

УДК 620.19

**А.П. Фалалеев, профессор, д-р техн. наук,**

**А.Г. Авакян, аспирант**

*Севастопольский национальный технический университет,*

*ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053*

*E-mail: a\_falaleev@mail.ru*

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ КУЗОВОВ АВТОМОБИЛЕЙ**

*Предложена система мониторинга состояния автомобильных кузовов, позволяющая диагностировать повреждения стальных конструкций, вызванные некачественным производством, длительной эксплуатацией и ремонтными воздействиями. Экспериментально исследован эффект Фарадея и его применение в области обнаружения изменения микроструктуры металлов. Показано, что магнитооптическая установка способна выявлять поверхностные дефекты сталей, используемых в кузовостроении. Установлена зависимость между твердостью металлов и выходным сигналом спроектированной установки.*

**Ключевые слова:** магнит, эффект Фарадея, неразрушающий контроль, кузовной ремонт, дефектоскопия.

Введение. Для производства элементов кузовов автомобилей в настоящее время широкое распространение получила двухфазная сталь. Микроструктуру данной стали можно сравнить с композитным материалом, в котором мягкая матрица (феррит) упрочнена включениями мартенсита. За счет высокого содержания феррита двухфазная сталь обладает высокой пластичностью, позволяющий производить детали сложной формы методом штамповки. В то же время мартенситная фаза повышает прочность детали, и, как следствие, уровень пассивной безопасности автомобиля.

В процессе эксплуатации транспортного средства двухфазная сталь изменяет свои механические свойства. Это вызывается увеличением количества мартенсита деформации в результате либо циклического нагружения детали, либо же ее пластической деформации и последующем ремонте (вытяжке) без нагрева. Одним из способов обнаружения подобного изменения микроструктуры стали является измерение ее твердости с помощью твердомера [1]. Однако данный способ, для обеспечения высокой точности измерений, требует демонтажа детали и изучения ее в лабораторных условиях. Даже при использовании мобильных твердомеров в процессе исследования нарушается лакокрасочное покрытие деталей.

Предлагаемая система мониторинга использует способность железно-иттриевых гранатовых (ЖИГ) пленок визуализировать магнитные поля используя эффект Фарадея. Данная технология неоднократно использовалась для контроля плоских поверхностей механизмов, начиная с ее создания в 1986г. С тех пор ведется активная разработка и совершенствование магнитооптического (МО) метода контроля, включая использование постоянных магнитов для повышения мобильности установки [2], узкоспециализированных установок с ЖИГ пленками для диагностики цилиндрических поверхностей небольшого диаметра (например, трубопровода) [3]. Автоматизированная система мониторинга состояния стали позволит контролировать текущее состояние кузовов, оценивать качество выполнения ремонтов, проводить расчет остаточного ресурса кузовных деталей [4], проводить контроль качества сварных соединений [5], обнаруживать подповерхностные дефекты алюминиевых деталей [6].

**Цель исследования.** Спроектировать МО установку, способную обнаруживать поверхностные дефекты и изменение микроструктуры материалов, используемых для производства узлов шасси легковых автомобилей.

**Описание экспериментальной установки.** Упрощенная схема оборудования, использовавшегося в данной работе, изображена на рисунке 1.

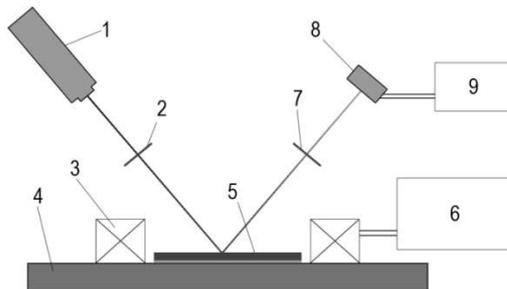


Рисунок 1 – Схема магнито-оптического устройства неразрушающего контроля

Основними елементами обладнання являються: 1 – джерело світла (лазер); 2 – поляризатор; 3 – котушка індуктивності; 4 – досліджувана деталь; 5 – ЖИГ плівка; 6 – генератор сигналу; 7 – аналізатор; 8 – фотодіод; 9 – реєстратор.

Принцип роботи установки в загальному випадку заключається в наступному: над досліджуваним матеріалом поміщаються котушка і МО плівка з нанесеною на неї відбиваючою підкладкою. При створенні магнітного поля над дефектами досліджуваного зразка, наприклад в усталостних тріщинах в його об'ємі, або ж в області зміни мікроструктури утворюються магнітні заряди, які створюють поле розсіяння, перпендикулярне поверхні зразка. Поля розсіяння індують в ЖИГ плівці структуру намагніченості, перпендикулярну її поверхні, яка в подальшому візуалізується.

Коли лінійно поляризований світло проходить через МО плівку і відбивається від її підкладки, він піддається впливу ефекту Фарадея, повертаючись на кут  $\theta_F$ , пропорційний силі магнітного поля. Використовуючи аналізатор, орієнтований під кутом  $\pi/2$  до площини поляризації падаючого на МО плівку світла, можливо оцінювати кут його повороту за інтенсивності світлового потоку. Локальні зміни мікроструктури матеріалу проявляються і фіксуються камерою (як правило, з ПЗС-матрицею) в вигляді сусідніх темних і світлих областей.

В даній роботі традиційна схема була удосконалена для відповідності поставленій задачі. Джерело світла, замість якого, як правило, використовуються світлодіоди, замінено лазерним діодом з довжиною хвилі 635 нм. Неблизький діаметр лазерного променя ( $< 1$  мм) дозволяє проводити точкові вимірювання і виявляти локальні зміни структури деталі. Також камера з ПЗС-матрицею була замінена фотоелементом – як для спрощення конструкції, так і для підвищення її точності. Неодноразово було доведено, що найбільшим джерелом шуму в МО-візуалізаторах є саме камера [7].

**Методика дослідження.** Для оцінки робочості установки використовувалися зразки двохфазної сталі DP590 специфікації компанії Mazda.

Зразок №1 був локально нагріт вольфрамовим електродом до температури плавлення в точці контакту. Висока швидкість нагріву, властива контактній зварці, створила умови неізотермічного нагріву, властивого зварочним роботам при ремонті кузова.

Зразок №2 був деформований пластично поперечним вигином, а потім випрямлений. Степень накопленої деформації становила близько 37%.

Зразок №3 – контрольний зразок в стані поставки був використаний для калібрування установки і перевірки коректності її роботи протягом усього дослідження.

Для створення магнітного поля над поверхнею досліджуваного матеріалу на котушку подавався сигнал прямокутної форми. Амплітуда струму  $I_K$  становила 3,19 А, частота  $f_K$  за результатами процесу калібрування була встановлена на рівні 5 кГц. Оскільки в даній роботі виявлення поверхневих і підповерхневих тріщин матеріалу не так пріоритетно, як визначення змін мікроструктури сталі, котушка індуктивності була розміщена таким чином, щоб силові лінії магнітного поля проходили перпендикулярно поверхні зразків (рис. 2).

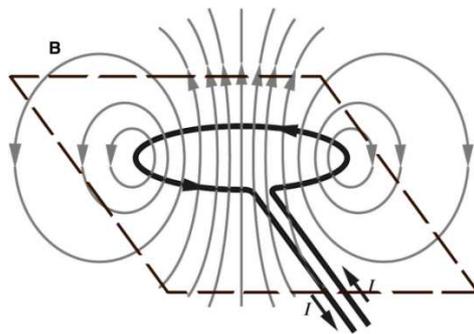


Рисунок 2 – Візуалізація силових ліній магнітного поля; досліджуваний зразок позначений штриховою лінією

На кожному зразку з допомогою МО установки було досліджено 20 точок з кроком 2,75 мм, розташованих вздовж продольної осі; точкою відліку було обрано лівий край. По вихідному сигналу фотоелемента  $U_p$  робилися висновки про інтенсивність магнітного поля над поверхнею деталі.

Як спосіб оцінки показань МО пристрою було використано вимірювання твердості зразків з допомогою твердомера ТК-2 алмазним конусним індентором навантаженою 1500кН і витримкою 5 с.

**Оценка результатов экспериментальных исследований.** Результаты измерения твердости деталей были переведены в твердость по Виккерсу и представлены на рисунке 3.

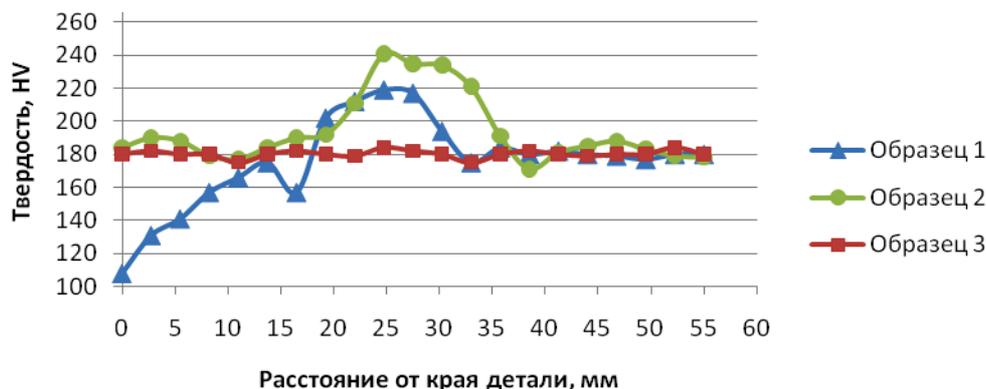


Рисунок 3 – Твердость исследуемых образцов стали

На рисунке отчетливо заметна зона термической деградации материала, простирающаяся приблизительно на 16 мм от края образца №1. Существование данной зоны обусловлено распадом мартенситной фазы стали, вызванным нагревом материала выше 400 °С. На протяжении этого участка уровень твердости стали показал значительное падение (до 72 HV) по сравнению с контрольным образцом.

При деформации листа стали (образец №2), в области изгиба происходит ее поверхностное упрочнение и снижение пластичности, а также ударной вязкости. На графике это выражается в виде превышения базового уровня твердости детали на 60 единиц.

Для удобства сравнения результатов исследования деталей с помощью МО метода (рисунок 4), выходное напряжение фотодиода  $U_p$  было нормализовано – среднее значение сигнала, полученного при исследовании контрольного образца, было принято за единицу.

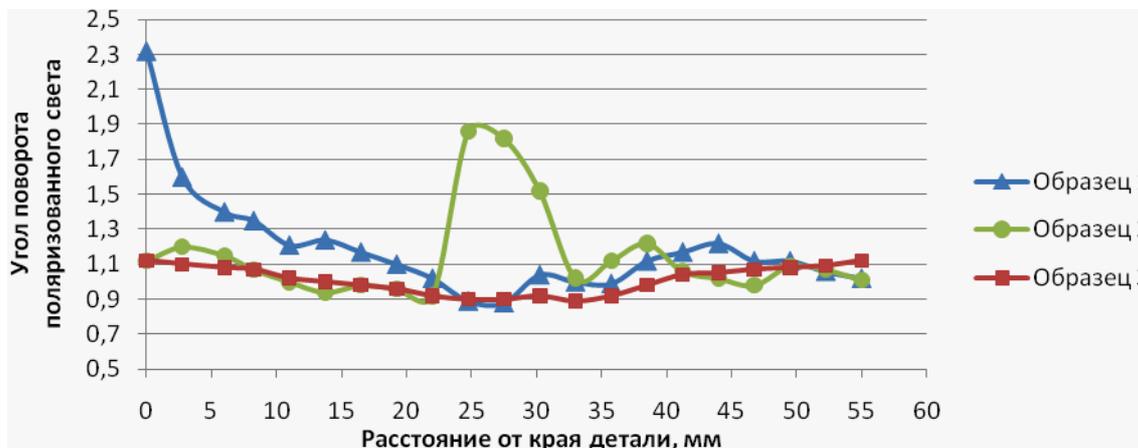


Рисунок 4 – Результат измерения поворота угла поляризованного света

Самое значительное относительное отклонение сигнала фотодиода от базового наблюдалось при исследовании образца №1. В зоне, подвергшейся нагреву электродом, был обнаружено повышение значения выходного сигнала  $U_p$  по сравнению с базовым. Данное явление объясняется различными магнитными характеристиками фаз стали. Проницаемость мартенсита ниже, чем у феррита, следовательно, уменьшение объемной доли мартенсита выражается в повышении магнитной проницаемости детали. Полученные результаты не противоречат данным, приведенным в [8]. Зона отжига заканчивается на отметке 20 мм, после чего, согласно показаниям МО установки, структура стали возвращается в свое исходное состояние.

Для аппроксимации данной (рисунок 5) и последующей (рисунок 6) зависимостей величины твердости стали от показаний МО оборудования были использованы полиномиальные функции второй степени.

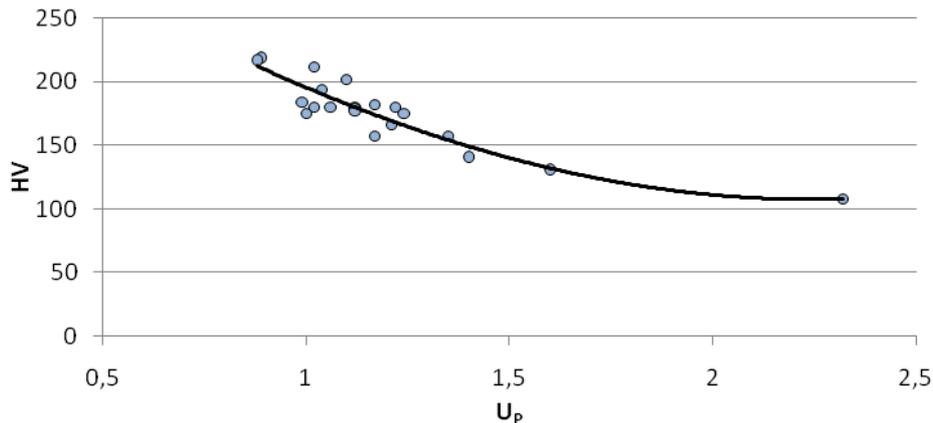


Рисунок 5 – Зависимость между твердостью образца № 1 и выходным сигналом МО установки

Данная зависимость описывается выражением

$$HV = 53,315U_p^2 - 243,56U_p - 385,79. \quad (1)$$

Достоверность аппроксимации этой зависимости составляет  $R^2=0,85$ . Столь высокая точность аппроксимации свидетельствует о том, что МО принцип может быть использован в целях мониторинга изменений микроструктуры двухфазных кузовных сталей в условиях автоматизированного мониторинга состояния.

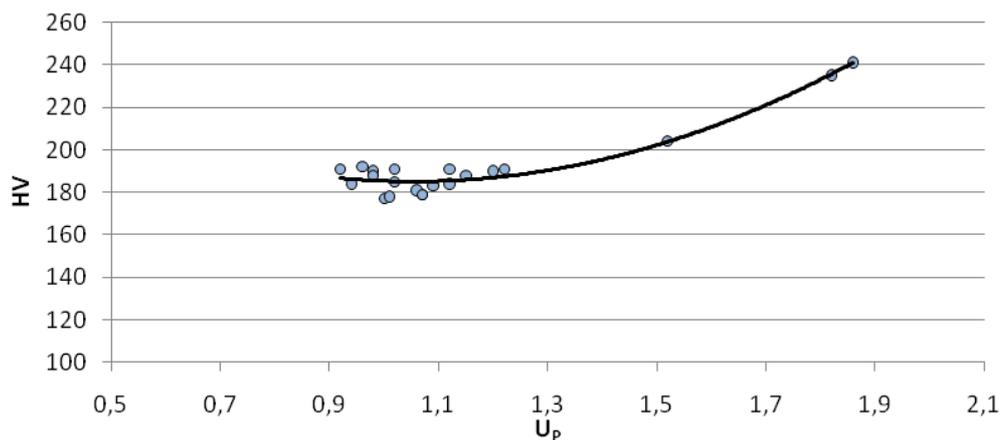


Рисунок 6 – Зависимость между твердостью образца № 2 и выходным напряжением МО установки

Уравнение аппроксимирующей функции можно представить в виде

$$HV = 86,16U_p^2 - 181,49U_p + 280,67. \quad (2)$$

Достоверность аппроксимации данной зависимости также находится на высоком уровне и составляет  $R^2=0,93$ .

### Выводы

1. В процессе эксплуатации автомобилей, изготовленных из многофазных закаленных сталей, могут происходить изменения фазового состояния материала, вызванные некачественной сборкой, деформациями, дорожно-транспортными происшествиями и последующими ремонтными воздействиями. В настоящее время не существует системы контроля текущего состояния, что может привести к значительному снижению эксплуатационных свойств автомобилей в целом.

2. Магнитооптическая система, основанная на принципе вращения Фарадея, может быть использована для устройств автоматизированного и ручного неразрушающего контроля текущего состояния стальных конструкций из двухфазных сталей, в частности, кузовов современных легковых автомобилей.

3. Проведенный регрессионный анализ результатов испытания установки позволил установить зависимость между твердостью образцов по Виккерсу и выходным напряжением МО устройства. Данная зависимость свидетельствует о том, что МО оборудование может быть использовано для определения

изменений фазового состава исследуемых сталей, вызванных нагревом и накопленной пластической деформацией.

4. Использование в спроектированной системе контроля железо-иттриевых гранатовых пленок в качестве чувствительного элемента позволяет автоматизировать процесс контроля. Сканирование всей поверхности автомобиля с помощью предлагаемой установки позволит получить информацию о текущем состоянии кузова, спрогнозировать остаточный ресурс и определить места накопления дефектов.

Задачей дальнейших исследований планируется оценка чувствительности МО установки, а именно, возможность обнаружения изменений микроструктуры стали с нанесенным на нее лакокрасочным покрытием, дифференциация дефектов по типу и способу возникновения, проектирование системы контроля и прогнозирования ресурса кузовов.

#### **Бібліографічний список використаної літератури**

1. Kamada O. Magnetic field optical sensors using Ce:YIG single crystals as a Faraday element / O. Kamada, T. Nakaya // Sensors and Actuators A. — 2005. — С. 345–348.
2. Elshafiey I. Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition / I. Elshafiey, L. Udpa // Sensitivity Analysis of Magneto-Optic Imaging In Nondestructive Evaluation of Pipelines. — Bahrain, 2005. — С. 27–34.
3. Blachnio J. The effect of changing loads affecting the martensite steel on its structure and the Barkhausen noise level / J. Blachnio // NDT&E International. — 2008. — С. 273–279.
4. Diagnosis of austenitic steel valves with the magneto-optical method / P. Novotny, P. Machac, M. Kucera, K. Nitsch. — NDT&E International, 2007. — С. 203–207.
5. Fitzpatrick G. Detection of Corrosion Under Paint Using Magneto-Optic Imaging / G. Fitzpatrick // Physical Research, Kirkland. — 1998. — 118 с.
6. Ramuhalli P. Enhancement of magneto-optic images / P. Ramuhalli, F. Yuan, U. Park // Michigan State University, Michigan, USA. — 2005. — С. 402–406.
7. Бозорт Ф. Ферромагнетизм / Ф. Бозорт — М.: Издательство иностранной литературы, 1956. — 784 с.
8. Огородников В.А. Энергия. Деформация. Разрушение. (Задачи автотехнической экспертизы) / В.А. Огородников, В.Б. Киселев, И.О. Сивак. — Винница: Изд-во «Универсум», 2005. — 204 с.

*Поступила в редакцию 20.01.2014 г.*

#### **Фалалесев А.П., Авакян А.Г. Автоматизована система контролю поточного стану кузовів автомобілів**

Запропоновано систему моніторингу стану автомобільних кузовів, яка дозволяє діагностувати пошкодження сталевих конструкцій, викликані неякісним виробництвом, тривалою експлуатацією та ремонтними впливами. Експериментально досліджено ефект Фарадея та його застосування в галузі виявлення зміни микроструктури металів. Показано, що магнітооптична установка здатна виявляти поверхневі дефекти сталей, що використовуються в кузовобудуванні. Встановлена залежність між твердістю металів і вихідним сигналом спроектованої установки.

**Ключові слова:** магніт, ефект Фарадея, неруйнівний контроль, кузовний ремонт, дефектоскопія.

#### **Falaleev A.P., Avakian A.G. Automatical system for monitoring condition of a vehicle body**

A system for monitoring the state of automobile bodies was developed, allowing diagnosing damage of steel structures caused by poor-quality production, continuous operation and repair actions. Experimentally investigated the Faraday effect and its use in detecting changes in the microstructure of metals. It was shown that the magneto-optical unit is capable to detect surface defects of steel used in the bodywork. The dependence between the hardness of metal and the output of designed setup was established.

**Keywords:** magnet, Faraday effect, nondestructive testing, body repair and fault detection.