

КОНТРОЛЬ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ СТАЛЬНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА С ПОМОЩЬЮ ПЛЕНОЧНЫХ МАГНИТОЭЛАСТОВ И МАГНИТНОЙ СУСПЕНЗИИ

С.Е. ИЛЬЯШЕНКО, канд. физ.-мат. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: svilyashenko@yandex.ru

© Ильяшенко С.Е., Афанасьева Л.Е., 2021

Представлены результаты экспериментальных исследований кристаллографической текстуры стального листового проката по анизотропии магнитных параметров. Для визуализации магнитных полей рассеяния использовали пленочные магнитоэласты и магнитную суспензию. Показано, что контраст изображений ромба Корзунина над стальным листом с ребровой текстурой в магнитоэластах с микрокапсулированной магнитной жидкостью сравним с контрастом, достигаемым с помощью жидких магнитных суспензий. Данные индикаторы поля можно использовать для качественного обнаружения анизотропии в листовых материалах и определения осей легкого намагничивания.

Ключевые слова: стальной листовой прокат, текстура, анизотропия, ромб Корзунина, магнитоэласт, ферромагнитная суспензия.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-45-50

ВВЕДЕНИЕ

От кристаллографической текстуры, под которой понимается преимущественная пространственная ориентация зерен в поликристалле, зависят механические и физические свойства металлов [1–4]. Например, известно, что железо и его сплавы имеют максимальную прочность вдоль кристаллографических направлений $\langle 111 \rangle$, а наименьшую – вдоль $\langle 100 \rangle$. Создание совершенной кристаллографической текстуры позволяет повысить эксплуатационные характеристики сплавов. Часто при изготовлении деталей возникает и обратная задача – получение изотропного материала, не обладающего текстурой. В связи с этим важной задачей является разработка неразрушающих методов контроля, позволяющих устанавливать тип и степень совершенства кристаллографической текстуры материала.

Зависимость магнитных структурно-чувствительных параметров от кристаллографической анизотропии дает возможность использовать их для текстурного анализа. Г.С. Корзуниным разработан новый неразрушающий магнитопорошковый способ обнаружения текстуры в листовых материалах [1–3] и созданы магнитные текстурометры, не имеющие мировых аналогов и позволяющие определять кристаллографическую текстуру в движущейся полосе электротехнической стали. Суть обнаруженного эффекта состоит в том, что геометрия индикаторных рисунков полей рассеяния, полученных при намагничивании листового материала намагничивающей системой (полюсом постоянного магнита или электромагнита) перпендикулярно плоскости листа, соответствует типу текстуры испытуемого материала. Над изотропным листом наблюдается круг, над кубической текстурой – квадрат [1]. Над образцом с ребровой текстурой появляется четкий ромб, форма которого (отношение длин диагоналей) не зависит от формы намагничивающего полюса [1–3]. Направление большей диагонали ромба всегда совпадает с направлением легкого намагничивания.

Магнитопорошковая дефектоскопия является широко распространенным стандартизованным методом неразрушающего контроля качества стальных деталей и инструмента [5]. Разработанная номенклатура водных и масляных магнитных суспензий на основе оксидов железа обеспечивает высокую чувствительность метода. Вместе с тем операции нанесения суспензии на контролируемое изделие путем окунания или поливом с помощью шланга не технологичны и ограничивают производительность труда контролера.

В данной статье для магнитного контроля кристаллографической текстуры стального листового проката предлагается использовать визуализирующие эластичные полимерные пленки, импрегнированные микрокапсулированной магнитной жидкостью. При микрокапсулировании [6, 7] микрокапли магнитной жидкости заключаются в тонкую оболочку, масса которой составляет малую долю (единицы процентов) от общей массы. Микрокапсулирование сводится к диспергированию магнитной жидкости в подходящей жидкой или газовой среде с последующим покрытием капель оболочкой – слоем капсулирующего вещества. Жидкая оболочка микрокапсул затем подвергается отверждению под действием температуры или химических реагентов. В настоящее время выпуск этих индикаторов поля освоен промышленностью и они находят практическое применение.

Цель работы: оценить возможности контроля кристаллографической текстуры стального листового проката с помощью пленочного магнитоэласта и магнитной суспензии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве образцов для исследования использовали анизотропные листы трансформаторной стали толщиной 0,4 мм.

Для визуализации индикаторного рисунка, отражающего анизотропию магнитных характеристик листового ферромагнитного материала, применяли пленочный магнитоэласт [7] и магнитную суспензию на магнетитовой основе.

Магнитную суспензию наносили на поверхность стального листа, пленочный магнитоэласт прикладывали к сухой чистой поверхности образца без дополнительного прижатия. Намагничивающей системой служил цилиндрический постоянный магнит ($\varnothing 6 \times 12$ мм), который помещали с обратной стороны листа. Величину зазора L между магнитом и образцом изменяли от 3 до 0 мм с шагом 1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Механизм формирования оптического контраста в магнитных суспензиях связан с возникновением силы \mathbf{F} взаимодействия между отдельной частицей и источником неоднородного поля, $\mathbf{F} = \mathbf{A}\chi V$, где $\mathbf{A} = B \frac{dB \mathbf{r}}{dr r}$ (\mathbf{r}/r – единичный вектор, направленный в сторону наибольшего изменения магнитной индукции B); χ – магнитная восприимчивость. Под действием этой силы частицы суспензии перемещаются и концентрируются в областях с наибольшим градиентом поля. Области с большой концентрацией частиц становятся менее прозрачными и поэтому при визуальном наблюдении выглядят более темными [8, 9].

На рис. 1 представлены изображения индикаторных рисунков из ферромагнитной суспензии, полученных на листе стали при различных значениях зазора L . Следует отметить высокую разрешающую способность и визуализирующие возможности этого индикатора поля. На всех четырех частях рисунка прослеживается изображение ромба Корзунина, по которому несложно определить направление

большей диагонали. При уменьшении зазора между постоянным магнитом и образцом до 1...0 мм дополнительно выявляются границы зерен.

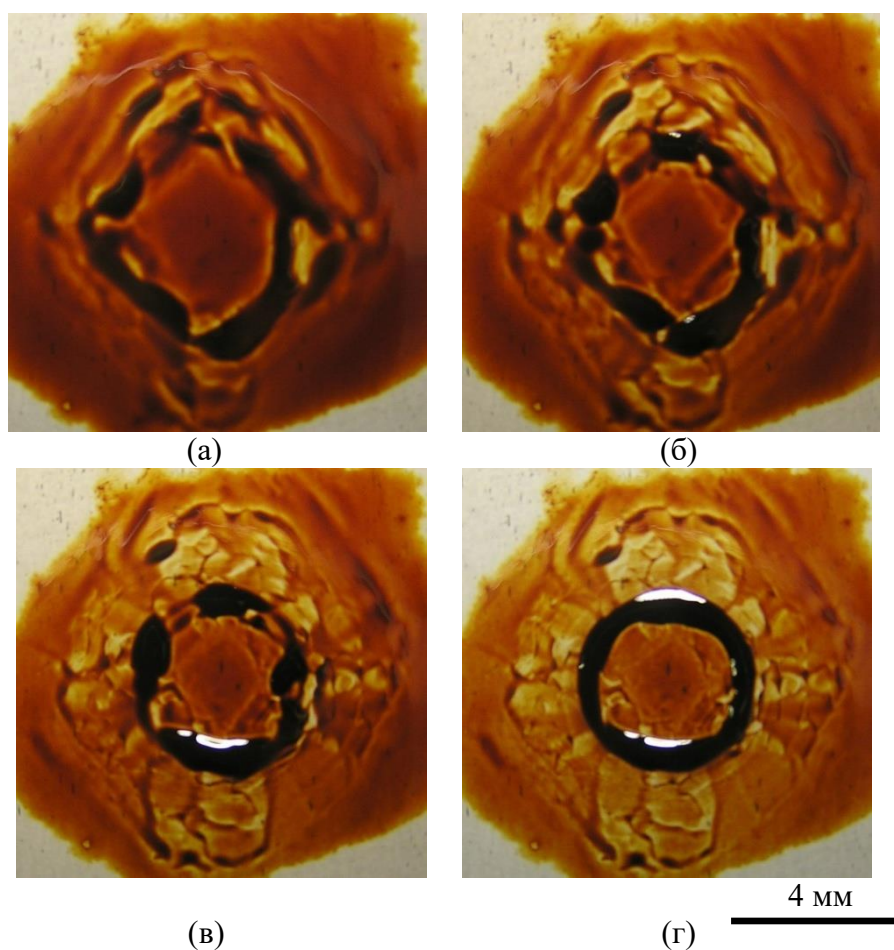


Рис. 1. Эволюция ромба Корзунина при изменении расстояния L между образцом и магнитом: $L = 3$ (а), 2 (б), 1 мм (в); нулевой зазор (г); индикатор – магнитная суспензия

Механизм формирования оптического контраста в испытуемых магнитоэластах отличается от контраста, возникающего в традиционных магнитных суспензиях [8–11]. В магнитоэластах описанный выше механизм формирования оптического контраста практически не действует, так как перемещение частиц ограничено оболочкой капсул. Оптический контраст в данном случае можно объяснить образованием под действием внешнего поля изолированных друг от друга цепочек частиц, ориентирующихся вдоль силовых линий. Как показано в работе [6], такие цепочки обуславливают высокую прозрачность композита по сравнению с исходным неориентированным состоянием.

Магнитоэласты обладают меньшей разрешающей способностью, чем магнитные суспензии. Этот индикатор поля чувствителен к величине зазора между листом и постоянным магнитом. При значении $L = 3$ мм ромб Корзунина незаметен. При нулевом зазоре он вырождается в круг, отражая форму постоянного магнита (рис. 2). При данных условиях эксперимента оптимальной для анализа текстуры является величина зазора 1...2 мм.

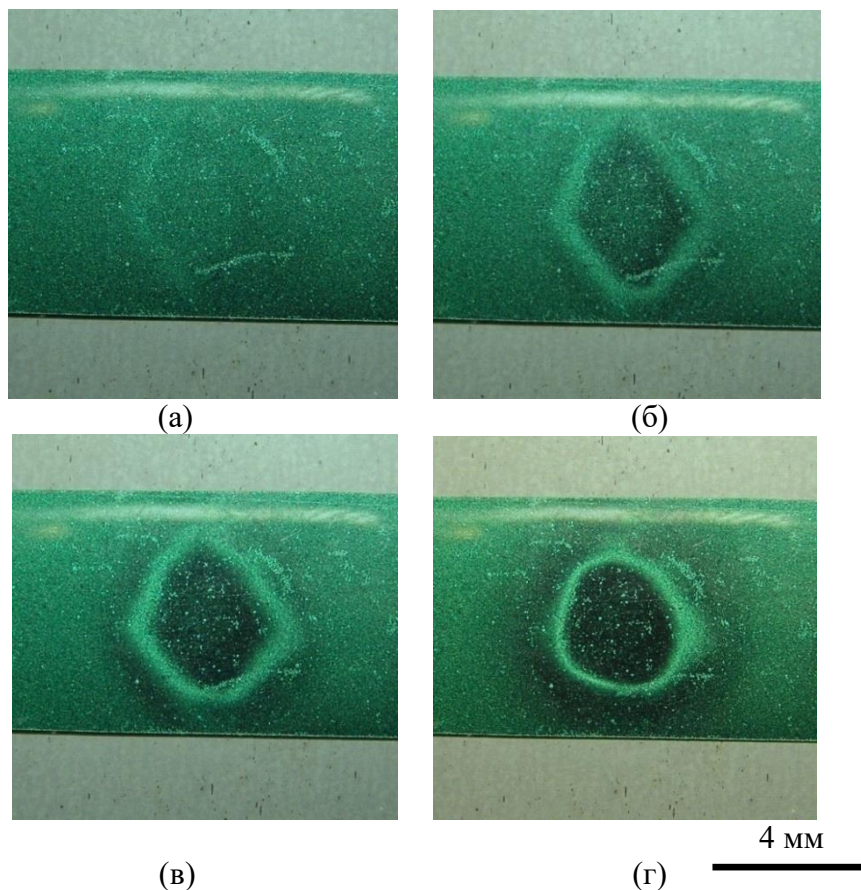


Рис. 2. Эволюция ромба Корзунина при изменении расстояния L между образцом и магнитом: $L = 3$ (а), 2 (б), 1 мм (в); нулевой зазор (г); индикатор – магнитоэласт

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что контраст изображений ромба Корзунина над стальным листовым прокатом с ребровой текстурой, полученных в магнитоэластах с микрокапсулированной магнитной жидкостью, сравним с контрастом, достигаемым с помощью жидких магнитных суспензий. Данные индикаторы поля можно использовать для качественного обнаружения анизотропии в листовых материалах и определения осей легкого намагничивания.

Пленочные магнитоэласты обладают достаточно хорошими визуализирующими возможностями. Эти пленки являются многоцветными. Благодаря эластичности с их помощью можно контролировать кривые поверхности, вырезать нужного размера и геометрической формы без ущерба качеству. Пленки данного вида удобны в эксплуатации и перспективны для проведения экспресс-контроля в полевых или цеховых условиях и при обследовании крупногабаритных стальных конструкций. Использование пленочных магнитоэластов с микрокапсулированной магнитной жидкостью в качестве индикаторных сред расширяет функциональные возможности магнитопорошковой дефектоскопии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корзунин Г.С. Магнитные методы определения кристаллической текстуры. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. 128 с.
2. Дякин В.В., Корзунин Г.С., Литвиненко Л.А., Кайбичева С.Л. О магнитопорошковом методе контроля кристаллографической текстуры электротехнической стали // *Дефектоскопия*. 2004. № 5. С. 63–78.

3. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Худорожкова Ю.В., Корзунин Г.С. Влияние типа кристаллографической текстуры на анизотропию параметров магнитных полей рассеяния стального листового проката // *Физическая мезомеханика*. 2019. Т. 22. № 3. С. 54–64.

4. Матюк В.Ф. Состояние неразрушающего контроля штампуемости листового проката сталей // *Неразрушающий контроль и диагностика*. 2012. № 3. С. 15–42.

5. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 4. 736 с.

6. Jin S., Tiefel T.N., Wolfe R. Directionally-conductive, optically-transparent composites by magnetic alignment // *IEEE transactions on magnetics*. 1992. V. 28. № 5. P. 2211–2213.

7. Ardizzone V.A. Viewing film for dc magnetic fields. URL: <http://amasci.com/amateur/magnerite.html> (дата обращения: 22.03.2021).

8. Гречишкин Р.М., Гусев М.Ю., Чигиринский С.А., Ильяшенко С.Е., Афанасьева Л.Е., Мамкина Н.О. Магнитооптические твердотельные индикаторные среды и их технические применения // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2007. № S2. С. 99–110.

9. Grechishkin R., Chigirinsky S., Gusev M., Cugat O., Dempsey N.M. Magnetic imaging films. В. Azzarboni et al. (eds.). *Magnetic Nanostructures in Modern Technology*. Springer, Dordrecht, 2008. P. 195–224.

10. Гасанов О.В., Иванова А.И., Афанасьева Л.Е., Калимуллина Э.Т., Гречишкин Р.М. Электронно-микроскопический контроль доменной структуры и полей рассеяния магнитных элементов МЭМС // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2015. № 9. С. 54–57.

11. Афанасьева Л.Е., Зигерт А.Д., Иванова А.И., Гречишкин Р.М. Магнитооптическая визуализация дефектов сварных соединений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 1 (5). С. 13–20.

Для цитирования: Ильяшенко С.Е., Афанасьева Л.Е. Контроль кристаллографической текстуры стального листового проката с помощью пленочных магнитоэластов и магнитной суспензии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 45–50.

CONTROL OF THE CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE OF STEEL SHEETS USING FILM MAGNETOELASTS AND MAGNETIC SUSPENSION

S.E. ILYASHENKO, Cand. Sc., L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: svilyashenko@yandex.ru

The results of experimental studies of the crystallographic texture of steel sheet products by the anisotropy of magnetic parameters are presented. To visualize the stray magnetic fields, we used film magnetoelasts and a magnetic suspension. It is shown that the contrast of images of a Korzunin rhombus above a steel sheet with a ribbed texture in magnetoelasts with a microencapsulated magnetic fluid is comparable to the contrast achieved

with liquid magnetic suspensions. These field indicators can be used to qualitatively detect anisotropy in sheet materials and determine the axes of easy magnetization.

Keywords: steel sheet products, texture, anisotropy, Korzunin's rhombus, magnetoelast, ferromagnetic suspension.

REFERENCES

1. Korzunin G.S. Magnitnyye metody opredeleniya kristallicheskoy tekstury [Magnetic methods for determining the crystal texture]. Yekaterinburg: UrO RAN, 1995. 128 p.
2. Dyakin V.V., Korzunin G.S., Litvinenko L.A., Kaibicheva S.L. On the magnetic particle method for controlling the crystallographic texture of electrical steel. *Defektoskopiya*. 2004. No 5, pp. 63–78. (In Russian).
3. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Khudorozhkova Yu.V., Korzunin G.S. Influence of the type of crystallographic texture on the anisotropy of the parameters of magnetic scattering fields of steel sheet metal. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2019. V. 22. No 3, pp. 54–64. (In Russian).
4. Matyuk V.F. The state of non-destructive testing of the stamping ability of steel sheets. *Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika*. 2012. No 3, pp. 15–42. (In Russian).
5. *Nerazrushayushchiy kontrol: spravochnik: v 8 t.* [Non-destructive testing: Handbook: in 8 v.], under total. ed. V.V. Klyuev. Moscow: Mashinostroenie, 2006. V. 4. 736 p.
6. Jin S., Tiefel T.N., Wolfe R. Directionally-conductive, optically-transparent composites by magnetic alignment. *IEEE transactions on magnetics*. 1992. V. 28. No 5, pp. 2211–2213.
7. Ardizzone V.A. Viewing film for dc magnetic fields. URL: <http://amasci.com/amateur/magnerite.html> (date accessed: 22.03.2021).
8. Grechishkin R.M., Gusev M.Yu., Chigirinsky S.A., Ilyashenko S.E., Afanasieva L.E., Mamkina N.O. Magneto-optical solid-state indicator media and their technical applications. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhn. zhurnal)*. 2007. No S2, pp. 99–110. (In Russian).
9. Grechishkin R., Chigirinsky S., Gusev M., Cugat O., Dempsey N.M. Magnetic imaging films. B. Azzerboni et al. (eds.). *Magnetic Nanostructures in Modern Technology*. Springer, Dordrecht, 2008, pp. 195–224.
10. Gasanov O.V., Ivanova A.I., Afanasieva L.E., Kalimullina E.T., Grechishkin R.M. Electron-microscopic control of the domain structure and stray fields of magnetic elements of MEMS. *Poverkhnost. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyy i neytronnyy issledovaniya*. 2015. No 9, pp. 54–57. (In Russian).
11. Afanasieva L.E., Ziegert A.D., Ivanova A.I., Grechishkin R.M. Magneto-optical visualization of defects in welded joints. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No 1 (5), pp. 13–20. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 21.03.2021; после рецензирования/reviced: 25.03.2021; принята/accepted: 31.03.2021