19} ; 9,2 %/°С для U_{20} и 3,9 %/°С для U_{21} .

Таким образом, для неразрушающего контроля температуры закалики инструментальной углеродистой стали У8А можно рекомендовать в качестве информативного параметра частное от деления релаксационной коэрцитивной силы на максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости.

Выводы

Наиболее чувствительными информативными параметрами для контроля качества проведенной закалки во всем диапазоне возможных температур нагрева под закалку являются частные от деления коэрцитивной силы H_c и релаксационной коэрцитивной силы H_r на максимальную дифференциальную магнитную проницаемость μ_{dm} .

Литература

1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Металловедение. – М.: Машиностроение. 1980. – 493 с.
2. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
3. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
4. 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.
5. Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общетехнические технические условия: ГОСТ 1435-99. – Введ. 01.09.2001. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. – 21 с.
6. Ильин С.И., Корягин Ю.Д. Технология термической обработки сталей. – Челябинск: Издательский центр ЮурГУ, 2009. – 120 с.
7. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Металловедение. – М.: Машиностроение. 1980. – 493 с.
8. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1968. – 568 с.
9. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий. – Дефектоскопия, 2007, № 3, с. 12–25.
10. 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 среднетемпературного отпуска. – Дефектоскопия, 1990, № 1, с. 70–76.

Статья поступила в редакцию 10.05.12