

Количественный анализ текстуры деформации и первичной рекристаллизации при угловой прокатке и отжиге магнитострикционного сплава $(\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17})_{99}\text{V}_1$

© 2023

Стрижаченко Иван Романович*¹, инженер

Гервасьева Ирина Владимировна², доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Милютин Василий Александрович³, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Девятериков Денис Игоревич⁴, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург (Россия)

*E-mail: strizhachenko@imp.uran.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5217-230X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8928-1707>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5808-3959>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6909-7678>

Поступила в редакцию 23.06.2023

Принята к публикации 14.11.2023

Аннотация: Сплав Fe–Ga является перспективным магнитострикционным материалом благодаря оптимальному сочетанию функциональных свойств и относительно низкой цены за счет отсутствия редкоземельных элементов в составе. Для получения максимальной магнитострикции в поликристаллах Fe–Ga необходимо создавать кристаллографическую текстуру с преобладанием направления $\langle 100 \rangle$, поскольку наибольшей является константа тетрагональной магнитострикции. Традиционные методы термомеханической обработки не приводят к формированию такой текстуры в сплаве с ОЦК-решеткой. В работе впервые предложено использовать угловую прокатку с целью увеличения доли благоприятных текстурных компонент. Теплая прокатка со степенью деформации 70 % была реализована под углами 0, 30 и 90° по отношению к направлению горячей прокатки. Текстура деформации анализировалась с помощью рентгеновского текстурного анализа, а текстура и структура материала после рекристаллизации – методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) на сканирующем электронном микроскопе. Количественный анализ текстур проводился с помощью метода функции распределения ориентаций с использованием программного обеспечения ATEX. Количественно определена объемная доля некоторых компонент. Показано, что существенное изменение в текстурах деформации и первичной рекристаллизации происходит при прокатке под углом 90°. Образец после такой прокатки содержит наибольшее количество плоскостной компоненты $\{100\}$. Установлена зависимость между текстурой деформации и рекристаллизации в Fe–Ga: так, для повышения доли компонент с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$ при рекристаллизации необходимо присутствие в текстуре деформации плоскостных компонент $\{111\}$, что связано с преимущественным ростом благоприятных компонент в деформационной матрице с такой текстурой.

Ключевые слова: сплав Fe–Ga; сплав $(\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17})_{99}\text{V}_1$; количественный анализ текстуры; угловая прокатка; первичная рекристаллизация; магнитострикция.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук (№ МК-344.2022.4) и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (шифр «Магнит», № 122021000034–9).

Электронно-микроскопические исследования выполнены в Центре коллективного доступа Испытательного центра нанотехнологий и перспективных материалов Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН (Екатеринбург, Россия).

Статья подготовлена по материалам докладов участников XI Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2023), Тольятти, 11–15 сентября 2023 года.

Для цитирования: Стрижаченко И.Р., Гервасьева И.В., Милютин В.А., Девятериков Д.И. Количественный анализ текстуры деформации и первичной рекристаллизации при угловой прокатке и отжиге магнитострикционного сплава $(\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17})_{99}\text{V}_1$ // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 4. С. 121–128. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-4-66-11.

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы с высокой магнитострикцией имеют широкое применение в электротехнической промышленности. На их основе изготавливают приводящие устройства и линейные двигатели, преобразователи звука и ультразвука, датчики различного назначения, устройства для преобразования механической энергии в электрическую и др.

В последние годы в качестве перспективной замены традиционных магнитострикционных материалов рассматривается сплав Fe–Ga, который обладает оптимальным сочетанием свойств и гораздо более низкой стоимостью по сравнению с популярным сплавом Fe–Dy–Tb [1]. По этой причине сегодня появилось большое количество исследований, посвященных сплаву Fe–Ga. Например, разработаны способы повышения

магнитострикции за счет создания оптимального фазового состава [2], подробно изучены фазовые превращения [3] и причины аномально высокой магнитострикции в сплаве [4]. Наиболее распространенной формой использования магнитострикционных сплавов (и многих других магнитомягких сплавов) являются листы, которые, отделенные друг от друга слоем изоляции, затем собираются в позиции заданной формы и размера. Такая конфигурация позволяет создавать объемные устройства, которые могут работать в условиях повышенных частот перемагничивания без больших потерь на вихревые токи, что особенно актуально в контексте многих магнитострикционных устройств.

Для получения листов из сплава Fe–Ga обычно используют деформацию прокаткой с последующим рекристаллизационным отжигом. Очень важно в процессе термомеханической обработки создать определенную кристаллографическую текстуру, необходимую для достижения наилучших свойств (магнитострикции). В случае Fe–Ga такой текстурой является $\langle 100 \rangle // \text{НП}$ (направление прокатки), при которой величина магнитострикции максимальна [5]. Проблема в том, что сплав Fe–Ga при содержании Ga до 19 ат. % (первый пик зависимости магнитострикции от состава [6]), который используется для прокатки, обладает объемно-центрированной кубической (ОЦК) структурой, в которой довольно трудно за счет первичной рекристаллизации получить большой объем зерен с ориентировкой $\langle 100 \rangle // \text{НП}$. Для достижения этой цели необходимо подробное исследование особенностей формирования текстурных компонент в сплаве Fe–Ga на различных этапах термомеханической обработки при варьировании режимов. Такие исследования активно ведутся последние годы [7–9], однако проблема все еще не решена в полной мере. Известно, что за счет подбора режимов прокатки и отжига можно существенно повысить содержание компоненты $\langle 100 \rangle // \text{НП}$ в конечной текстуре, но даже в этом случае ее доля остается довольно низкой [9; 10]. Кроме того, с технической точки зрения прокатка сплава Fe–Ga осложняется его склонностью к хрупкому разрушению, поэтому двойной сплав часто легируют небольшим количеством бора, что позволяет минимизировать проблему [11]. Существуют исследования, демонстрирующие возможность создания благоприятной текстуры с преобладанием так называемой Госсовской (такое название носит ориентировка $\{110\}\langle 100 \rangle$) или близкой к ней ориентировки за счет вторичной рекристаллизации подобно механизму, реализуемому в анизотропной электротехнической стали Fe–3%Si [12; 13]. Однако это технологически сложный процесс, требующий, кроме всего прочего, внесения дополнительных включений для торможения нормального роста зерен на определенных стадиях отжига.

Для решения задачи создания кристаллографической текстуры, оптимальной для формирования магнитных свойств в сплавах на основе Fe–Ga, необходимы дальнейшие исследования, в том числе с привлечением новых нестандартных подходов. Одним из таких подходов является угловая прокатка [14]. Она заключается в изменении угла направления холодной прокатки по отношению к направлению горячей прокатки. Это позволяет вносить изменения в процессы зарождения и роста зерен, что в некоторых случаях может приво-

дить к увеличению количества $\langle 100 \rangle$ ориентировки. Ранее такой подход был использован при прокатке ОЦК-сплава Fe–Si и показал свою эффективность [15–17]. Поскольку с точки зрения особенностей формирования текстуры этот сплав подобен Fe–Ga, можно надеяться, что угловая прокатка будет эффективна и в данном случае. Ранее такие эксперименты не проводились, поэтому идея их реализации легла в основу настоящей статьи.

Для повышения пластичности и минимизации риска разрушения при прокатке в качестве материала исследования выбран сплав, легируемый 1 ат. % бора, а именно $(\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17})_{99}\text{B}_1$.

Цель работы – исследование влияния прокатки под углом на кристаллографическую текстуру в сплаве Fe–Ga.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Слиток состава $(\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17})_{99}\text{B}_1$ (в статье используются атомные проценты) был выплавлен индукционным методом в защитной атмосфере аргона и разлит в медную изложницу с помощью центробежного литья. Как было установлено ранее, такой метод разлива позволяет уменьшить количество пор в слитках Fe–Ga, а также позволяет добиться равномерного распределения химических элементов [18]. Добавка бора призвана повысить пластичность сплава, что позволит упростить задачу его пластической деформации. Слиток в форме цилиндра высотой 50 мм и диаметром 14 мм разрезался на три равные части поперек длинной стороны. Заготовки были прокованы до толщины 6 мм и подвергнуты горячей прокатке до толщины порядка 2,7 мм. Ковка и горячая прокатка осуществлялись при температуре 1000 °С. Затем с помощью электроискрового станка из полученных заготовок были вырезаны прямоугольники шириной 8 мм и длиной от 20 до 30 мм под разными углами по отношению к направлению горячей прокатки (рис. 1).

Образцы подвергались прокатке в несколько проходов на двухвалковом прокатном стане с подогревом до 350 °С перед каждым проходом для минимизации риска растрескивания. Общая степень деформации с помощью теплой прокатки составила 70 %. Текстура деформации исследовалась с помощью дифрактометра PANalytical Empyrean Series 2. Полусные фигуры образцов были получены в конфигурации с фокусирующей поликапиллярной линзой.

Образец закреплялся на измерительном столике с тремя степенями свободы. Источником излучения служила рентгеновская трубка, работающая на характеристической длине волны $\text{CoK}\alpha$, $\lambda = 1,789 \text{ \AA}$. На основе экспериментальных полусных фигур $\{110\}$, $\{200\}$ и $\{112\}$ с помощью программного обеспечения ATEX¹ были построены функции распределения ориентации (ФРО) по Бунге. С помощью специально созданной программы по данным ФРО для деформированных образцов получали объемные доли заданных ориентировок $\{hkl\}\langle uvw \rangle \pm 10^\circ$ подобно тому, как это было реализовано в предыдущей работе [19].

Рекристаллизационный отжиг деформированных образцов проводили в вакууме при температуре 900 °С

¹ Beausir B., Fundenberger J.-J. *Analysis Tools for Electron and X-ray diffraction // ATEX-software*. URL: www.atex-software.eu.

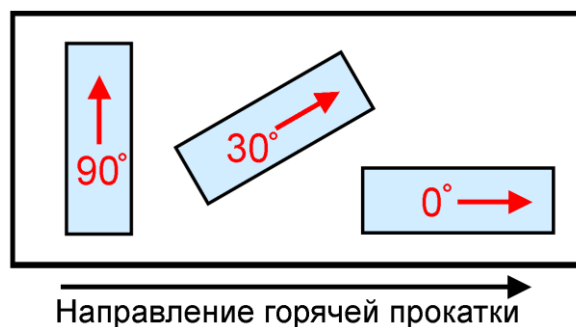


Рис. 1. Схема вырезания образцов из горячекатанного листа под разными углами по отношению к направлению горячей прокатки

Fig. 1. The scheme of cutting samples from a hot-rolled sheet at different angles to the hot rolling direction. The horizontal arrow at the bottom of the figure indicates the hot rolling direction

в течение 30 мин. Пробоподготовка для структурных исследований осуществлялась путем механической шлифовки и электрополировки в реактиве 90 % $C_2H_4O_2$ + 10 % $HClO_4$. Структуру и текстуру рекристаллизованных образцов изучали с помощью метода дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) на сканирующем электронном микроскопе FEI Quanta 200 с использованием приставки фирмы EDAX. На подвергнутых химической полировке рекристаллизованных образцах сканировали одинаковую по площади область при относительно небольшом увеличении $\times 100$, что позволяет охватить большее количество зерен и получить лучшую статистику. В общей сложности на каждом образце методом EBSD была исследована площадь порядка 25 mm^2 . С помощью программы TSL OIM Analysis определяли объемные доли плоскостей или направлений в плоскости, а также средний диаметр зерен.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сечения ФРО при угле $\phi=45^\circ$ с сопутствующей информацией приведены на рис. 2.

На сечении ФРО 45° (рис. 2 а) представлены наиболее характерные для деформации ОЦК-материалов ориентировки. Видно, что во всех трех вариантах угловой прокатки (рис. 2 б–д) преимущественно присутствуют ориентировки с октаэдрической плоскостью $\{111\}$, параллельной плоскости прокатки (горизонтальная линия при угле $\Phi=54.7^\circ$), а также, с существенно большей интенсивностью, ориентировки с кубической плоскостью $\{100\}$, параллельной плоскости прокатки (верхняя сторона ориентационного куба при $\Phi=0^\circ$). При этом в образце, прокатанном поперек направления прокатки (рис. 2 с), существенно больше ориентировок с плоскостями $\{111\}$. Сумма объемных долей $\{111\}\langle 110\rangle$ и $\{111\}\langle 112\rangle$ в образце равна 6,9 %, а в образцах, прокатанных под углами 0 и 30° , эта величина составляет 5,8 и 5,7 % соответственно. Кроме того, в этом образце четко выделяется ориентировка $\{111\}\langle 132\rangle$ (7,1 %, что больше по сравнению с другими вариантами) (рис. 2, таблица 1). Что касается кубических ориентировок, то их объемная доля существенно выше, чем октаэдрических, и примерно одинакова во всех исследованных образцах. Помимо этого, на рис. 2 б и 2 с присутствует Госсовская

ориентировка $\{110\}\langle 001\rangle$ (правый нижний угол на сечении), которая, так же как и кубическая, является благоприятной для формирования магнитных свойств.

Исследование рекристаллизованных образцов позволяет проследить эволюцию кристаллографической текстуры в зависимости от угла между холодной и горячей прокаткой. Текстура рекристаллизации была изучена методом EBSD, поскольку в данном случае образцы менее пригодны для исследования методом рентгеновской дифракции (XRD). Это связано с тем, что образующиеся в результате рекристаллизации зерна определенной ориентировки намного больше по площади, чем ячейки в деформационной структуре, что не дает хорошего уровня статистической выборки методом XRD. Метод EBSD же дает возможность одновременного анализа зеренной структуры и кристаллографической текстуры и хорошо подходит для изучения рекристаллизованных образцов. Результаты исследования этим методом в виде фрагментов ориентационных карт приведены на рис. 3.

При визуальном анализе ориентационных карт можно сделать вывод, что образец, прокатанный под углом 90° , содержит большее количество «красных» зерен, т. е. тех, в которых плоскости $\{100\}$ лежат в плоскости листа. Конечно, для однозначного вывода необходим подробный количественный анализ содержания той или иной текстурной компоненты в текстуре образцов. Результаты такого анализа для текстуры деформации и текстуры рекристаллизации представлены в таблице 1. Поскольку наибольшую важность с точки зрения формирования функциональных свойств Fe–Ga имеют преобладающие направления, в рекристаллизованных образцах реализован их анализ с рассеянием $\pm 15^\circ$.

Из таблицы 1 видно, что использование угловой прокатки существенно улучшает текстуру образцов с точки зрения соотношения между основными кристаллографическими направлениями. При этом эффект при смене угла между горячей прокаткой и НП на 90° заметнее, чем при 30° . По сравнению с прокаткой вдоль направления горячей прокатки (0°) прокатка под 90° приводит к двукратному уменьшению нежелательной ориентировки $\langle 111\rangle // \text{НП}$ и существенному повышению доли $\langle 100\rangle // \text{НП}$. В то же время доля зерен с направлениями $\langle 110\rangle // \text{НП}$ неизменна при любом из исследованных режимов прокатки.

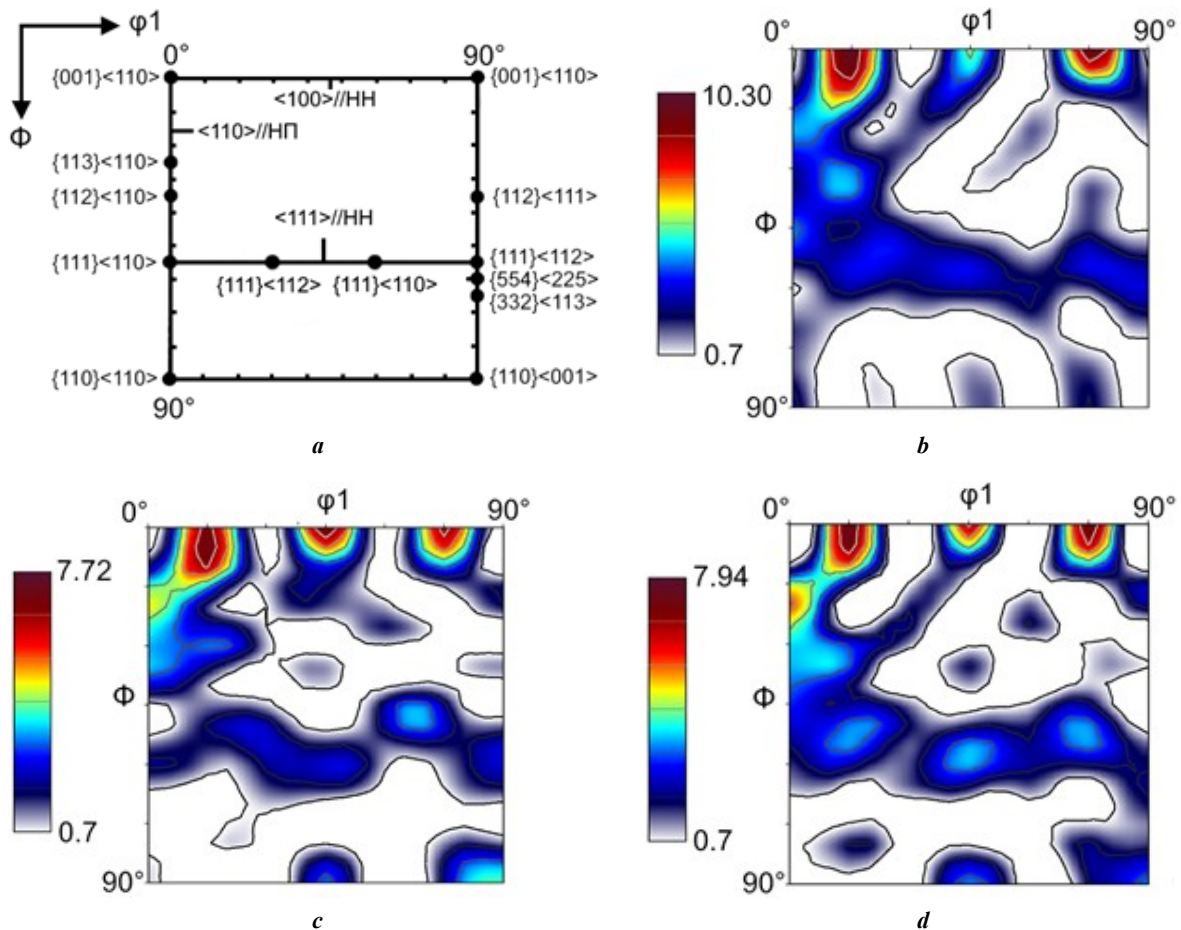


Рис. 2. Положение наиболее важных ориентировок (при $\varphi_2=45^\circ$) на ФРО, характерных для прокатки и рекристаллизации ОЦК-металлов (а) и сечения ФРО при $\varphi_2=45^\circ$ для образцов, прокатанных под разными углами к направлению горячей прокатки: 0° (b); 30° (c); 90° (d)

Fig. 2. The location of the most important orientations (at $\varphi_2=45^\circ$) on the ODF specific to rolling and recrystallization of bcc metals (a) and ODF sections at $\varphi_2=45^\circ$ for samples rolled at different angles to hot rolling direction: 0° (b); 30° (c); 90° (d)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что в сплаве Fe–19%Ga константа магнитострикции λ_{100} максимальна и составляет порядка 250 ppm. В то же время λ_{110} также довольно высока – порядка 150 ppm. Наконец, λ_{111} минимальна и по разным данным варьируется от –20 до 0 [10]. Для достижения высоких значений магнитострикции в поликристаллическом образце необходимо сочетание в его текстуре как можно большего количества ориентировок $\langle 100 \rangle$ и как можно меньшего количества $\langle 111 \rangle$, при этом присутствие $\langle 110 \rangle$ допустимо. В работе обнаружено влияние угла между горячей и холодной прокаткой на количество этих ориентировок в сплаве $(\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17})_{99}\text{B}_1$.

Для того чтобы установить причины изменения текстуры рекристаллизации прокатанных под разными углами образцов, необходимо проанализировать их текстуру деформации. Поскольку рекристаллизационный отжиг всех образцов проводился в идентичных условиях, именно исходная текстура (в данном случае текстура образцов после конечной прокатки) ответственна за наблюдаемые явления. Изменение угла направления финальной прокатки относительно направления горячей прокатки равносильно повороту образца

вокруг направления нормали (НН). Это приводит к изменению траекторий вращения различных ориентировок при пластической деформации. Как видно, в текстуре деформации образца, прокатанного поперек направления горячей прокатки, содержится существенно больше плоскостных ориентировок $\{111\}$.

Из литературы давно известно [20], что в ОЦК-сплаве Fe–3%Si границы наибольшей подвижности обладают зернами, разориентированные вокруг оси $\langle 110 \rangle$ на $27\text{--}35^\circ$. Этим объясняется рост компоненты $\{110\}\langle 001 \rangle$ в матрицу с сильной ориентировкой $\{111\}\langle 112 \rangle$ при вторичной рекристаллизации в электротехнической стали. Вероятно, в сплаве Fe–Ga возможно найти другие благоприятные соотношения для роста компоненты $\{100\}\langle hkl \rangle$ в какую-либо из компонент аксиальной текстуры $\{111\}$, например в преобладающую в варианте с прокаткой под углом 90° (рис. 2 c) ориентировку $\{111\}\langle 321 \rangle$. Это станет предметом дальнейших исследований.

Ориентационный критерий хоть и основной, но не единственный для роста зерен с благоприятным направлением $\langle 100 \rangle // \text{НП}$. Необходимо также учитывать особенности мезоструктурных элементов, таких как полосы деформации, полосы сдвига и переходные полосы

Таблица 1. Количественные характеристики текстуры (объемная доля компонент $\{hkl\}\langle uvw \rangle \pm 10^\circ$, % в текстуре деформации и объемная доля направлений $\langle uvw \rangle \pm 15^\circ$ в текстуре рекристаллизации и средний размер зерна после рекристаллизации)

Table 1. Texture quantitative characteristics (volume fraction of components $\{hkl\}\langle uvw \rangle \pm 10^\circ$, % in deformation texture and volume fraction of directions $\langle uvw \rangle \pm 15^\circ$ in recrystallization texture) and average grain size after recrystallization

Исследуемая характеристика	Угол между направлениями холодной и горячей прокатки, град.		
	0	30	90
Деформация прокаткой			
Доля ориентировки $\{100\}\langle 001 \rangle$	1,6	3,4	2,1
Доля ориентировки $\{100\}\langle 230 \rangle$	7,1	8,9	8,0
Доля ориентировки $\{100\}\langle 120 \rangle$	7,5	8,9	8,4
Доля ориентировки $\{110\}\langle 001 \rangle$	2,6	2,0	1,5
Доля ориентировки $\{111\}\langle 112 \rangle$	3,4	3,0	3,0
Доля ориентировки $\{111\}\langle 110 \rangle$	2,4	2,7	3,9
Доля ориентировки $\{111\}\langle 132 \rangle$	6,3	5,7	7,1
Рекристаллизация 900 °С, 30 мин			
Размер зерна (по секущей), мкм	123,6	99,3	129,0
Размер зерна (по среднему диаметру), мкм	149,2	130,3	153,2
Доля направлений $\langle 100 \rangle // \text{НП}$	15,3	18,9	24,4
Доля направлений $\langle 110 \rangle // \text{НП}$	15,6	15,5	15,9
Доля направлений $\langle 111 \rangle // \text{НП}$	7,8	5,7	3,5

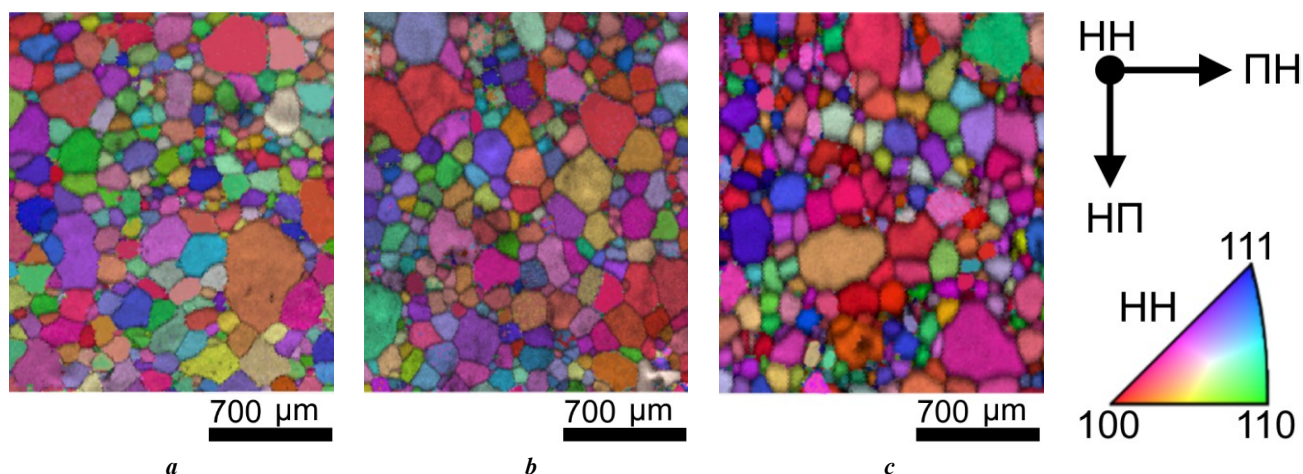


Рис. 3. Фрагменты ориентационных карт EBSD, полученных с рекристаллизованных образцов. Прокатка под углами к направлению горячей прокатки: 0° (а), 30° (б), 90° (с). Ориентация образцов при съемке: НП – направление прокатки; НН – направление нормали к листу; ПН – поперечное направление

Fig. 3. Fragments of orientation maps EBSD obtained from recrystallized samples. Rolling at angles to the hot rolling direction: 0° (a), 30° (b), 90° (c). Sample orientation during scanning: НП – rolling direction; НН – normal direction to a sheet; ПН – transverse direction

в структуре деформации. Кроме того, важную роль играет не только соотношение между компонентами текстуры деформации, но и расстояние между потенциальными зародышами рекристаллизации с определенной ориентировкой, а также другие параметры. Поэтому выявление однозначных механизмов, ответственных за наблюдаемое изменение текстуры при рекристаллизации, требует дополнительных исследований. В настоящей работе впервые показано, что прокатка под углом 90° по отношению к направлению горячей прокатки может быть перспективным инструментом создания благоприятной текстуры в сплаве Fe–Ga.

Исследовались образцы, вырезанные под углами 0, 30 и 90° по отношению к направлению горячей прокатки. Отсутствие образцов, вырезанных под другими углами, например 60° , связано с техническими ограничениями. Все образцы в рамках исследования были вырезаны из одного слитка (чтобы сохранять одинаковые условия эксперимента для всех образцов). Размер слитка и полученных из него горячекатанных заготовок не позволил вырезать еще один полноценный образец под углом 60° . Уменьшить размеры вырезаемых образцов не представлялось возможным, поскольку иначе было бы проблематично осуществлять последующую холодную прокатку. В связи с перспективами предложенного подхода, безусловно, необходимы дальнейшие исследования в этом направлении с использованием других углов между направлениями горячей и холодной прокатки, в том числе 60° .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Сплав $(\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17})_{99}\text{B}_1$, выплавленный методом индукционной плавки и разлитый с использованием центробежного литья, был успешно деформирован с помощью горячей и теплой прокатки под разными углами (0, 30 и 90°) к направлению горячей прокатки.

2. Показано, что текстура деформации после 70 % обжатия, помимо заметного количества плоскостной компоненты $\{111\}$, содержит большое количество нетипичных для текстуры деформации ОЦК-сплавов кубических ориентировок. Прокатка под углом 90° приводит к наибольшему количеству ограниченной компоненты $\{111\}<132>$ в пределах аксиальной $\{111\}$.

3. Установлено, что рекристаллизационный отжиг при 900°C образцов, прокатанных под углом 30 и 90° , приводит к более благоприятной с точки зрения формирования свойств Fe–Ga текстуре по сравнению с традиционной прокаткой (0°). Наиболее заметный эффект наблюдается в образце, прокатанном под углом 90° по отношению к направлению горячей прокатки. В работе впервые показано, что угловая прокатка является действенным инструментом улучшения текстуры первичной рекристаллизации в сплавах Fe–Ga.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин И.С., Палачева В.В., Мохамед А.К., Балагуров А.М. Структура и свойства Fe–Ga сплавов – перспективных материалов для электроники // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121. № 9. P. 937–980. DOI: [10.31857/s0015323020090053](https://doi.org/10.31857/s0015323020090053).

- Zhang Yiqun, Gou Junming, Yang Tianzi, Ke Yubin, Ma Tianyu. Non-Equilibrium Time-Temperature-Transformation Diagram for Enhancing Magnetostriction of Fe–Ga Alloys // *Acta Materialia*. 2022. Vol. 244. Article number 118548. DOI: [10.1016/j.actamat.2022.118548](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118548).
- Mohamed A.K., Palacheva V.V., Cheverikin V.V. et al. Low-temperature metastable-to-equilibrium phase transitions in Fe–Ga alloys // *Intermetallics*. 2022. Vol. 145. Article number 107540. DOI: [10.1016/j.intermet.2022.107540](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107540).
- Gou Junming, Ma Tianyu, Qiao Ruihua, Yang Tianzi, Liu Feng, Ren Xiaobing. Dynamic precipitation and the resultant magnetostriction enhancement in [001]-oriented Fe–Ga alloys // *Acta Materialia*. 2021. Vol. 206. Article number 116631. DOI: [10.1016/j.actamat.2021.116631](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116631).
- Na Suok-Min, Flatau A.B. Single grain growth and large magnetostriction in secondarily recrystallized Fe–Ga thin sheet with sharp Goss (011)[100] orientation // *Scripta Materialia*. 2012. Vol. 66. № 5. P. 307–310. DOI: [10.1016/J.SCRIPTAMAT.2011.11.020](https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTAMAT.2011.11.020).
- Xing Q., Du Y., McQueeney R.J., Lograsso T.A. Structural investigations of Fe–Ga alloys: Phase relations and magnetostrictive behavior // *Acta Materialia*. 2008. Vol. 56. № 16. P. 4536–4546. DOI: [10.1016/j.actamat.2008.05.011](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.05.011).
- Qi Qingli, Li Jiheng, Mu Xing, Ding Zhiyi, Bao Xiaoqian, Gao Xuexu. Microstructure evolution, magnetostrictive and mechanical properties of $(\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17})_{99.9}(\text{NbC})_{0.1}$ alloy ultra-thin sheets // *Journal of Materials Science*. 2020. Vol. 55. P. 2226–2238. DOI: [10.1007/s10853-019-04057-8](https://doi.org/10.1007/s10853-019-04057-8).
- Milyutin V.A., Gervasyeva I.V., Shishkin D.A., Beaugnon E. Structure and texture in rolled $\text{Fe}_{82}\text{Ga}_{18}$ and $(\text{Fe}_{82}\text{Ga}_{18})_{99}\text{B}_1$ alloys after annealing under high magnetic field // *Physica B: Condensed Matter*. 2022. Vol. 639. Article number 413994. DOI: [10.1016/j.physb.2022.413994](https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413994).
- Milyutin V.A., Gervasyeva I.V. Formation of crystallographic texture in Fe–Ga alloys during various types of plastic deformation and primary recrystallization // *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 27. Article number 102193. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2021.102193](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102193).
- Fu Q., Sha Y.H., Zhang F., Esling C., Zuo L. Correlative effect of critical parameters for η recrystallization texture development in rolled $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ sheet: Modeling and experiment // *Acta Materialia*. 2019. Vol. 167. P. 167–180. DOI: [10.1016/j.actamat.2019.01.043](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.01.043).
- Li J.H., Gao X.X., Zhu J., Bao X.Q., Xia T., Zhang M.C. Ductility, texture and large magnetostriction of Fe–Ga-based sheets // *Scripta Materialia*. 2010. Vol. 63. № 2. P. 246–249. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2010.03.068](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.03.068).
- He Zhenghua, Liu Jiande, Zhu Xiaofei, Zhai Xinya, Sha Yuhui, Hao Hongbo, Chen Lijia. Secondary recrystallization of $\{310\}<001>$ texture and enhanced magnetostriction in Fe–Ga alloy thin sheet // *Journal of Material Research and Technology*. 2023. Vol. 22. P. 1868–1877. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.12.038](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.038).
- He Zhenghua, Zhai Xinya, Sha Yuhui, Zhu Xiaofei, Chen Sihao, Hao Hongbo, Chen Lijia, Li Feng, Zuo Liang. Secondary recrystallization of Goss texture in one-stage cold rolled Fe–Ga thin sheets via a large

- rolling reduction // *AIP Advances*. 2023. Vol. 13. № 2. Article number 025035. DOI: [10.1063/9.0000407](https://doi.org/10.1063/9.0000407).
14. Mehdi M., He Youliang, Hilinski E.J., Kestens L.A.I., Edrissy A. The evolution of cube ($\{001\}<100>$) texture in non-oriented electrical steel // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 185. P. 540–554. DOI: [10.1016/j.actamat.2019.12.024](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.024).
 15. Mehdi M., He Youliang, Hilinski E.J., Edrissy A. Effect of skin pass rolling reduction rate on the texture evolution of a non orientated electrical steel after inclined cold rolling // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 429. P. 148–160. DOI: [10.1016/j.jmmm.2017.01.020](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.01.020).
 16. Fang F., Lu X., Zhang Y.X., Wang Y., Jiao H.T., Cao G.M., Yuan G., Xu Y.B., Misra R.D.K., Wang G.D. Influence of cold rolling direction on texture, inhibitor and magnetic properties in strip-cast grain-oriented 3% silicon steel // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 424. P. 339–346. DOI: [10.1016/j.jmmm.2016.10.086](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.086).
 17. He Youliang, Hilinski E.J. Textures of non-oriented electrical steel sheets produced by skew cold rolling and annealing // *Metals (Basel)*. 2022. Vol. 12. № 1. Article number 17. DOI: [10.3390/met12010017](https://doi.org/10.3390/met12010017).
 18. Milyutin V.A., Gervasyeva I.V., Davidov D.I., Nikiforova S.M. Centrifugal Casting of Fe₈₂Ga₁₈ Alloy as a Tool of Mechanical Properties Improvement // *Metalurgical and Materials Transactions A*. 2021. Vol. 52. P. 3684–3688. DOI: [10.1007/s11661-021-06348-9](https://doi.org/10.1007/s11661-021-06348-9).
 19. Gervasyeva I.V., Khlebnikova Yu.V., Makarova M.V., Dolgikh D.V., Suaridze T.R. Crystallographic texture of tape substrates for HTSC from Cu-40%Ni alloy with additives of refractory elements // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 921. Article number 166156. DOI: [10.1016/j.jallcom.2022.166156](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166156).
 20. Harase J., Shimizu R., Takahashi N. Mechanism of Goss Secondary Recrystallization in Grain Orientated Silicon Steel // *Texture and Microstructures*. 1991. Vol. 14–18. P. 679–684.
- REFERENCES**
1. Golovin I.S., Palacheva V.V., Mohamed A.K., Balagurov A.M. Structure and properties of Fe–Ga alloys as promising materials for electronics. *The Physics of Metals and Metallography*, 2020, vol. 121, no. 9, pp. 851–893. DOI: [10.1134/S0031918X20090057](https://doi.org/10.1134/S0031918X20090057).
 2. Zhang Yiqun, Gou Junming, Yang Tianzi, Ke Yubin, Ma Tianyu. Non-Equilibrium Time-Temperature-Transformation Diagram for Enhancing Magnetostriction of Fe–Ga Alloys. *Acta Materialia*, 2022, vol. 244, article number 118548. DOI: [10.1016/j.actamat.2022.118548](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118548).
 3. Mohamed A.K., Palacheva V.V., Cheverikin V.V. et al. Low-temperature metastable-to-equilibrium phase transitions in Fe–Ga alloys. *Intermetallics*, 2022, vol. 145, article number 107540. DOI: [10.1016/j.intermet.2022.107540](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107540).
 4. Gou Junming, Ma Tianyu, Qiao Ruihua, Yang Tianzi, Liu Feng, Ren Xiaobing. Dynamic precipitation and the resultant magnetostriction enhancement in [001]-oriented Fe–Ga alloys. *Acta Materialia*, 2021, vol. 206, article number 116631. DOI: [10.1016/j.actamat.2021.116631](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116631).
 5. Na Suok-Min, Flatau A.B. Single grain growth and large magnetostriction in secondarily recrystallized Fe–Ga thin sheet with sharp Goss (011)[100] orientation. *Scripta Materialia*, 2012, vol. 66, no. 5, pp. 307–310. DOI: [10.1016/J.SCRIPTAMAT.2011.11.020](https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTAMAT.2011.11.020).
 6. Xing Q., Du Y., McQueeney R.J., Lograsso T.A. Structural investigations of Fe–Ga alloys: Phase relations and magnetostrictive behavior. *Acta Materialia*, 2008, vol. 56, no. 16, pp. 4536–4546. DOI: [10.1016/j.actamat.2008.05.011](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.05.011).
 7. Qi Qingli, Li Jiheng, Mu Xing, Ding Zhiyi, Bao Xiaoqian, Gao Xuexu. Microstructure evolution, magnetostrictive and mechanical properties of (Fe₈₃Ga₁₇)_{99.9}(NbC)_{0.1} alloy ultra-thin sheets. *Journal of Materials Science*, 2020, vol. 55, pp. 2226–2238. DOI: [10.1007/s10853-019-04057-8](https://doi.org/10.1007/s10853-019-04057-8).
 8. Milyutin V.A., Gervasyeva I.V., Shishkin D.A., Beaunon E. Structure and texture in rolled Fe₈₂Ga₁₈ and (Fe₈₂Ga₁₈)₉₉B₁ alloys after annealing under high magnetic field. *Physica B: Condensed Matter*, 2022, vol. 639, article number 413994. DOI: [10.1016/j.physb.2022.413994](https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413994).
 9. Milyutin V.A., Gervasyeva I.V. Formation of crystallographic texture in Fe–Ga alloys during various types of plastic deformation and primary recrystallization. *Materials Today Communications*, 2021, vol. 27, article number 102193. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2021.102193](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102193).
 10. Fu Q., Sha Y.H., Zhang F., Esling C., Zuo L. Correlative effect of critical parameters for η recrystallization texture development in rolled Fe₈₁Ga₁₉ sheet: Modeling and experiment. *Acta Materialia*, 2019, vol. 167, pp. 167–180. DOI: [10.1016/j.actamat.2019.01.043](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.01.043).
 11. Li J.H., Gao X.X., Zhu J., Bao X.Q., Xia T., Zhang M.C. Ductility, texture and large magnetostriction of Fe–Ga-based sheets. *Scripta Materialia*, 2010, vol. 63, no. 2, pp. 246–249. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2010.03.068](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.03.068).
 12. He Zhenghua, Liu Jiande, Zhu Xiaofei, Zhai Xinya, Sha Yuhui, Hao Hongbo, Chen Lijia. Secondary recrystallization of $\{310\}<001>$ texture and enhanced magnetostriction in Fe–Ga alloy thin sheet. *Journal of Material Research and Technology*, 2023, vol. 22, pp. 1868–1877. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.12.038](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.038).
 13. He Zhenghua, Zhai Xinya, Sha Yuhui, Zhu Xiaofei, Chen Sihao, Hao Hongbo, Chen Lijia, Li Feng, Zuo Liang. Secondary recrystallization of Goss texture in one-stage cold rolled Fe–Ga thin sheets via a large rolling reduction. *AIP Advances*, 2023, vol. 13, no. 2, article number 025035. DOI: [10.1063/9.0000407](https://doi.org/10.1063/9.0000407).
 14. Mehdi M., He Youliang, Hilinski E.J., Kestens L.A.I., Edrissy A. The evolution of cube ($\{001\}<100>$) texture in non-oriented electrical steel. *Acta Materialia*, 2020, vol. 185, pp. 540–554. DOI: [10.1016/j.actamat.2019.12.024](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.024).
 15. Mehdi M., He Youliang, Hilinski E.J., Edrissy A. Effect of skin pass rolling reduction rate on the texture evolution of a non orientated electrical steel after inclined cold rolling. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 429, pp. 148–160. DOI: [10.1016/j.jmmm.2017.01.020](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.01.020).

16. Fang F., Lu X., Zhang Y.X., Wang Y., Jiao H.T., Cao G.M., Yuan G., Xu Y.B., Misra R.D.K., Wang G.D. Influence of cold rolling direction on texture, inhibitor and magnetic properties in strip-cast grain-oriented 3% silicon steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 424, pp. 339–346. DOI: [10.1016/j.jmmm.2016.10.086](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.086).
17. He Youliang, Hilinski E.J. Textures of non-oriented electrical steel sheets produced by skew cold rolling and annealing. *Metals (Basel)*, 2022, vol. 12, no. 1, article number 17. DOI: [10.3390/met12010017](https://doi.org/10.3390/met12010017).
18. Milyutin V.A., Gervasyeva I.V., Davidov D.I., Nikiforova S.M. Centrifugal Casting of Fe₈₂Ga₁₈ Alloy as a Tool of Mechanical Properties Improvement. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2021, vol. 52, pp. 3684–3688. DOI: [10.1007/s11661-021-06348-9](https://doi.org/10.1007/s11661-021-06348-9).
19. Gervasyeva I.V., Khlebnikova Yu.V., Makarova M.V., Dolgikh D.V., Suaridze T.R. Crystallographic texture of tape substrates for HTSC from Cu-40%Ni alloy with additives of refractory elements. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 921, article number 166156. DOI: [10.1016/j.jallcom.2022.166156](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166156).
20. Harase J., Shimizu R., Takahashi N. Mechanism of Goss Secondary Recrystallization in Grain Orientated Silicon Steel. *Texture and Microstructures*, 1991, vol. 14-18, pp. 679–684.

Quantitative analysis of deformation texture and primary recrystallization after inclined rolling and annealing of the (Fe₈₃Ga₁₇)₉₉B₁ magnetostrictive alloy

© 2023

Ivan R. Strizhachenko*¹, engineerIrina V. Gervasyeva², Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), leading researcherVasily A. Milyutin³, PhD (Physics and Mathematics), senior researcherDenis I. Devyaterikov⁴, PhD (Physics and Mathematics), researcher

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg (Russia)

*E-mail: strizhachenko@imp.uran.ru¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5217-230X>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8928-1707>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5808-3959>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6909-7678>

Received 23.06.2023

Accepted 14.11.2023

Abstract: The Fe–Ga alloy is a promising magnetostrictive material thanks to of the optimal combination of functional properties and relatively low price due to the absence of rare-earth elements in the composition. To obtain the maximum magnetostriction in Fe–Ga polycrystals, it is necessary to create a crystallographic texture with a predominance of the <100> direction, since the tetragonal magnetostriction constant is the largest. Traditional methods of thermomechanical treatment do not lead to the formation of such a texture in a bcc alloy. In this paper, for the first time, the authors propose to use inclined rolling to increase the proportion of favorable texture components. Warm rolling with a deformation degree of 70 % was carried out at angles of 0, 30 and 90° to the direction of hot rolling. The deformation texture was examined using X-ray texture analysis and the texture and structure of the material after recrystallization was analyzed by electron backscatter diffraction (EBSD) on a scanning electron microscope. Quantitative texture analysis was carried out using the orientation distribution function (ODF) method using the ATEX software. The volume fraction of some texture components was calculated. The study shows that a significant change in the deformation textures and primary recrystallization occurs during rolling at an angle of 90°. The sample after such rolling contains the largest amount of the planar component {100}. The study identified a relationship between the texture of deformation and recrystallization in Fe–Ga: to increase the proportion of components with the <001> crystallographic direction during recrystallization, the presence of planar components {111} in the deformation texture is necessary, which is associated with the predominant growth of favorable components in the deformation matrix with such a texture.

Keywords: Fe–Ga alloy; (Fe₈₃Ga₁₇)₉₉B₁ alloy; texture quantitative analysis; inclined rolling; primary recrystallization; magnetostriction.

Acknowledgments: The work was supported by the grant of the President of the Russian Federation for young scientists – PhDs (No. MK-344.2022.4) and within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (code “Magnet”, No. 122021000034–9).

Electron microscopic studies were carried out at the Collaborative Access Center “Testing Center of Nanotechnology and Advanced Materials” of the M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of RAS (Yekaterinburg, Russia).

The paper was written on the reports of the participants of the XI International School of Physical Materials Science (SPM-2023), Togliatti, September 11–15, 2023.

For citation: Strizhachenko I.R., Gervasyeva I.V., Milyutin V.A., Devyaterikov D.I. Quantitative analysis of deformation texture and primary recrystallization during angular rolling and annealing of the (Fe₈₃Ga₁₇)₉₉B₁ magnetostrictive alloy. *Frontier Materials & Technologies*, 2023, no. 4, pp. 121–128. DOI: [10.18323/2782-4039-2023-4-66-11](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-4-66-11).