

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Ю. С. АГАЛИДИ, С. В. ЛЕВЫЙ, В. А. ТРОИЦКИЙ, Ю. Н. ПОСЫПАЙКО

Кратко описаны физические основы нового для сварочного производства метода магнитооптического неразрушающего контроля, предназначенного для испытания поверхностных слоев ферромагнитных изделий. Представлены результаты экспериментальных исследований чувствительности метода к поверхностным трещинам и остаточным напряжениям.

The paper gives a brief description of physical fundamentals of the magneto-optic NDT method new for welding production, which is designed for testing surface layers of ferromagnetic items. Results of experimental investigations of the method sensitivity to surface cracks and residual stresses are given.

Метод неразрушающего контроля, основанный на магнитооптической визуализации магнитограмм (МОВ МГ), возник в результате развития средств регистрации рельефа магнитного поля на поверхности изделий в зонах повышенных напряжений и приповерхностных дефектов [1–3]. Создание этого метода позволило существенно расширить возможности оценки качества приповерхностных слоев ферромагнитных изделий, поднять чувствительность, разрешающую способность и достоверность. Технические средства МОВ МГ отличаются высокой производительностью, малыми энергопотреблением и расходом материалов, не критичностью к плоскостности, шероховатости и ориентации исследуемой поверхности, не критичностью к наличию лакокрасочного покрытия и коррозии, возможностями программной обработки и документирования результатов, автономностью и мобильностью.

Технология МОВ МГ включает ряд последовательно выполняемых процессов (рис. 1): возбуждение магнитных полей рассеяния дефектов контролируемого изделия и их запись на магнитный носитель, визуализация магнитограмм с использованием преобразователей на основе магнитооптического эффекта Фарадея [4], оценка результатов контроля с использованием алгоритмов принятия решений на основе экспертных оценок, опыта применения магнитных методов.

Наиболее распространенной категорией поверхностных дефектов, которые пристально исследуются ввиду их опасности,

являются трещины. Именно этот тип дефекта является тестовым при оценке чувствительности многих методов неразрушающего контроля [5].

Результаты эксперимента, представленные на рис. 2, позволяют сделать определенные предварительные оценки пороговой чувствительности средств МОВ МГ. На рис. 2, а представлено фотографическое изображение фрагмента поверхности тест-образца (сталь 45, $R_a \approx 2,5$ мкм) с усталостными трещинами в области концентрирующего отверстия, образованными вследствие циклических изгибных нагрузок. Ширина раскрытия и длина каждой трещины измерена с использованием металлографического микроскопа МЕТАМ Р-1, объект-микрометра отраженного света ОМО (ГОСТ 7513–55) и окуляр-микрометра винтового МОВ-1-15^х (ГОСТ 7865–56). Для трещин, показанных на рис. 2, а, получены следующие харак-

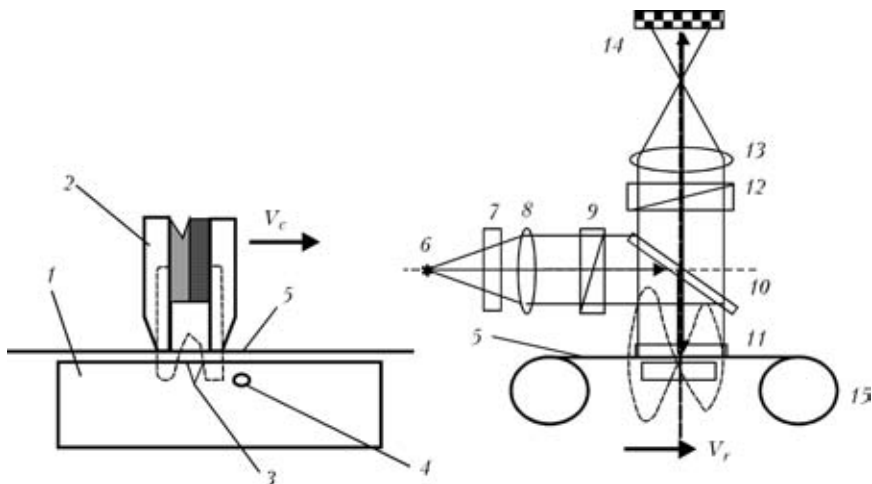


Рис. 1. Схема технологического процесса МОВ МГ: 1 — объект контроля; 2 — генератор локального полюсного намагничивания; 3, 4 — поверхностный и подповерхностный дефекты; 5 — магнитная лента; 6 — источник света; 7 — теплофильтр; 8 — конденсор; 9, 12 — поляризаторы; 10 — светоделительная пластина; 11 — магнитооптический преобразователь; 13 — объектив; 14 — фотоприемник; 15 — привод магнитной ленты

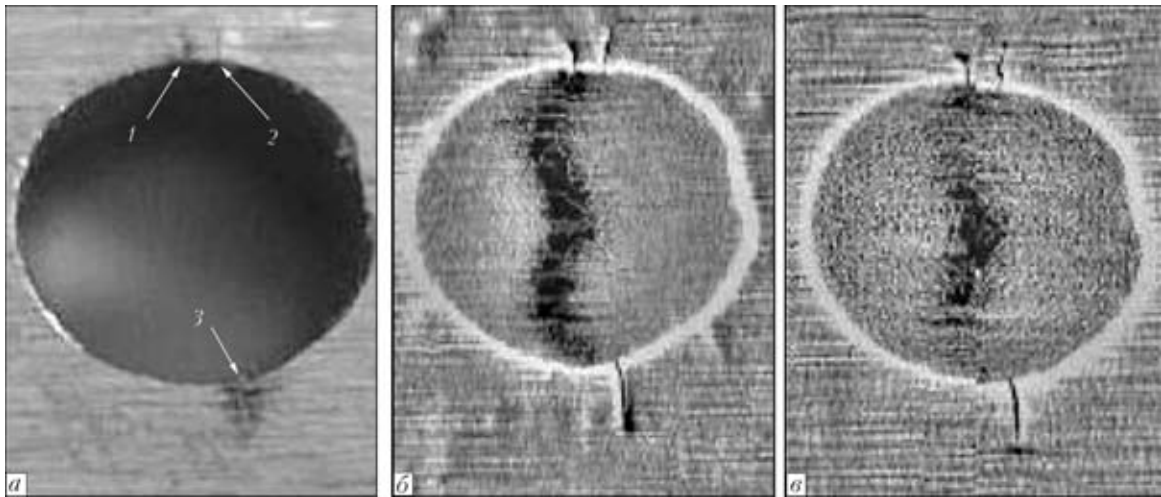


Рис. 2. Визуализация усталостных трещин тест-образца: а — фотографическое изображение; б — МОВ МГ с высокочастотным подмагничиванием; в — МОВ МГ с постоянным подмагничиванием

теристики: 1 — ширина 10...15 мкм, длина 200 мкм; 2 — ширина 10 мкм, длина 300 мкм; 3 — ширина 10...25 мкм, длина 500 мкм. Глубину трещин не определяли.

Результаты МОВ МГ, полученные при высокочастотном (рис. 2, б) и постоянном подмагничивании (рис. 2, в), показывают магнитную визуализацию трещин поз. 1–3 более наглядно, чем оптическое изображение на фотоснимке. При детальном рассмотрении результатов магнитной визуализации заметно, что отображается не только геометрическая конфигурация трещин, но и области концентрации внутренних напряжений в точке роста трещины, где нет еще разрыва металла, т. е. потенциально наиболее опасные напряженные участки образца (рис. 2, б).

В приведенном эксперименте трещины имели раскрытие около 10 мкм, что соответствует ранее полученным результатам [6] и не уступает условному уровню чувствительности «Б» для магнитопорошкового контроля [7]. На других экспериментальных образцах [8] были зафиксированы трещины с меньшим раскрытием. Теоретически раскрытие обнаруженных трещин может быть на уровне шумов магнитного носителя, т. е. порядка 0,8 мкм. Потенциально уровень чувствительности данного метода к трещинам может достигать долей микрона.

С целью получения сравнительной оценки чувствительности выполнена визуализация поверхностных трещин контрольного образца визуальным, оптическим, капиллярным, магнитопорошковым и магнитооптическим методами (рис. 3).

Фотографические изображения поверхности и магнитооптические изображения (рис. 3, в) получены с использованием сканера модели SNAPS-KAN 1236 с разрешением 600 dpi. Увеличенное фотографическое изображение поверхности позволяет найти наиболее значительные дефекты (рис. 3, а) — мелкие поверхностные трещины, ка-

верны, пятна пигментации (рис. 3, а–в, поз. 1) и элементы язвенной коррозии.

Визуализация капиллярным методом (рис. 3, б) с применением комплекта дефектоскопических материалов MR-Chemie показала более высокую чувствительность, однако с недостаточным пространственным разрешением следы близко расположенных трещин сливаются. Достоверность этого вида контроля считается достаточно высокой, поскольку изображение трещин контрастно наблюдается на фоне подложки (высокое соотношение сигнал/шум).

Магнитопорошковая дефектоскопия (рис. 3, в) выполнена в условиях полюсного намагничивания контрольного образца. При этом в среднем сечении индукция $B_s \approx 1,5 \dots 1,8$ Тл. В качестве индикаторной жидкости использована магнитопорошковая суспензия на основе концентрата «РОСАВА-1200» (ТУ 13700348.23–97). Данный метод показывает чувствительность, сопоставимую с капиллярным методом, но более высокое пространственное разрешение при более низком соотношении сигнал/шум.

Вид магнитограмм МОВ при использовании локального полюсного возбуждения с высокочастотным подмагничиванием показан на рис. 3, г. В этом случае достигнута наиболее высокая чувствительность, наиболее высокое пространственное разрешение и наивысшее соотношение сигнал/шум, что в совокупности обеспечивает более высокую достоверность контроля. В частности, метод МОВ МГ обнаруживает наиболее мелкие трещины (рис. 3, г, поз. 2) в отсутствие шумов (рис. 3, а–в, поз. 1).

Для численной сравнительной оценки чувствительности магнитооптического и магнитопорошкового методов к выявлению остаточных напряжений в поверхностных слоях выполнены исследования с использованием тест-образцов, содер-

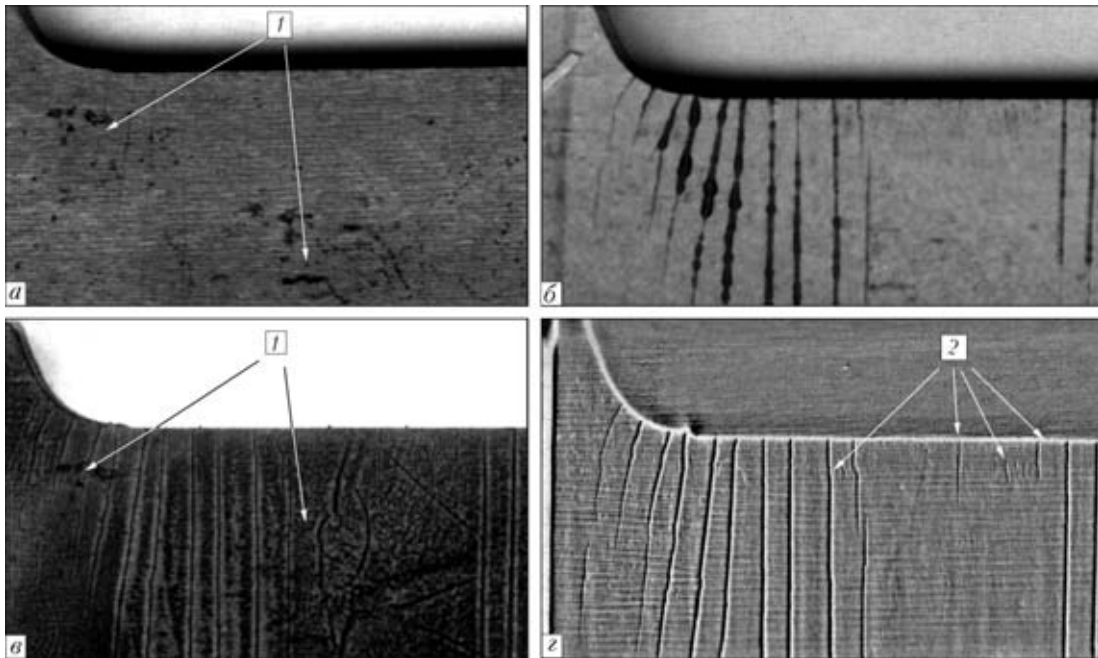


Рис. 3. Поверхностные трещины, выявленные различными методами: а — визуально-оптическим; б — капиллярным; в — магнитопорошковым; г — МОВ МГ (1 — цветовая пигментация поверхности (шумы объекта); 2 — мелкие трещины, визуализируемые только методом МОВ МГ)

жащих остаточные напряжения убывающей амплитуды.

Заготовки тест-образцов представляют собой пластины листового металла (сталь 65Г по ГОСТ 1050–80, толщина 3 мм) размерами 20×200 мм. После отпуска и рихтовки заготовки были прошлифованы с обеих сторон до толщины 2,5 мм. Затем методом холодной штамповки была нанесена рельефная маркировка точечного типа. Тест-образец имеет 75 делений, выполненных с продольным шагом 2 мм (рис. 4, а). Десятичные деления выполнены в виде удлинненных вертикальных рисок. Углубления (точки) имеют форму конуса с диаметром основания 1 мм и глубиной $h_0 = 0,5$ мм.

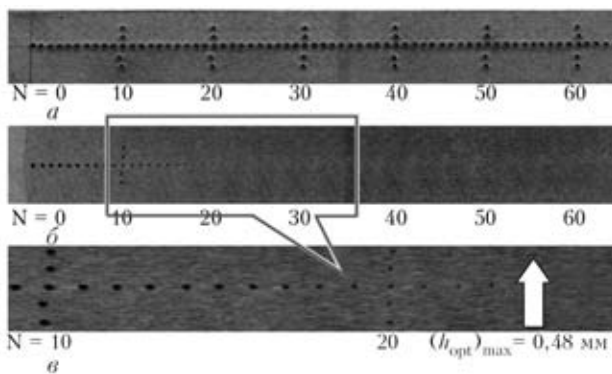


Рис. 4. Тест-образец, содержащий точечные рельефные вдавливания и остаточные напряжения материала в области удаленных рельефных впадин: а — поверхность заготовки; б — исследуемая поверхность после шлифовки по наклонной плоскости; в — визуально-оптическое изображение фрагмента образцов в зоне расположения 20 вмятин

После выполнения рельефных вдавливаний тест-образец был клиновидно отшлифован с лицевой стороны. Так получено пространственное распределение остаточных напряжений с затухающей амплитудой. Клиновидность исследуемой поверхности относительно основания составила 1:100.

На рис. 4, б видно как убывают диаметры маркировочных точек по мере увеличения толщины снятого металла. Углубления в металле сняты, а напряжения остались.

Для описания глубины залегания исследуемых остаточных напряжений металла тест-образца применены следующие обозначения: $h_0 = 0,5$ мм — глубина нанесения рельефных вмятин; h^* — текущая толщина удаленного слоя металла; h — текущая толщина удаленного слоя металла под рельефной вмятиной, т. е. $h^* = h - h_0$. С учетом клиновидности исследуемой поверхности и применяемого шага градуировки расчет глубины залегания под рельефом h выполнялся по соотношению $h = Nk_l - h_0 = N \cdot 0,02 - 0,5$ [мм].

Внешний вид исследуемой поверхности тест-образца после шлифовки на конус приведен на рис. 4, б, в. Наблюдаемая визуально-оптически глубина остаточного рельефа маркировки, показанная на рис. 4, в, соответствует $(h_{opt})_{max} = 0,40...0,48$ мм.

С целью выяснения возможностей визуализации остаточных напряжений было выполнено магнитографирование конусообразного тест-образца и получена МОВ, приведенная на рис. 5.

Для части образца сделана магнитограмма (рис. 5, б). Для оценки световой картины сняты

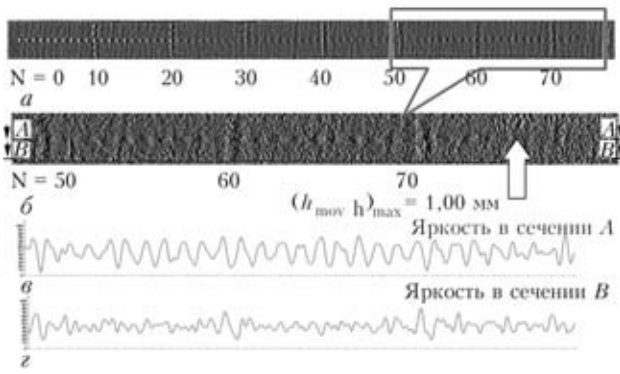


Рис. 5. Магнитооптическая визуализация точечных остаточных напряжений: *a* — внешний вид образца; *б* — увеличенный фрагмент 50...75 точек; *в* — яркость в среднем (сигнальном) сечении; *г* — яркость в периферийном (сигнально-шумовом) сечении

две диаграммы распределения яркости — в сечении *A*, совпадающим с осью расположения вмятин, и в сечении *B*, где встречаются только вертикальные линии из вмятин, соответствующие 50, 60 и 70 порядковым номерам. Из рис. 5, *в*, *г* следует, что рельеф распределения остаточных напряжений повторяет рельеф удаленных вмятин.

Таким образом, метод МОВ МГ визуализирует остаточные напряжения во всем диапазоне сигналов тест-образцов, т. е. до глубины $(h_{\text{mov}} h)_{\text{max}} \approx 0,90 \dots 1,00$ мм — ниже удаленного рельефа. На тех же образцах выполнена магнитопорошковая визуализация (рис. 6) в условиях полюсного намагничивания материала тест-образца до состояния насыщения в среднем сечении (индукция $B_s \approx 1,5 \dots 1,8$ Тл). В опытах использовали индикаторную магнитопорошковую суспензию на основе концентрата «РОСАВА-1200» ТУ 13700348.23–97.

По данным рис. 6, *а*, *б*, магнитопорошковый метод визуализирует остаточные напряжения в диапазоне отметок тест-образца 38-70, ограниченном глубиной залегания $(h_{\text{mp}})_{\text{max}} \approx 0,80 \dots 0,86$ мм ниже удаленного рельефа. Характер распределения амплитуд сигнала можно видеть по иллюстрациям рис. 6, *в*, *г*, где представлены графики яркости изображений для указанных сечений.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что метод МОВ МГ имеет более широкий диапазон визуализируемых амплитуд остаточных напряжений, поскольку проявляет чувствительность к наклепным дефектам на глубине залегания $(h_{\text{mov}} h)_{\text{max}} \approx 0,90 \dots 1,00$ мм, в то время, как чувствительность магнитопорошкового метода ограничилась значением $(h_{\text{mp}})_{\text{max}} \approx 0,80 \dots 0,86$ мм. Кроме того, метод МОВ МГ имеет более высокое (на 2...8 дБ) соотношение сигнал/шум по отношению к магнитопорошковому методу, что обеспечивает его результатам более высокую достоверность [9].

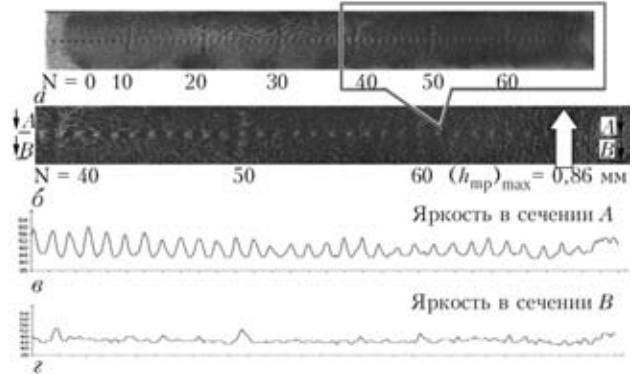


Рис. 6. Магнитопорошковая визуализация точечных остаточных напряжений: *a* — общий вид; *б* — увеличенный фрагмент 40...68 точек; *в* — яркость в среднем (сигнальном) сечении; *г* — яркость в периферийном (сигнально-шумовом) сечении

Приведем некоторые примеры применения средств МОВ МГ к реальным объектам.

Пример дефектоскопии сварных швов средствами МОВ МГ представлен на рис. 7. Это составная пластина листового металла (Ст3 толщиной 2,2 мм слева и 1,5 мм справа), соединенная встык при помощи двусторонней аргодуговой сварки. Лицевая сторона зачищена и не имеет уступа, обратная — с уступом по толщине. С лицевой стороны сварной шов зачищен при помощи абразивного круга (Rz 40). Исследуемая поверхность лишена покрытия, ее визуальное-оптическое исследование позволяют обнаружить область левой границы сварного шва по изменению цвета металла (1), область правой границы шва не обнаруживается, очевидно, вследствие оплавления края тонкого листа и последовавших за этим диффузионных процессов. Поверхностных дефектов не обнаружено.

Результаты визуализации средствами МОВ МГ (рис. 7, *б*) также позволяют выявить области коренного шва сварки на фоне следов механообработки поверхности (1). Кроме того, на магнитограмме видны подповерхностные дефекты типа цепочек пузырьков (2). Хорошо различима также область правой границы шва, совпадающая с внутренним уступом по толщине (3).

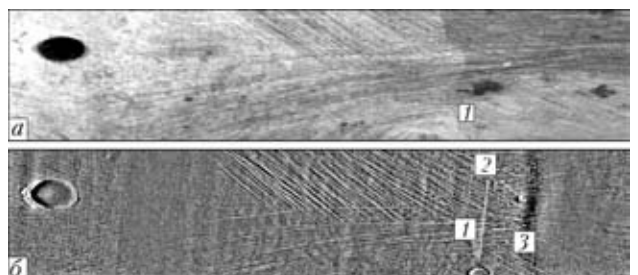


Рис. 7. Сварной шов без поверхностных дефектов (зачистка с лицевой стороны): *a* — фотография поверхности тест-образца; *б* — МОВ МГ тест-образца (1 — кромка сварного шва; 2 — подповерхностные пузырьки воздуха; 3 — область корня шва)



Рис. 8. Корродированная поверхность (толщина коррозии 0,3...0,5 мм): а — изображение поверхности тест-образца; б — МОВ МГ поверхности тест-образца

Другой пример касается применения метода МОВ МГ в условиях корродированной поверхности (рис. 8). Тест-образец представлен в виде пластины металла (ст.08кп толщиной 1 мм) с рельефной маркировкой лицевой поверхности знаками «29165», выполненной путем клеймления. Образец был подвержен химической обработке, способствующей активной коррозии. Вследствие образования на поверхности образца рыхлой, пластинчатой ржавчины толщиной до 0,5 мм цифры практически неразличимы (рис. 8, а).

Результаты исследования МОВ МГ (рис. 8, б) позволили провести уверенное восстановление знаков первичного номера «29165» по структуре ржавчины и остаточному рельефу знаков. Данный результат представляет безусловный интерес с точки зрения установления значения маркировочных данных, уничтоженных коррозией, однако его ценность, с точки зрения дефектоскопии корродированных поверхностей, не определена.

В заключение следует отметить, что метод и программно-аппаратные средства МОВ МГ были разработаны Межотраслевой лабораторией методов и средств спецтехники радиотехнического факультета Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт» для специального применения — обеспечения экспертно-криминалистических исследований рельефных маркировочных обозначений ферромагнитных поверхностей. Их апробация и внедрение по прямому назначению оказались весьма успешными — комплексы моделей «Вий-5» экс-

плуатируются в экспертно-криминалистических подразделениях Украины, стран ближнего и дальнего зарубежья.

Выводы

Представленные экспериментальные данные свидетельствуют о достаточно высоких показателях качества неразрушающего контроля, полученных методом МОВ МГ, что делает перспективным его дальнейшие исследования для оценки эффективности применения в области дефектоскопии.

Полученные оценки чувствительности метода МОВ МГ к различным классам дефектов показывают его превосходство над магнитопорошковым, капиллярным и визуально-оптическим методами. Априорно есть основания полагать, что метод МОВ МГ имеет преимущества и перед другими методами неразрушающего контроля в диапазоне приповерхностных слоев до 1...2 мм и при исследовании тонкостенных ферромагнитных изделий.

1. *Троицкий В. А.* Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин. — Киев: Феникс, 2002. — 300 с.
2. *Пат. 42880 Україна.* С. В. Левый, Ю. С. Агалиди. Спосіб магнітооптичного контролю виробу. — Заяв. № 99074257, від 22.07.1999. Приоритет від 05.10.2001. Бюл. № 10, 7G 01N 27/82, 27/83.
3. *Пат. 2159426 РФ.* С. В. Левый, Ю. С. Агалиди. Способ магнітооптичного контролю изделия. — Заяв. 25.10.1999; Опубл. 20.11.2000. — Бюл. № 32. — 6 с.
4. *Levy S. V., Ostrovsky A. S., Agalidi Yu. S.* Magnetic field topographical survey by space-time light modulators. SPIE Proceedings. — 1993. — Vol. 2108. — P. 142–146.
5. *ДСТУ 2865–94.* Контроль неруйнівний. Терміни та визначення. Затвердж. та введ. 08.12.1994. — Київ: Держстандарт України, 1995. — 51 с.
6. *Агалиди Ю. С., Левый С. В., Мачнев А. М.* Экспериментальная оценка чувствительности и достоверности магнітооптической визуализации рельефных трасс // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. — 2006. — № 32. — С. 39–46.
7. *ГОСТ 21105–87.* Контроль неразрушающий. Магнітопорошковый метод; Введ. 01.01.1988 взамен ГОСТ 21105–75; Переизд. (апрель 1992 г.) с Изменением № 1, утвержденным в сентябре 1989 г. (ИУС 1-90). — М.: Изд-во стандартов. 1992. — 17 с.
8. *Применение магнітооптичного преобразователя для восстановления сигнала по неформатным записям / С. В. Левый, А. М. Мачнев, Ю. С. Агалиди и др. // Вестник НТУУ «КПІ». Сер. Радиоелектроника. — 2000. — 43, № 5. — С. 62–66.*
9. *Агалиди Ю. С., Левый С. В., Мачнев А. М.* Сравнительный анализ магнітопорошкового и магнітооптического методов визуализации пространственного распределения магнитного поля при исследовании остаточных напряжений // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. — 2006. — № 31. — С. 18–24.