

УДК 620.179.14

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРИБОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТВЕТСТВЕННЫХ КРЕПЕЖНЫХ КОМПОНЕНТОВ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

METHODOLOGICAL FEATURES AND A DEVICE FOR MAGNETIC CONTROL OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CRITICAL FASTENING COMPONENTS

S. G. SANDOMIRSKI

Аннотация. К крепежным изделиям ответственного назначения, предъявляют требования повышенной прочности, твердости, износостойкости. Их изготавливают из среднеуглеродистых сталей 40X, 30XГСА, легированных хромом, марганцем, кремнием. Баланс между прочностными и пластическими свойствами изделий достигается закалкой и последующим отпуском. Отклонения в химическом составе и режимах термической обработки изделий приводят к недопустимым отклонениям их свойств. Это требует проводить контроль всей продукции. Магнитный структурный анализ основан на том, что механические и магнитные свойства сталей чувствительны к структурным превращениям, происходящим в них при термических обработках. При контроле массовых партий изделий лучшие по производительности и достоверности результаты обеспечивают намагничивание изделий при падении сквозь катушку с постоянным током и измерение остаточного магнитного потока Φ_d в изделии. При этом Φ_d в изделиях пропорционален не остаточной намагниченности M_r , а коэрцитивной силе H_c материала изделий. Но особенностью сталей с содержанием углерода больше 0,3 % является немонокотное изменение H_c с увеличением температуры T_o отпуска закаленных изделий. Для контроля режима отпуска таких изделий предложено намагниченные изделия перед измерением Φ_d дозировать размагничиванием полем H_p . Разработанная методика позволяет выбрать H_p , при котором достигается оптимальная чувствительность к изменениям T_o . Показано, что такой контроль основан на чувствительности Φ_d в изделии после его перемагничивания полем H_p к M_r материала изделия. Созданные технические средства обеспечивают промышленное применение методики для контроля твердости болтов из сталей 40X и 30XГСА.

Ключевые слова: крепежные изделия, среднеуглеродистые стали, термическая обработка, механические свойства, неразрушающий контроль.

Abstract. The fasteners for critical purposes are subject to the requirements of increased strength, hardness, and wear resistance. They are made of medium-carbon steels alloyed with chromium, manganese, silicon: 37Cr4, 42CrMo4. The balance between the strength and plastic properties of products is achieved by quenching and subsequent tempering. Deviations in the chemical composition and modes of heat treatment of products lead to unacceptable deviations of their properties. This requires control of all products. Magnetic structural analysis is based on the fact that the mechanical and magnetic properties of steels are sensitive to structural transformations that occur in them during heat treatments. When controlling mass batches of

products, the best results in terms of performance and reliability ensure magnetization of products falling through a direct current coil and measuring the residual magnetic flux Φ_d in the product. Moreover, Φ_d in the products is not proportional to the residual magnetization M_r , but to the coercive force H_c of the product material. But a feature of steels with a carbon content of more than 0,3 % is a non-monotonic change in H_c with an increase in the temperature T_t of tempering tempered products. To control the tempering regime of such products, it was proposed that magnetized products be measured prior to measuring Φ_d to be demagnetized by a field H_p . The developed technique allows us to choose H_p , at which optimal sensitivity to changes of T_t is achieved. It is shown that such control is based on the sensitivity of Φ_d in the product after its magnetization reversal by the field H_p to M_r of the product material. The created technical means provide industrial application of the technique for controlling the hardness of bolts made of 37Cr4 and 42CrMo4 steels.

Key words: fasteners, medium carbon steels, heat treatment, mechanical properties, non-destructive testing.

К крепежным изделиям ответственного назначения (болты, шпильки, штоки), используемым в автомобильной и авиационной технике, предъявляют требования повышенной прочности, твердости, износостойкости при низких температурах. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют стали 40X и 30XГСА. Баланс между прочностными и пластическими свойствами изделий достигают выбором режима их отпуска после закалки. Возможные отклонения в химическом составе материала изделий и режимах их термической обработки от заданных приводят к недопустимым отклонениям свойств изделий. Это требует проводить контроль всей продукции. Прямые методы определения механических свойств являются разрушающими и не могут быть использованы для контроля качества изделий, предназначенных для эксплуатации. Неразрушающий контроль материалов и изделий физическими методами используют для обеспечения технологической и промышленной безопасности во всех промышленно развитых странах. Наиболее эффективным методом неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных сталей является магнитный.

Цель доклада – представление информации о разработанных методиках и средствах магнитного контроля качества термической обработки и твердости ответственных крепежных изделий автомобильной и авиационной техники, результатах их промышленного использования.

Результаты измерений магнитных параметров сталей 40X и 30XГСА. Механические и магнитные свойства сталей чувствительны к структурным превращениям, происходящим в сталях при термических обработках. Доказано, что коэрцитивная сила H_c , остаточная намагниченность M_r и релаксационная намагниченность M_{Hr} (намагниченность в материале в размагничивающем поле, напряженность которого равна релаксационной коэрцитивной силе H_r) многих сталей связаны с их структурой и физико-механическими свойствами [1].

Магнитный контроль качества термической обработки и механических свойств изделий из среднеуглеродистых сталей имеет свои особенности. Это незначительное или немонотонное изменение H_c с увеличением температуры T_o отпуска закаленных изделий. Зависимости магнитных свойств и твердости HRC по Роквеллу сталей 40X и 30XГСА от температуры закалки и отпуска наиболее полно представлены в [1]. На рис. 1 приведены зависимости H_c и M_{Hr} сталей 40X и 30XГСА от их HRC.

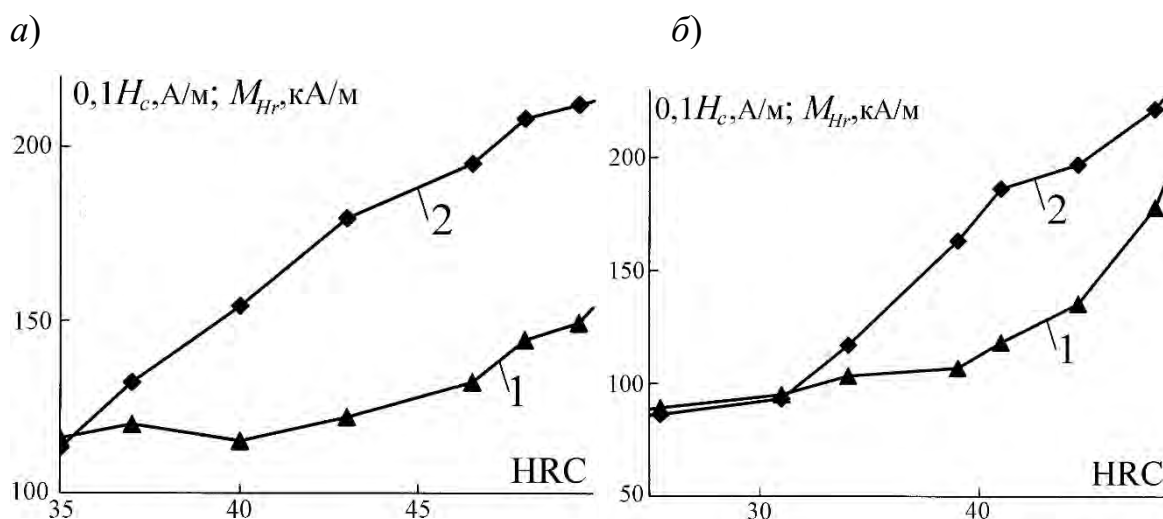


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы H_c (1) и релаксационной намагниченности M_{Hr} (2) сталей 40X (а) и 30XГСА (б) от их твердости HRC по данным [1]

Выбор измеряемого магнитного параметра и методики контроля. Зависимости рис. 1 показывают, что H_c сталей 40X и 30XГСА в практически важном диапазоне изменения ее температуры отпуска ($400^\circ\text{C} \leq T_i \leq 600^\circ\text{C}$) и твердости ($30 \leq HRC \leq 42$) изменяется неоднозначно или не значительно. Релаксационная намагниченность M_{Hr} этих сталей изменяется при этом однозначно и в 3 раза больше, чем H_c . Но при стандартных требованиях к измерительной аппаратуре погрешность измерения M_{Hr} в важном диапазоне изменения свойств сталей достигает десятков процентов и более [2], а измерение M_{Hr} трудоемко и не поддается автоматизации [3].

Индивидуальный характер использования изделий в ответственных узлах обуславливает необходимость автоматизированного контроля каждого изделия. При контроле массовых партий изделий лучшие по достоверности и производительности результаты обеспечивает намагничивание изделий при падении сквозь катушку с постоянным током и измерение остаточного магнитного потока Φ_d в изделии [4]. При этом Φ_d в изделиях пропорционален не M_r , а H_c материала изделий [5].

Для контроля качества отпуска изделий из среднеуглеродистых сталей в движении разработан прибор МАКСИ-2 [4, 6] (рис. 2), в котором изделия после намагничивания магнитным полем нужной напряженности [7] и перед измерением остаточной намагниченности в них подвергают дозированному действию размагничивающего поля напряженностью H_p .

Прибор содержит (см. рис. 2, а): направляющую 1; намагничивающую катушку 2; компенсирующие 3 и размагничивающие 5 системы катушек; источники намагничивающего 4 и размагничивающего 6 тока; измерительные преобразователи 7, 8; измерительные каналы 9, 10; блоки цифровых компараторов 11 и разбраковки 12; контролируемые изделия 14. На пути движения изделий созданы локальные области с намагничивающим H_m и размагничивающим H_d полями заданной напряженности (на рис. 2, б: 1 – поле H_d выключено; 2 – напряженность H_d размагничивающего поля максимальна).

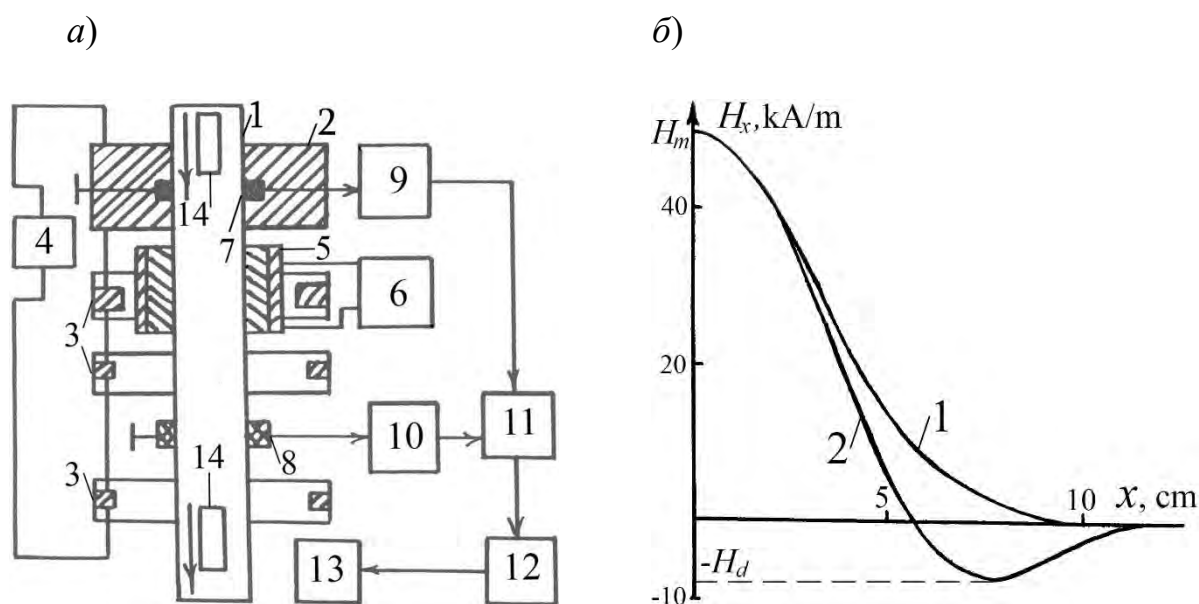


Рис. 2. Функциональная схема (а) прибора МАКСИ-2 и распределение (б) магнитного поля H_x вдоль оси x движения изделий

Конструкции намагничивающих и размагничивающих катушек и структурные схемы измерительных каналов защищены несколькими патентами на изобретения. Использованные технические решения создают условия, при которых размагничивающее поле не влияет на изделие при его движении сквозь индукционные преобразователи. Исключено и влияние скорости движения изделий на результаты контроля. Метрологическая аттестация приборов МАКСИ-2 основана на создании в преобразователе заданного изменения магнитного потока путем перемещения сквозь него соленоида – «меры магнитного потока» [6]. Аттестацией в Белорусском центре стандартизации и метрологии установлено, что погрешность

измерения Φ_d прибором МАКСИ-2 в интервале допустимых воздействий не превышает 1,5 %.

Совершенствование методики контроля. Разработанная методика [8] позволяет выбрать величину H_p , при которой достигается оптимальная чувствительность к изменениям T_o при контроле изделий конкретных размеров. Достоверность контроля физико-механических свойств изделий из среднеуглеродистых сталей, подвергнутых закалке и отпуску, повышается за счет того, что установленная напряженность H_p размагничивающего поля обеспечивает максимально возможную чувствительность остаточной намагниченности M_r и связанных с ней магнитных параметров (например, остаточного магнитного потока Φ_{d1}) в изделиях из среднеуглеродистых сталей к изменению температуры их средне- и высокотемпературного отпуска.

В подтверждение этого на рис. 3 представлена зависимость коэффициента R корреляции в линейных уравнениях регрессии между твердостью HRC изделий «Шпилька № 50-003112» из стали 40X и остаточным магнитным потоком Φ_{d1} в этих изделиях после намагничивания до технического насыщения и размагничивания магнитными полями H_p разной напряженности от отношения остаточного магнитного потока Φ_d в закаленном изделии «Шпилька», намагниченном до технического насыщения, к остаточному магнитному потоку Φ_{d1} в этом изделии, размагниченном после намагничивания до технического насыщения полями той же напряженности H_p .

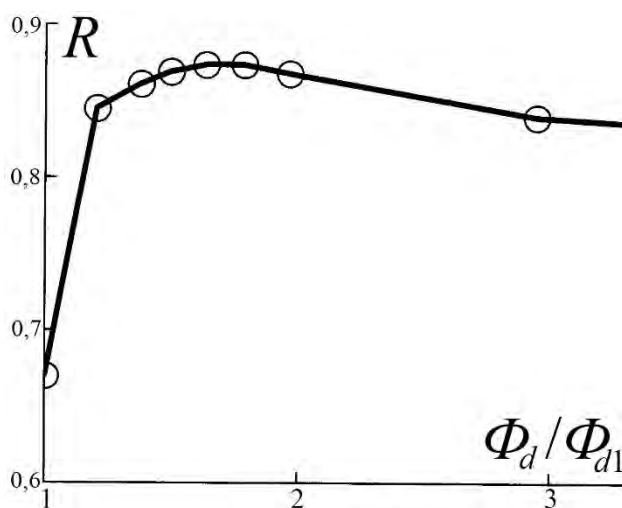


Рис. 3. Зависимость коэффициента R корреляции между твердостью HRC изделий «Шпилька» из стали 40X и остаточным магнитным потоком Φ_{d1} в этих изделиях после размагничивания полями разной напряженности от отношения Φ_d / Φ_{d1}

В [9] показано, что такой контроль основан на чувствительности M_d в изделии после его перемагничивания до определенных значений внешнего поля к остаточной намагниченности M_r материала изделия.

В докладе приведены результаты промышленного использования приборов МАКСИ-2 и разработанной методики для контроля твердости болтов из стали 30ХГСА, предназначенных для использования в самолетостроении, болтов и других изделий из стали 40Х, использованных в дизельных двигателях. Исследования показали, что зависимость твердости НРС болтов от Φ_{d1} в болтах после их частичного размагничивания по оптимальному режиму практически линейна.

Выводы

Для неразрушающего контроля качества термической обработки и твердости крепежных изделий ответственного назначения, используемых в автомобильной и авиационной технике, необходимо измерять остаточный магнитный поток Φ_d , сохраняющийся в изделиях после их намагничивания до технического насыщения и размагничивания полем оптимальной напряженности. Разработанная методика и прибор магнитного контроля механических свойств ответственных изделий массового производства из среднеуглеродистых легированных сталей гарантируют качество каждого изделия, повышают надежность продукции, в которую они установлены.

Использование приборов МАКСИ-2 на машиностроительном и авиационном промышленных предприятиях для контроля твердости болтов из сталей 40Х и 30ХГСА показало, что частичное размагничивание изделий из среднеуглеродистых сталей и последующее измерение Φ_d в них позволяют устранить неоднозначность связи Φ_d с температурой T_0 отпуска таких изделий. Сопоставление с аналогами показало превосходство приборов МАКСИ-2 по функциональным и техническим возможностям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
2. **Сандомирский, С. Г.** Анализ методической погрешности измерения намагниченности сталей в процессе коэрцитивного возврата / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2013. – № 2. – С. 57–60.
3. Выбор параметров и алгоритма магнитной твердометрии углеродистых термообработанных сталей методом регрессионного моделирования / К. В. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 2. – С. 3–11.
4. **Сандомирский, С. Г.** Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (обзор) / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1996. – № 7. – С. 24–46.
5. **Сандомирский, С. Г.** Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел. / С. Г. Сандомирский. – Минск: Беларуская навука, 2015. – 244 с.

6. **Сандомирский, С. Г.** Современные возможности магнитного контроля структуры изделий (обзор) / С. Г. Сандомирский // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 1. – С. 40–46.

7. **Сандомирский, С. Г.** Выбор величины намагничивающего поля при магнитоструктурном анализе ферромагнитных изделий / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1991. – № 7. – С. 42–48.

8. Способ контроля механических свойств движущегося стального изделия, подвергнутого отпуску после закалки: пат. ВУ 20075 / С. Г. Сандомирский. – Оpubл. 2016.

9. **Клюев, В. В.** Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В. В. Клюев, С. Г. Сандомирский. – Москва: СПЕКТР, 2017. – 248 с.

E-mail: sand@iaph.bas-net.by.