

УДК 620.19

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

А.Г. Авакян, аспирант,

А.А. Ярошенко, профессор, д-р физ.-мат. наук

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 99053

a_falaleev@mail.ru

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

Разработана установка текущего контроля фазовой трансформации двухфазных сталей, подвергающихся циклическим нагрузкам на изгиб. Экспериментальным путем исследовано явление вращения плоскости поляризованного света в присутствии магнитного поля с помощью тонкой пленки железоиттриевого граната. Показано, что использующая данную пленку магнитооптическая установка способна выявлять дефекты сталей, используемых в кузовостроении. Установлена зависимость между количеством циклов деформации материала и выходным сигналом спроектированной установки.

***Ключевые слова:** вращение Фарадея, железоиттриевый гранат, неразрушающий контроль, фазовая трансформация.*

Введение. В процессе эксплуатации транспортного средства вследствие усталостного разрушения или пластической деформации несущих элементов кузова, выполненных из двухфазной стали, снижается прочность, а также характеристики пассивной безопасности конструкции. Предсказать поведение кузова автомобиля в случае дорожно-транспортного происшествия при таком виде износа невозможно. Среди известных методов оценки усталостного износа кузова можно выделить только измерение продольной, поперечной и угловой жесткостей конструкции [1], который требует наличия сложных и объемных измерительных приспособлений, которые не получили распространения в связи с экономической нецелесообразностью.

Для кузовов из сложных многофазных сталей оценка текущего состояния материала является одной из актуальных проблем в связи с существенным влиянием фазового состава металла на текущие свойства конструкции. Процесс усталостного разрушения двухфазных сталей сопровождается появлением в структуре мартенсита изменений, которые вызваны превращениями парамагнитной γ -фазы в ферромагнитную α -фазу [2]. Сопутствующие этому процессу изменения магнитных свойств могут быть обнаружены путем измерения сопротивления вихревых токов, магнитной проницаемости и остаточного поля. Однако в силу наличия в материале большой доли мартенсита превращения, а также учета сведений об условиях нагрузки, таких как амплитуда деформации, способ нагружения и прочее, применение традиционных средств неразрушающего контроля на практике ограничивается высокими показателями отношения сигнал-шум [3].

Механизм возникновения усталостных трещин обуславливается разностью коэффициентов термического расширения ферритной и аустенитной фаз. За счет этого остаточные напряжения, как правило, возникают между фазами (межфазные микронапряжения) и между зернами различной ориентации (межзерновые микронапряжения) вследствие изменений температур или деформаций. Количественно, микронапряжения в двухфазных сталях зависят от объемных долей фаз, их морфологии, цикличности деформации и термической обработки [4]. Поскольку наличие остаточных микронапряжений оказывает значительное влияние на усталостную прочность металла [5], существует необходимость в разработке методов диагностики с повышенной чувствительностью к изменению магнитных полей исследуемой детали.

В данной работе рассматривается магнитооптический (МО) способ неразрушающего контроля конструкционных изделий из стали. Данный метод основан на фарадеевском вращении – способности определенных материалов осуществлять поворот плоскости линейно поляризованного света в магнитном поле. Механизм обнаружения локальных дефектов материала в данном случае заключается в обнаружении и фиксации аномалий в распределении магнитного поля рассеяния исследуемой детали. Обнаружение осуществляется при помощи чувствительного элемента разрабатываемой установки, выполненного на основе использования МО пленки.

Целью исследования являлась экспериментальная проверка чувствительности магнитооптического способа неразрушающего контроля при использовании его для задач обнаружения и оценки уровня превращения аустенитной фазы в ферромагнитном материале.

Методика экспериментальных исследований. Принципиальная схема используемого в данной работе оборудования приведена на рисунке 1.

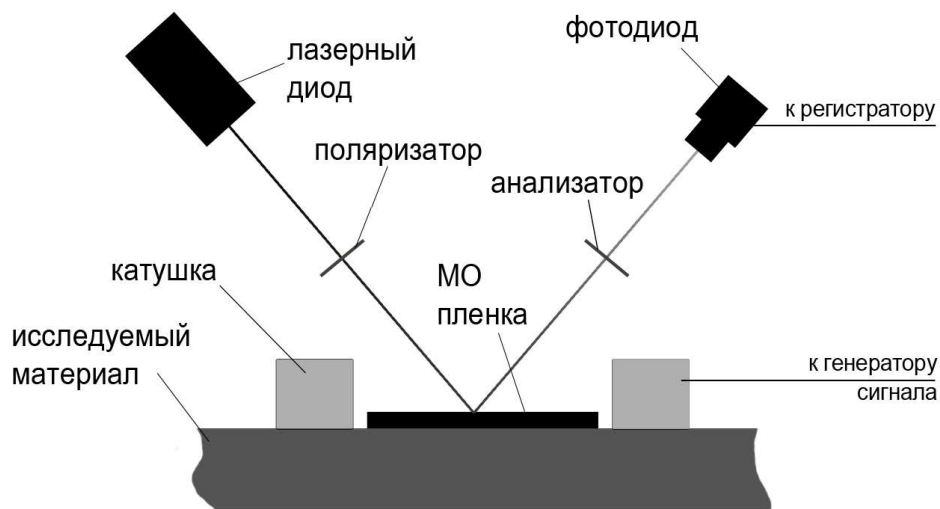


Рисунок 1 – Схема магнито-оптического устройства неразрушающего контроля

В процессе исследования над исследуемым материалом помещаются электромагнитная катушка и МО пленка с нанесенной на нее отражающей подложкой. Когда линейно поляризованный свет из лазерного диода проходит через МО пленку и отражается от ее подложки, он подвергается воздействию эффекта Фарадея, поворачиваясь на угол θ_F , пропорциональный силе магнитного поля. Используя анализатор, ориентированный под углом $\pi/2$ к плоскости поляризации падающего на МО пленку света, возможно оценивать угол его поворота по интенсивности светового потока. Над трещиной, или иным участком с неоднородной структурой, магнитное поле рассеяния над деталью увеличивается, что, в свою очередь, вызывает увеличение угла поворота плоскости поляризованного света. Изменение угла поворота в дальнейшем фиксируется фотоэлементом.

Для исследования возможностей установки выявлять трансформацию фаз стали и микротрещины, сопровождающие усталостное разрушение, были использованы образцы двухфазной стали DP 800 размерами 50x70x2.5 мм. Образцы затем были подвергнуты испытанию на усталость при изгибе (таблица 1).

Таблица 1 – Условия испытаний образцов

Номер образца	Количество циклов нагружения
1	5000
2	9000
3	13000
4	17000

Образец № 5 использовался в качестве контрольного для проверки и калибровки МО установки.

Для создания магнитного поля над поверхностью исследуемого материала, катушка индуктивности круглого сечения была ориентирована перпендикулярно поверхности. Частота подаваемого тока f_k была задана в пределах 5...50 кГц, амплитуда I_k была установлена на уровне 3,19 А.

Измерения с помощью средства неразрушающего контроля проводились в направлении, перпендикулярном продольной оси изгиба образцов. Запись результатов в процессе эксперимента выполнялась на участке протяженностью 36 мм, с шагом 3 мм. По выходному сигналу фотоэлемента U_p делались заключения об интенсивности магнитного поля над поверхностью детали.

Оценка результатов экспериментальных исследований. Для удобства сравнения результатов исследования деталей с помощью МО метода (рисунок 2), выходное напряжение фотодиода U_p было нормализовано относительно максимального значения сигнала, полученного при исследовании образцов, которое было принято за единицу.

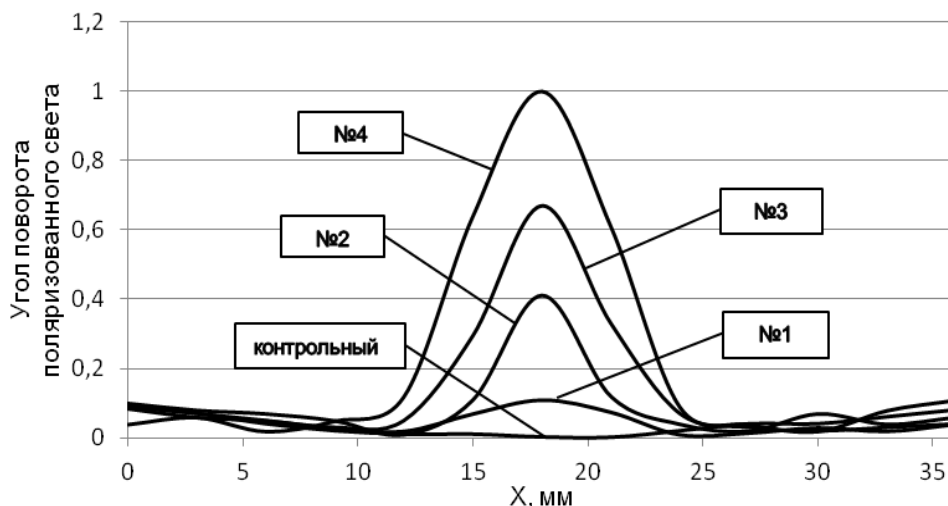


Рисунок 2 – Результат измерения поворота угла поляризованного света

Самое значительное относительное отклонение показаний фотозлемента от базовых значений было зафиксировано при исследовании образца №4, прошедшего 17000 циклов. Это объясняется наличием в зоне изгиба наибольшего количества среди всех испытанных образцов мартенсита превращения – ферромагнитной α -фазы. Локальное увеличение ферромагнетика в двухфазной стали вызывает усиление магнитного поля над поверхностью детали, что выражается в усилении сигнала, выводимого спроектированной МО установкой.

Для проведения аппроксимации зависимостей уровня усталостного разрушения образцов от показаний МО оборудования (рисунок 3) была использована линейная функция.

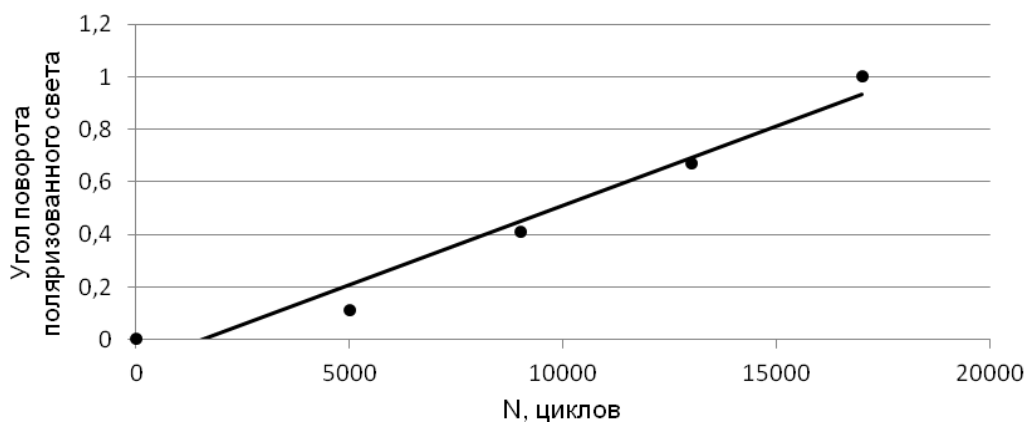


Рисунок 3 – Зависимость между твердостью образца №1 и выходным сигналом МО установки

Данная зависимость описывается выражением

$$L = 1,1047 U_p - 0,0697. \quad (1)$$

Достоверность аппроксимации этой зависимости составляет $R^2 = 0,97$. Столь высокая точность свидетельствует о том, что в данном диапазоне циклических нагрузок, накопление усталостных трещин носит линейный характер, что позволяет использовать зависимость (1) для прогнозирования остаточного ресурса кузова, а также для определения интенсивности эксплуатации транспорта на протяжении жизни транспортного средства. Установка может быть использована в целях обнаружения изменения микроструктуры и развития трещин в ферромагнитных материалах, таких как двухфазная сталь. В случае создания установки для промышленного применения необходимо разработать методику измерения состояния кузова в целом и систему, позволяющую автоматизировать процесс мониторинга состояния транспортного средства.

Выводы

1. Разработанная магнитооптическая система, основанная на принципе вращения Фарадея, может быть использована для обнаружения и оценки количества трансформировавшейся фазы мартенсита в двухфазных сталях.

2. Проведенный регрессионный анализ результатов испытания позволил установить зависимость между количеством искусственно созданного мартенсита превращения и выходным напряжением МО устройства. Данная зависимость может быть использована для прогнозирования остаточного ресурса конструкций из двухфазных сталей, а также определения интенсивности эксплуатации конструкции.

3. 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 является определение анизотропии магнитных свойств материала в зоне пластической деформации, которое реализуется путем сканирования поверхности исследуемого образца в различных направлениях.

Библиографический список использованной литературы

1. Фалалеев А.П. Автоматизированная система контроля текущего состояния кузова автомобиля / А.П. Фалалеев, А.Г. Авакян // Вестник СевНТУ. Сер. Автоматизация. – Севастополь, 2014. – Вып. 149. – С. 65-71.
2. 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.
3. Niffenegger M. Sensitivity of the magnetization curves of different austenitic stainless tube and pipe steels to mechanical fatigue / M. Niffenegger, H.J. Leber // Journal of Nuclear Materials. — 2008. — С. 325–330.
4. Lindgren M. On the stress vs. Barkhausen noise relation in a duplex stainless steel / M. Lindgren, T. Lepisto // NDT&E International 37. — 2004. — С. 403–410.
5. Silva I. Structural and magnetic characterization of a carburized cast austenitic steel / I. Silva, J.M.A. Rebello // Scripta Materialia 59. — 2008. — С. 1010–1013.

Поступила в редакцию 12.01.2014 г.

Фалалеев А.П., Авакян А.Г., Ярошенко О.О. Метод неруйнуючої магнітооптичної дефектоскопії для оцінки втомної міцності

Розроблено установку поточного контролю фазової трансформації двофазних сталей, що піддаються циклічним навантаженням на вигин. Експериментальним шляхом досліджено явище обертання площини поляризованого світла в присутності магнітного поля за допомогою тонкої плівки залізоіттриєвого граната. Показано, що магнітооптична установка, яка використовує дану плівку, здатна виявляти дефекти сталей, якими користуються в кузовобудуванні. Встановлено залежність між кількістю циклів деформації матеріалу і вихідним сигналом спроектованої установки.

Ключові слова: обертання Фарадея, залізоіттриєвий гранат, неруйнівний контроль, фазова трансформація.

Falaleev A.P., Avakian A.G., Yaroshenko A.A. The method of the magneto-optical non-destructive testing to evaluate fatigue strength

A system was developed for monitoring the phase transformation of dual phase steels exposed to cyclic bending loads. Experimentally investigated the effect of rotation of the plane of polarized light in presence of a magnetic field by means of a thin film of yttrium iron garnet. It is shown that by using this film, magneto optical system is capable of detecting defects of steel used in the bodywork. The dependence between the number of cycles of deformation of the material and the output of designed setup was established.

Keywords: Faraday rotation, yttrium iron garnet, nondestructive testing, phase transformation.