

Б.М. ГОРКУНОВ, к-т техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
А.А. ТИЩЕНКО, асп., НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

У роботі запропонований огляд існуючих методів і пристроїв для контролю фізико-механічних характеристик зміцненого шару металевих виробів. Наведено актуальність та проведений аналіз двох основних напрямків контролю фізико-механічних характеристик зміцненого шару металевих виробів, вказана доцільність їх використання. Для кожного методу вказані переваги та недоліки.

In the work the review of existing methods and devices for the testing of the hardened layer of metal products is offered. The actuality is resulted and the analysis of two basic directions in the testing of physicomachanical characteristics of the hardened layer of the metal products, the specified expediency of their use is carried out. For each method merits and demerits are specified.

Постановка проблемы. Актуальной задачей современного машиностроения является обеспечение долговечности деталей машин, которая в существенной мере определяется качеством поверхностного слоя. Важными являются вопросы повышения надёжности приборов, установок, повышение их качества и эффективности работы, а, следовательно, вопросы экономии металлов, борьбы с коррозией и износом деталей машин. Особенно это важно в настоящее время, так как развитие большинства отраслей промышленности (авиационная, ракетная, теплоэнергетика, атомная энергетика, радиоэлектроника и др.) связано с повышением нагрузок, температур, агрессивности сред, в которых работает деталь.

Решение этих задач, прежде всего, связано с упрочнением поверхностных слоёв металлических изделий. Изменять свойства поверхностного слоя можно различными способами: нанесением на поверхность нового материала с необходимыми свойствами; изменением структуры поверхностного слоя металла; термической, химической и механической обработками поверхности и другими способами [1-3].

Поскольку необходимый комплекс эксплуатационных характеристик и ресурс изделий закладывается на стадии их производства, то чрезвычайно важным является контроль качества исходных материалов и определения глубины упрочненного слоя.

Именно контроль механических свойств на стадии изготовления должен являться первоочередным в реализации комплексной программы диагностики объектов в процессе их эксплуатации, так как только в этом случае можно зафиксировать тенденцию изменения тех параметров, от которых зависит остаточный ресурс.

Анализ литературы. В настоящее время известны два основных направления в контроле физико-механических характеристик металлических изделий: разрушающее [4,5] и неразрушающее [6,7].

При определении физико-механических характеристик материала с помощью разрушающего контроля необходимо строго выполнять условия проведения испытаний, которые изложены в стандартах или в других нормативных документах [8]. При отклонении от принятых условий испытаний неизбежны погрешности. Недостатком данного контроля является то, что это длительный процесс, который приводит к разрушению испытуемого образца. Неразрушающий контроль устраняет данные недостатки, поэтому неразрушающий контроль и диагностика являются приоритетными направлениями в задачах обеспечения контроля физико-механических свойств упрочненных слоев металлических изделий [9-12].

Цель статьи. Цель данной работы заключается в расширении сведений о существующих методах и устройствах для определения физико-механических характеристик упрочненных слоев металлических изделий.

Разрушающие методы. Для определения механических свойств металлов в основном применяют три стандартизованных испытания: растяжение, сжатие и кручение образцов. Эти методы дают достоверную информацию о свойствах материалов [13-15].

Метод измерения твердости является одним из видов механических испытаний металла и эффективным средством диагностики его структурно-механического состояния. Можно выделить следующие методы измерения твердости [8, 16-19]:

- Метод Бринелля: твёрдость определяется по диаметру отпечатка, оставляемому металлическим шариком, вдавливаемым в поверхность.

- Метод Роквелла: твёрдость определяется по относительной глубине вдавливания металлического шарика или алмазного конуса в поверхность тестируемого материала.

- Метод Виккерса: твёрдость определяется по площади отпечатка, оставляемого четырёхгранной алмазной пирамидкой.

- Метод Шора: твёрдость определяется по высоте отскакивания стального шарика от поверхности изучаемого металла или по глубине введения закаленной стальной иглы под действием пружины.

- Метод Кузнецова-Герберта-Ребиндера: твёрдость определяется временем затухания колебаний маятника, опорой которого является исследуемый металл.

- Шкала Мооса: твердость определяется по тому, какой из десяти стандартных минералов царапает тестируемый материал, и какой материал из десяти стандартных минералов царапается тестируемым материалом.

- Метод ESATEST (разработка ERNST SA, Швейцария): особенностью данного метода является использования в качестве индентора алмазной

пирамидки с электропроводящим напылением. Проводящая поверхность индентора формирует электрическую цепь между испытываемым объектом и металлической оправкой алмазного индентора. Измеряя электрическое сопротивление между оправкой и испытываемым объектом, можно получить показание о положении алмаза относительно поверхности, следовательно, его глубину проникновения. Данная технология положена в основу прибора HTD 900 (производство ERNST, Швейцария) для автоматического определения твердости и глубины упрочненного слоя, в котором алмазный индентор является одновременно и датчиком глубины [20].

Глубину упрочненного слоя можно определить традиционным металлографическим методом, при котором структуру выявляют с помощью травления, либо среза, шлифования и полирования образца [21, 22].

Не смотря на усовершенствование оборудования, разрушающие методы являются долгим и кропотливым процессом, приводящим к разрушению испытуемого образца. Более того, в некоторых случаях изготовить образцы необходимых размеров или в необходимом количестве либо не представляется возможным, либо нецелесообразно по экономическим или техническим причинам.

Неразрушающие методы. К неразрушающим методам определения физико-механических характеристик упрочненных слоев металлических изделий можно отнести: магнитный, электромагнитный, радиоизотопный, ультразвуковой контроль и другие [23].

Магнитный контроль глубины поверхностно упрочненного слоя известен достаточно давно [24]. Данный вид неразрушающего контроля применяют в основном для контроля изделий из ферромагнитных материалов, т.е. из материалов, которые способны существенно изменять свои магнитные характеристики под воздействием внешнего (намагничивающего) магнитного поля. Операция намагничивания при этом виде контроля является обязательной. Съем информации может быть осуществлен с полного сечения образца либо с его поверхности [25, 26].

В неразрушающем контроле структуры и механических свойств стальных и чугунных изделий наиболее широко используется коэрцитивная сила H_c , поскольку после цементации и термической обработки коэрцитивная сила цементированного слоя почти на порядок превосходит коэрцитивную силу сердцевины [27-29].

Коэрцитиметры широко внедрены для неразрушающего контроля глубины и твердости после закалки цементированных слоев на деталях бурильных долот, для контроля качества цементированных слоев на плужных отвалах, упорного гребня турбин и для ряда других деталей [30, 31].

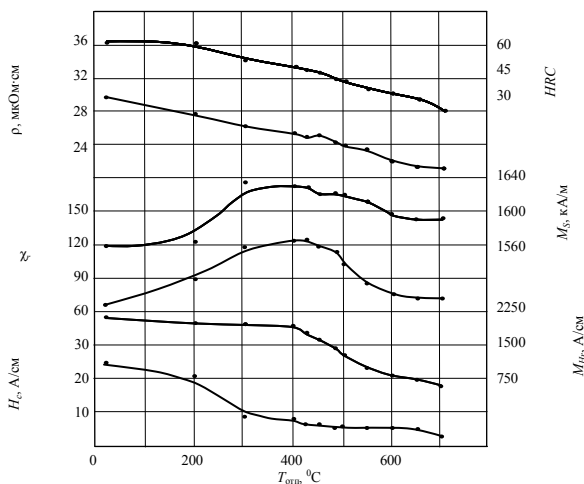


Рис. 1. Зависимости коэрцитивной силы H_c , релаксационных намагниченности M_{Hr} и магнитной восприимчивости χ , намагниченности насыщения M_s , удельного электросопротивления ρ и твердости HRC из стали 45X1 от температуры отпуска $T_{отп}$.

Электромагнитный метод контроля основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля. Это позволяет использовать вихретоковые методы для широкого круга проводящих материалов и решения различных задач контроля, в том числе оценки механических характеристик усредненных по сечению или в поверхностных слоях [32, 33].

Теоретической основой вихретоковой структуроскопии является наличие корреляционных связей между электрическими характеристиками металлов и сплавов и их химическим составом или структурным состоянием. Поэтому на основании измерений удельной электрической проводимости возможно контролировать структуру, однородность химического состава, механические свойства материала и т. п. [34].

Особенность электромагнитного контроля состоит в том, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта. Их взаимодействие происходит обычно на расстояниях, достаточных для свободного движения преобразователя относительно объекта (от долей миллиметра до нескольких миллиметров). Поэтому этим методом можно получать хорошие результаты контроля даже при высоких скоростях движения объектов или под защитным слоем [35-38].

В работе [39] показано, что на значения вихретоковых параметров при пластической деформации определяющее значение оказывает изменение плотности дислокаций в металлическом материале. Плотность дислокаций на начальном этапе деформирования в области малоциклового усталости резко

возрастает, после чего ее рост существенно замедляется [40]. Таким образом, наблюдаемый характер изменения показаний вихретокового прибора соответствует изменению плотности дислокаций при деформировании стали.

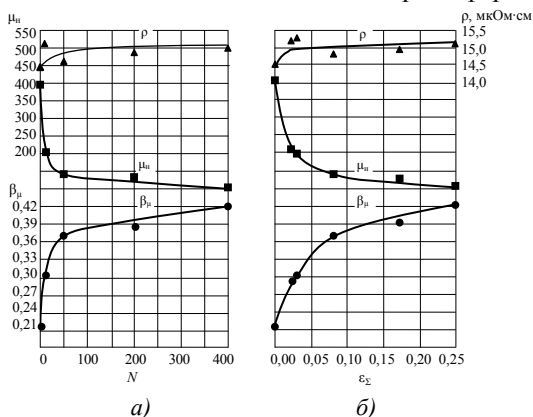


Рис. 2. Зависимость изменения удельного электрического сопротивления ρ начальной магнитной проницаемости μ_n , значений вихретокового параметра β_μ от числа циклов нагружения а) и величины накопленной пластической деформации б) образцов из стали 45.

Получение первичной информации в виде электрических сигналов, бесконтактность и высокая производительность определяют широкие возможности автоматизации электромагнитного контроля.

В [41] описан радиоизотопный способ неразрушающего контроля, физическая сущность которого основана на результатах анализа экспериментальной зависимости между плотностью и радиоизотопными параметрами. Такие условия создаются при облучении поверхностного слоя гамма-квантами радионуклида и регистрации характеристического К-излучения марганца (Mn), содержащегося в трубопроводной стали.

Структурная схема измерительной установки для данного метода приведена на рис. 3.

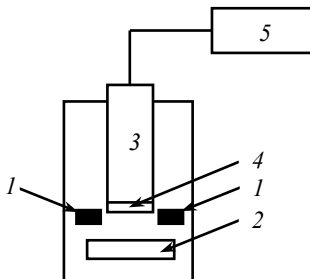


Рис. 3. Структурная схема радиоизотопной установки.

Фотонами радионуклида 1 облучается поверхность исследуемой среды 2. Рентгенофлуоресцентное К-излучение Мп регистрируется сцинтилляционным детектором 3. Для исключения мешающего влияния железа, содержащегося в стали, перед входным окошком счетчика устанавливается селективный хромовый фильтр 4. С детектора сигнал подается в гамма-спектрометр 5, на выходе которого регистрируется скорость счета на К-пике Мп (имп/с). Достоинствами данного метода является портативность и автономное питание аппаратуры, экспрессность контроля.

Ультразвуковой метод контроля заключается в следующем: структура металла, подвергнутого поверхностной электрозакалке, содержит твердый закаленный слой I, переходную зону II, глубже которой расположен сырой (незакаленный) металл III (см. рис. 4, б). Закаленный слой имеет мелкозернистую структуру и наименьшую величину скорости звука. Сырой металл имеет крупнозернистую структуру и более высокую скорость звука. Промежуточная зона характеризуется промежуточными постепенно меняющимися значениями твердости, величины зерна и скорости ультразвука (УЗ). Для определения толщины закаленного слоя продольные или поперечные волны направляют под большим углом к поверхности объекта контроля (см. рис. 4, в). Увеличение скорости УЗ с понижением твердости *HB* и глубины под поверхностью вызывает рефракцию (искривление) лучей и возвращение их на поверхность ввода. Интерференция искривленных лучей приводит к возникновению максимумов, отмечаемых приемным преобразователем (см. рис. 4, а). Положение максимумов позволяет рассчитать глубину закаленного слоя и градиент изменения скорости с глубиной, характеризующих переходную зону [42-44].

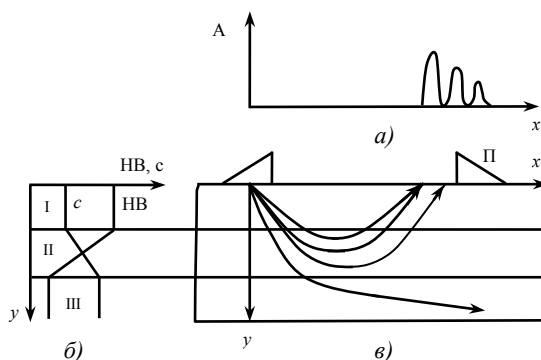


Рис.4. Контроль закаленного слоя по рефракции волн:

a – амплитуда сигнала в зависимости от расстояния x между излучателем и приемником; *б* - изменение твердости *HB* и скорости ультразвука с глубиной; *в* – рефракция расходящегося пучка лучей с разными углами ввода.

Закключение. Таким образом, для определения характеристик поверхностей, микроструктуры и механических свойств упрочненных слоев металлических изделий целесообразно использовать неразрушающий контроль, который к настоящему времени превращается в самостоятельную отрасль промышленности, решающую задачи обследования и создания аппаратуры, методик контроля, проведения научных исследований, сертификации, стандартизации и обучения.

Список литературы: 1. Д.М. Гуреев. Лазерно-ультразвуковое упрочнение поверхности стали // Квантовая электроника. – 1998. – № 3. – С. 282-286. 2. Е.В. Долбиллин, А. В. Кокорин. Новые методы химико-термической обработки в электрическом разряде // Технология машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 40-45. 3. А.М. Нежинский. Совершенствование технологии обработки поверхностей деталей машин методами поверхностно-пластического деформирования // Технология машиностроения. – 2007. – № 10. – С. 14-17. 4. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: Современные зарубежные методики. – М.: Физический факультет МГУ, 2004. – 100 с. 5. Д.А. Коновалов, С.В. Смирнов, А.В. Коновалов. Определение кривых деформационного упрочнения металлов по результатам вдавливания конических инденторов // Дефектоскопия. – 2008. – № 12. – С. 55-63. 6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.2: В 2 кн.: Вихретоковый контроль. Книга 2 / Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.: ил. 7. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с. 8. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – Введ. 01.07.1976 (изм. 23.06.2009). 9. В.И. Боченин. Неразрушающий способ экспресс-анализа фазового состава заготовок рессорного производства после индукционной закалки // Технология машиностроения. – 2007. – № 1. – С. 12-14. 10. Г.В. Бида, Л.Н. Сташков. Комплексное использование магнитных свойств сталей при неразрушающем контроле качества термообработанных деталей // Дефектоскопия. – 2003. – №4. – С. 67-74. 11. ГОСТ 30415 – 96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом. – Введ. 01.01.1998. 12. А.Н. Хайлов, Т.Н. Пенькова, А.С. Бакунов, В.Ф. Мужижкий, Н.Д. Преснов, В.И. Агальцов. Неразрушающий контроль механических характеристик алюминиевых сплавов по удельной электрической проводимости // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 3-14. 13. Соболев Н.Д., Богданович К.П. Механические свойства материалов и основы физики прочности. М., 1985. 14. Фетисов Г.П., Гарифуллин Ф.А. Материаловедение и технология металлов. Изд.: Оникс, 2007. – 624 с. 15. Чередниченко В.С. Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Изд.: Омега-Л, 2007. – 752 с. 16. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – Введ. 01.01.1960 (изм. 23.06.2009). 17. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – Введ. 01.01.1960 (изм. 23.06.2009). 18. ГОСТ 23273-78. Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору). – Введ. 01.02.1985 (изм. 23.06.2009). 19. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/14654>. 20. www.ndt-ua.com. 21. ГОСТ 5640-68 Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты. – Введ. 01.01.1970. 22. <http://src-w.ru/index.html>. 23. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005 г. 24. Кузнецов И.А., Скрипова Н.М. Неразрушающий контроль глубины и твердости цементированного слоя деталей из сталей 12ХН3А и 12ХН4А // Дефектоскопия. – 1983. – № 6. – С. 16-21. 25. А.А. Лухвич, О.В. Булатов. Магнитный контроль распределения по глубине физико-механических свойств // Дефектоскопия. – 2005. – № 11. – С. 30-38. 26. Г.В. Бида, А.П. Ничитурук. Многопараметровые методы в магнитной структуроскопии и неразрушающем контроле механических свойств сталей // Дефектоскопия. – 2007. – № 8. – С. 3-24. 27. Бида Г.В., Горкунов Э.С., Шевнин В.М. Магнитный контроль механических свойств проката. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 252 с. 28. Бида Г.В. Магнитные свойства термоупрочненных сталей и неразрушающий контроль их качества. – М.:

Маршрут, 2006. – 350 с. **29.** Г.В. Бидя, А.П. Ничипурук. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле // Дефектоскопия. – 2000. – № 10. – С. 3-28. **30.** Г.В. Бидя. Магнитный контроль глубины и твердости поверхностно упрочненных слоев на изделиях (обзор) // Дефектоскопия. – 2006. – № 5. – С. 10-28. **31.** Г.В. Бидя. Магнитный контроль качества закаленных и отпущенных деталей из углеродистых и низколегированных сталей (обзор) // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 15-27. **32.** Бакунов А.С., Мужичкий В.Ф., Попов Б.Е. Контроль механических свойств алюминиевых сплавов электромагнитным методом // Дефектоскопия. – 1995. – № 2. – С. 61-67. **33.** А.В. Макаров, Э.С. Горкунов, Л.Х. Коган, Ю.М. Колобылин, Л.Г. Коришонов, А.Л. Осинцева. Особенности электромагнитных методов контроля износостойкости среднеуглеродистой конструкционной стали, подвергнутой лазерной или объемной закалке и отпуску // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 28-39. **34.** В.С. Чернов. Контроль термообработки литейных алюминиевых сплавов по электропроводности на Заволжском моторном заводе // В мире НК. – 2009. – № 1. С. 32-34. **35.** А.Н. Хайлов, Т.Н. Пенькова, А.С. Бакунов, В.Ф. Мужичкий, Н.Д. Преснов, В.И. Агальцов. Неразрушающий контроль механических характеристик конструкционной стали по удельной электрической проводимости // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 3-14. **36.** Л.Х. Коган, А.П. Ничипурук, Л.Д. Гаврилова. Влияние содержания углерода на магнитные, электрические свойства термообработанных углеродистых сталей и возможности контроля качества отпуска изделий из них вихретоковым методом // Дефектоскопия. – 2006. – № 9. – С. 72-90. **37.** А.С. Бакунов, В.Ф. Мужичкий, С.Е. Шубочкин. Структуроскоп вихретоковый ВЭ-26НП // Дефектоскопия. – 2003. – № 11. – С. 67-72. **38.** Э.С. Горкунов, Р.А. Саврай, А.В. Макаров, Л.Х. Коган, С.А. Роговая. Применение вихретокового метода для оценки накопленной пластической деформации и остаточных механических свойств после циклического нагружения отожженной среднеуглеродистой стали // Дефектоскопия. – 2007. – № 4. – С. 24-30. **39.** Сандаловский В.А., Уваров А.И., Терещенко Н.А. Влияние пластической деформации и отжига армо-железа на сигнал накладного вихретокового преобразователя // Дефектоскопия. – 1999. – № 3. – С. 61-67. **40.** Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. – М.: Интермет Инжиниринг. – 2002. – 288 с. **41.** В.И. Боченин, В.П. Кузнецов. Радиоизотопный способ контроля глубины поверхностного наклепа нефтегазовых трубопроводов // Дефектоскопия. – 2004. – № 12. С. 26-48. **42.** Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.: ил. **43.** Ермолов И.К., Алешин Н.П., Потапов А.И. Акустические методы контроля – М.: Высш. школа, 1991. **44.** В.Г. Бадалян. Оценка результатов контроля по акустическим изображениям // Дефектоскопия. – 2007. – № 4. – С. 39-58.