

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 669.1'782:539.25

ОЦЕНКА ТЕКСТУРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРЫ НА ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© 2020 г. И. В. Гервасьева^{a, *}, В. А. Милютин^a, Ф. В. Минеев^b, Ю. Ю. Бабушко^b

^aИнститут физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990 Россия

^bПАО Новолипецкий металлургический комбинат, пл. Металлургов, 2, Липецк, 398040 Россия

*e-mail: gervasy@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 15.01.2020 г.

После доработки 13.02.2020 г.

Принята к публикации 20.02.2020 г.

Изучена структура и текстура в рекристаллизованных листах изотропной электротехнической стали, прокатанной по разным режимам. Показано, что уменьшение степени деформации при окончательной прокатке приводит к увеличению отношения объемных долей ориентировок, благоприятных и неблагоприятных для формирования оптимальных магнитных свойств.

Ключевые слова: FeSi, прокатка, текстура, рекристаллизация, EBSD-анализ, электромобили

DOI: 10.31857/S0015323020070037

ВВЕДЕНИЕ

Изотропная электротехническая сталь (ИЭС) является магнитомягким материалом, который широко используется в электрических генераторах и моторах. В общем мировом производстве электротехнических сталей изотропная сталь занимает около 70% [1]. Приблизительно половина электрической энергии, производимой во всем мире, используется в моторах, поэтому необходимость снижения потерь энергии является экономически обоснованной и стимулирует исследования по улучшению качества материала. В последние годы в связи с увеличением производства различных видов электромобилей прогнозируется рост потребления премиальных марок высокочастотной ИЭС.

Магнитные свойства изотропной электротехнической стали в наибольшей степени контролируются двумя характеристиками структуры — конечной текстурой и конечным средним размером зерна. Зависимость свойств от кристаллографической текстуры обусловлена влиянием энергии магнитокристаллической анизотропии на величину магнитной проницаемости и потери на перемагничивание. В монокристаллах железа магнитная проницаемость является максимальной, а потери — минимальными, когда внешнее магнит-

ное поле направлено вдоль направлений $\langle 001 \rangle$ при прочих равных условиях. Изотропная электротехническая сталь используется в ситуации, когда магнитное поле прикладывается во всех направлениях в плоскости листа. Для такого случая идеальной текстурой была бы аксиальная $\{100\}$, в которой два направления $\langle 001 \rangle$ в каждом кристаллите параллельны поверхности. В настоящее время нет экономичного способа производства такой текстуры. Поэтому во всем мире используют “изотропную” “неориентированную” сталь с многокомпонентной текстурой, в которой магнитные свойства определяются как среднее между значениями в направлении прокатки и поперечном направлении. Разница в этих величинах должна быть не слишком велика, а абсолютные значения магнитной индукции по возможности более высокими. Европейский стандарт на производство тонкой электротехнической полосовой и листовой стали для применения на средних частотах регламентирует магнитные и механические свойства, качество поверхности, толщину изделий с ориентированным или неориентированным зерном, однако в нем ничего не говорится о кристаллографической текстуре в листе. Выбранная технология производства листа должна обеспечивать необходимые свойства за счет создания оптимальной структуры и кристаллографической текстуры.

На стадии отработки технологии необходимо знать закономерности формирования текстуры при прокатке и рекристаллизации для выбора необходимых режимов. В текстуре стремятся получить меньше компонент с плоскостью $\{111\}$ и больше госсовской ориентировки $\{110\}$ [2]. Очевидно, что и кубическая компонента также должна способствовать улучшению магнитных свойств. По мере увеличения размера зерна уменьшаются потери на гистерезис и увеличиваются потери энергии на вихревые токи. Считается, что оптимальным является средний размер зерна около 150 мкм [2].

Для электрических машин, работающих при высокой частоте (400–10000) Гц, из двух основных характеристик магнитных свойств – удельные магнитные потери и магнитная индукция – большее значение имеет первая [3, 4].

Удельные магнитные потери возрастают, главным образом, за счет потерь от вихревых токов, которые с увеличением частоты растут быстрее потерь от гистерезиса, поэтому для уменьшения потерь от вихревой составляющей необходимо уменьшать толщину листа стали [3, 5]. Также для этой цели полезно уменьшать средний размер зерна. Так, в работе [6] для листов толщиной 0.27 и 0.18 мм приводится оптимальное значение среднего размера зерна 90 мкм.

В настоящей работе с помощью метода EBSD исследована текстура и размер зерна в листах изотропной электротехнической стали для электромабилей, изготовленных с помощью однократной или двукратной прокатки. Определено соответствие между степенью благоприятности текстуры и текстурно-зависимыми магнитными свойствами.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на опытной плавке Новолипецкого металлургического комбината со следующим содержанием основных элементов: С ≤ 0.005%, Si 2.90–3.50%, Al около 1.0%, Fe-основа. После горячей прокатки, нормализации и травления в заводских условиях полосу подвергали однократной холодной прокатке на реверсивном стане через различное количество проходов до следующих значений толщины: 0.35; 0.30; 0.27; 0.25; 0.20 мм. Окончательный рекристаллизационный отжиг проводился при температуре 900–1050°C. Ленты стали толщиной 0.20 и 0.25 мм были получены кроме того методом двукратной прокатки с промежуточным отжигом при толщине 1.0 мм при 900°C и окончательным рекристаллизационным отжигом при 920–970°C.

Магнитные свойства измеряли в заводских условиях по стандартным методикам. Из разных

мест ленты после окончательного рекристаллизационного отжига были подготовлены полированные образцы для структурных исследований. Одновременный анализ структуры и ориентировок в рекристаллизованных образцах проводили методом обратного электронного рассеяния (EBSD) путем анализа картин Кикучи с помощью приставки фирмы EDAX в сканирующем электронном микроскопе “FEI Quanta 200”. По этим данным для каждого варианта обработки проводили аттестацию многокомпонентной текстуры изотропной электротехнической стали с помощью функций распределения ориентаций (ФРО) по методу Бунге [7], а также определяли объемную долю отдельных компонент текстуры с заданным рассеянием и средний размер зерна в стали.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены ориентационные карты для образцов, произведенных методом однократной прокатки и отжига. Текстура образцов после однократной прокатки до разной толщины и рекристаллизации в общих чертах одинакова и типична для текстуры рекристаллизации ОЦК-железкремнистых сплавов со средними степенями деформации. Она содержит примерно одни и те же ориентировки, среди которых ограничено аксиальную плоскостную ориентировку $\{111\}$, так называемую γ , и ориентировки с направлениями $\langle 001 \rangle$, относящиеся к аксиальной компоненте η . В качестве примера на рис. 2а приведено сечение пространства углов Эйлера при $\varphi_2 = 45^\circ$ для лент стали толщиной 0.30 мм, а на рис. 2б такое же сечение с отмеченным положением основных текстурных компонент.

Известно, что наиболее часто встречающиеся ориентировки в текстуре деформации и рекристаллизации ОЦК-металлов присутствуют на сечении ФРО при $\varphi_2 = 45^\circ$ (см. рис. 2). Среди этих характерных ориентировок можно выделить ограничено аксиальную компоненту $\langle 001 \rangle$, в пределах которой нормали к плоскостям зерен $\{111\}$ параллельны направлению нормали к плоскости прокатки (НН), и ограничено аксиальную компоненту $\langle 001 \rangle$, в которой соответствующие направления в зернах параллельны направлению прокатки (НП) в листе.

Эти компоненты иногда называют осевыми компонентами γ и α соответственно. Естественно, что благоприятно ориентированными зернами в листе изотропной стали после окончательной обработки являются зерна, в которых плоскости $\{100\}$ параллельны плоскости прокатки (верхняя сторона квадрата сечения пространства углов Эйлера, аксиальная компонента η) и плоскости $\{110\}$ параллельны плоскости прокатки (нижняя сторона квадрата сечения пространства углов Эйлера), так

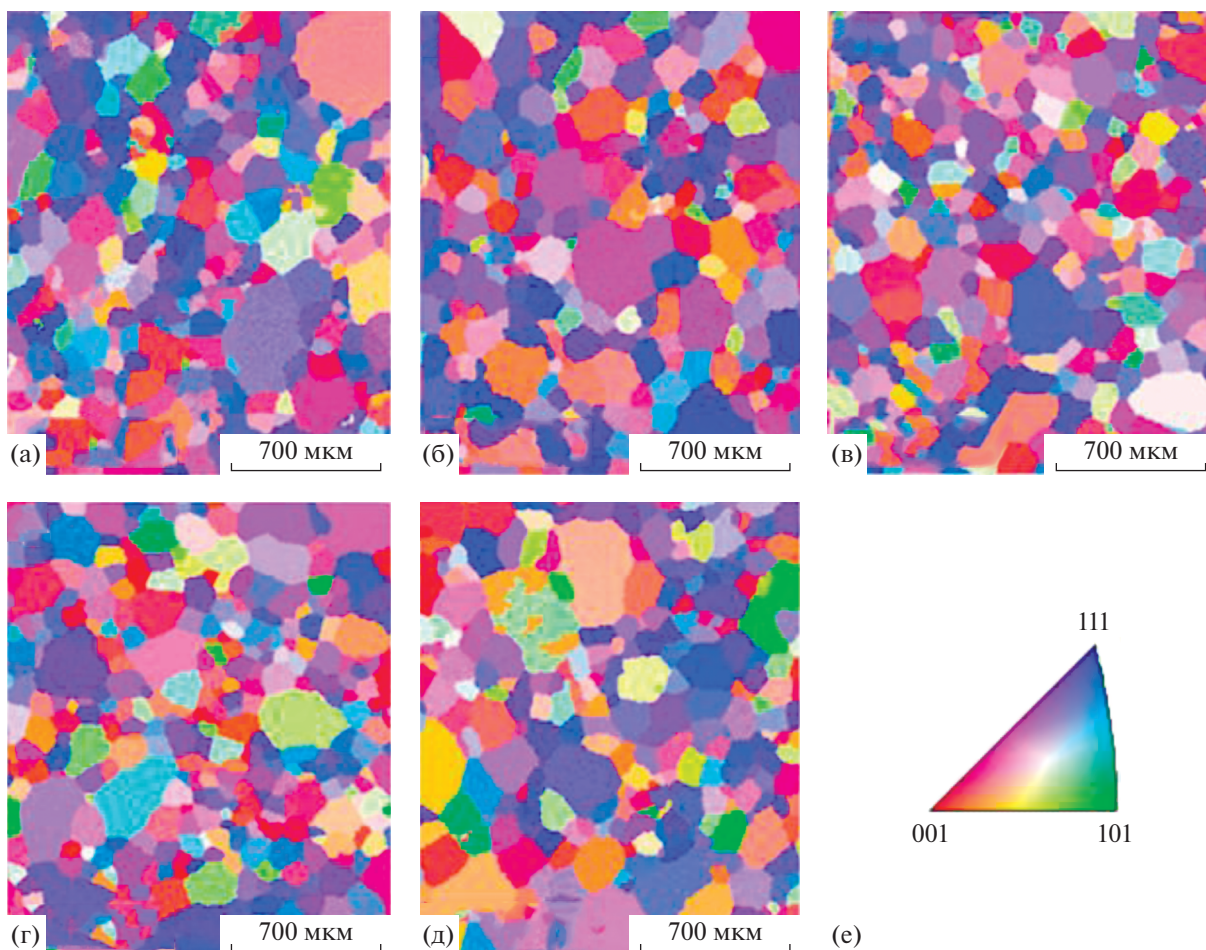


Рис. 1. Ориентационные EBSD-карты образцов после однократной прокатки и рекристаллизационного отжига, толщина ленты: 0.20 (а); 0.25 (б); 0.27 (в); 0.30 (г); 0.35 (д) мм и цветовая расшифровка ориентировок на стереографическом треугольнике (е).

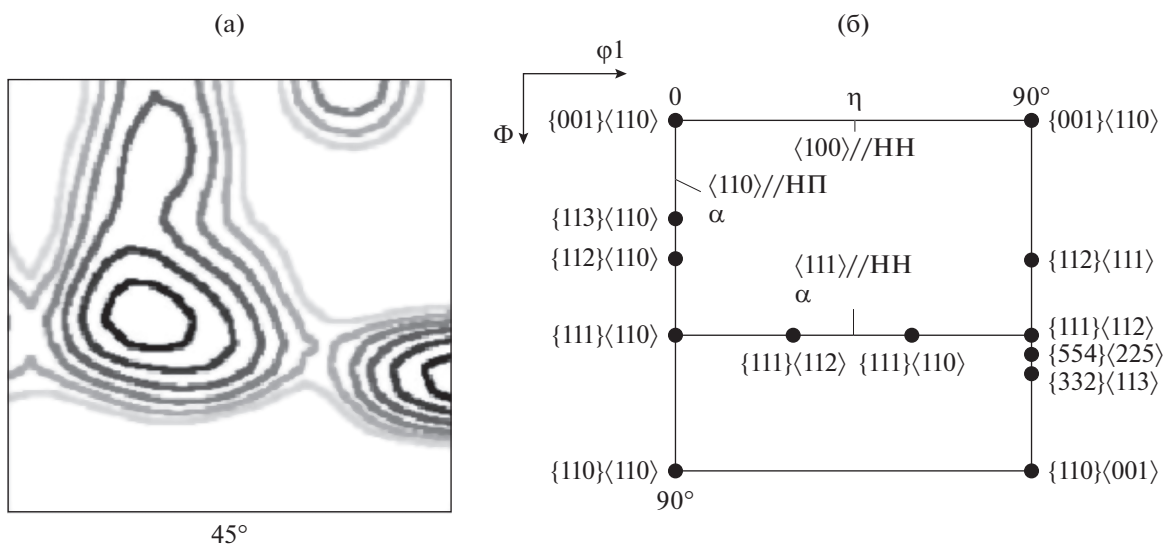


Рис. 2. Текстура рекристаллизации на сечении ФРО при $\phi_2 = 45^\circ$ после однократной прокатки (толщина 0.30 мм) (а) и положение идеальных компонент в этом сечении (б).

Таблица 1. Объемная доля благоприятных {100} и {110} и неблагоприятной {111} ориентировок (с рассеянием $\pm 15^\circ$) в текстуре рекристаллизованных образцов, предварительно деформированных по режиму однократной прокатки до разной конечной толщины, средний размер зерна и магнитные свойства

Толщина ленты, мм (ε, %)	Объемная доля {100}, %	Объемная доля {110}, %	Объемная доля {111}, %	Средний размер зерна, мкм	B_{2500} , Тл	B_{5000} , Тл	$P_{1.0/50}$, Вт/кг	$P_{1.5/50}$, Вт/кг	$P_{1.0/400}$, Вт/кг
0.20 (90.0)	13.9	2.4	37.7	91	1.53	1.62	1.16	2.61	13.2
0.25 (87.5)	15.1	2.5	36.8	103	1.55	1.64	—	2.50	14.4
0.27 (86.5)	16.5	3.4	33.2	93	1.55	1.63	1.16	2.58	15.1
0.30 (85.0)	14.6	4.1	33.0	95	1.55	1.64	1.12	2.53	15.8
0.35 (82.5)	16.3	5.9	30.4	100	1.55	1.64	—	2.59	17.8

как в зернах таких ориентировок присутствуют направления легкого намагничивания $\langle 001 \rangle$. Типичная же для текстуры рекристаллизации железокремнистого сплава плоскостная ориентировка {111} является самой неблагоприятной.

Несмотря на то, что на сечении ФРО текстура после всех вариантов обработки выглядит качественно однотипной, объемная доля отдельных текстурных компонент может существенно отличаться. В программе EBSD вычислена объемная доля благоприятных ориентировок {100} и {110}, содержащих направления легкого намагничивания, и объемная доля неблагоприятной ориентировки {111}, не содержащей таких направлений в пределах рассеяния $\pm 15^\circ$. В работе [8] было показано, что отношение суммы объемных долей первых двух компонент к объемной доле последней ориентировки может служить критерием благоприятности текстуры изотропной стали, определяющим ее магнитные свойства. В таблице 1 приведена объемная доля трех указанных текстурных компонент в рекристаллизованной стали, предварительно деформированной по режиму однократной прокатки на разную толщину, средний размер зерна в этих вариантах и магнитные свойства.

На рис. 3 показана зависимость отношения объемных долей благоприятных {100} + {110} и неблагоприятной {111} ориентировок в текстуре рекристаллизованных образцов, предварительно подвергнутых однократной прокатке, от конечной толщины ленты.

Ленты стали, полученные по режиму однократной прокатки с конечной толщиной 0.20 и 0.25 мм, не соответствуют по магнитным свойствам Европейскому стандарту. Видно, что отно-

шение благоприятных ориентировок к неблагоприятным в этих лентах очень невелико.

В работе [9] было показано, что, чем больше степень деформации при однократной прокатке, тем больше количество октаэдрической компоненты в текстуре первичной рекристаллизации. В связи с этим было предложено улучшить текстурированное состояние ленты за счет достижения конечной толщины методом двукратной прокатки. Сталь была прокатана после горячей прокатки до толщины 1.0 мм, отожжена при температуре 900°C и затем подвергнута второй холодной прокатке до 0.20 и 0.25 мм. Окончательный отжиг проводился при $920\text{--}970^\circ\text{C}$. Таким образом степень деформации при 2-ой холодной прокатке составила 80% для толщины 0.20 мм и 76% для

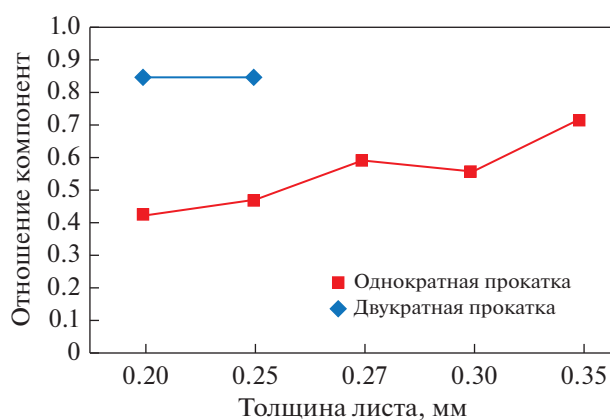


Рис. 3. Зависимость отношения суммы объемных долей благоприятных ориентировок {100} и {110} к объемной доле неблагоприятной ориентировки {111} в текстуре рекристаллизованных образцов, предварительно деформированных по режиму однократной и двукратной прокатки, от конечной толщины ленты.

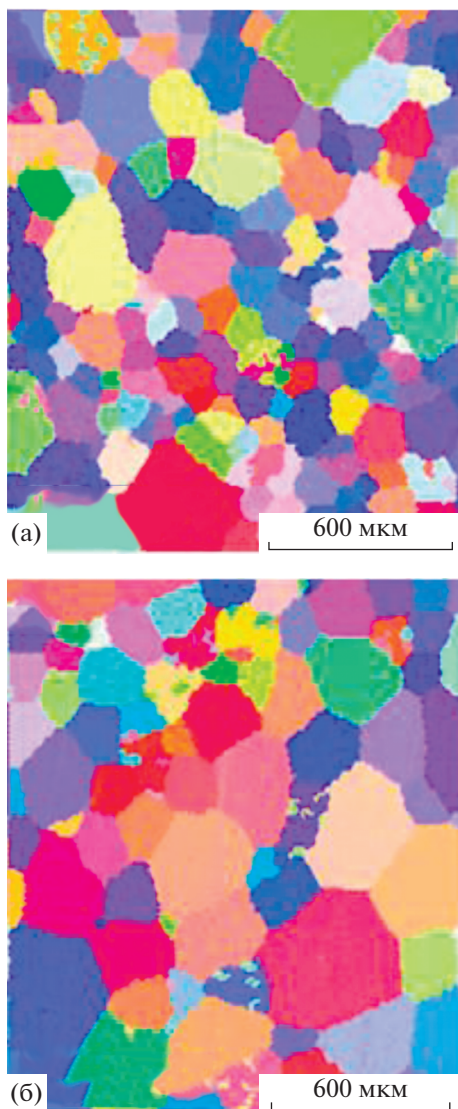


Рис. 4. Ориентационные EBSD карты стали после двукратной прокатки до толщины 0.20 (а) и 0.25 (б) мм и рекристаллизации.

толщины 0.25 мм. Это существенно изменило параметры структуры.

На рис. 4 приведены ориентационные EBSD карты стали после двукратной прокатки до толщины 0.20 и 0.25 мм и рекристаллизации, а на

рис. 5 – сечения ФРО после этой же обработки. Видно, что ленты после двукратной прокатки обладают более крупным размером рекристаллизованного зерна и заметно отличаются по составу текстуры. Даже на сечениях ФРО заметно наличие большей интенсивности ребровой компоненты $\{110\}\langle 001 \rangle$ – в правом нижнем углу сечения (см. также рис. 2б).

В табл. 2 представлены количественные характеристики основных текстурных компонент, размер зерна и магнитные свойства стали после двукратной прокатки и рекристаллизации.

Отношение суммы объемных долей благоприятных ориентировок $\{100\}$ и $\{110\}$ к объемной доле неблагоприятной $\{111\}$ показано на графике (рис. 3). Видно, что это отношение существенно больше, чем в образцах, подвергнутых однократной прокатке до той же толщины 0.20 и 0.25 мм, в основном за счет уменьшения объемной доли октаэдрической компоненты. Размер рекристаллизованного зерна после двукратной прокатки до этих толщин увеличивается до 106 и 148 мкм соответственно (по сравнению с 91 и 103 мкм в режиме однократной прокатки). При этом значение магнитной индукции B_{5000} для листа толщиной 0.20 мм увеличивается с 1.62 до 1.65 Тл, для листа 0.25 мм остается неизменным 1.64 Тл. Удельные потери $P_{1.0/400}$ снижаются для этих толщин, соответственно с 13.2 до 12.3 и с 14.4 до 12.9 Вт/кг.

Таким образом, изменение режима прокатки для листов толщиной 0.20 и 0.25 мм с однократной на двукратную, что выражается в уменьшении степени деформации при окончательной прокатке, приводит к увеличению объемных долей благоприятных для электротехнической стали ориентировок $\{100\}$ и $\{110\}$ и уменьшению объемной доли неблагоприятной ориентировки $\{111\}$. Величина среднего размера зерна в обоих случаях увеличивается. Значения магнитной индукции при напряженности магнитного поля 2500 и 5000 А/м увеличиваются или остаются такими же, а удельные потери при магнитной индукции 1.0 Тл и частоте 400 Гц снижаются на 7–11%.

Результаты анализа структуры и ориентировок по картинам Кикучи методом EBSD получены с

Таблица 2. Объемная доля благоприятных $\{100\}$ и $\{110\}$ и неблагоприятной $\{111\}$ ориентировок (с рассеянием $\pm 15^\circ$) в текстуре рекристаллизованных образцов, предварительно деформированных по режиму двукратной прокатки, средний размер зерна и магнитные свойства

Толщина ленты, мм (ε, %)	Объемная доля $\{100\}$, %	Объемная доля $\{110\}$, %	Объемная доля $\{111\}$, %	Средний размер зерна, мкм	B_{2500} , Тл	B_{5000} , Тл	$P_{1.5/50}$, Вт/кг	$P_{1.0/400}$, Вт/кг
0.20 (80)	13.1	11.1	28.0	106	1.56	1.65	2.29	12.3
0.25 (75)	17.6	5.6	26.8	148	1.55	1.64	2.04	12.9

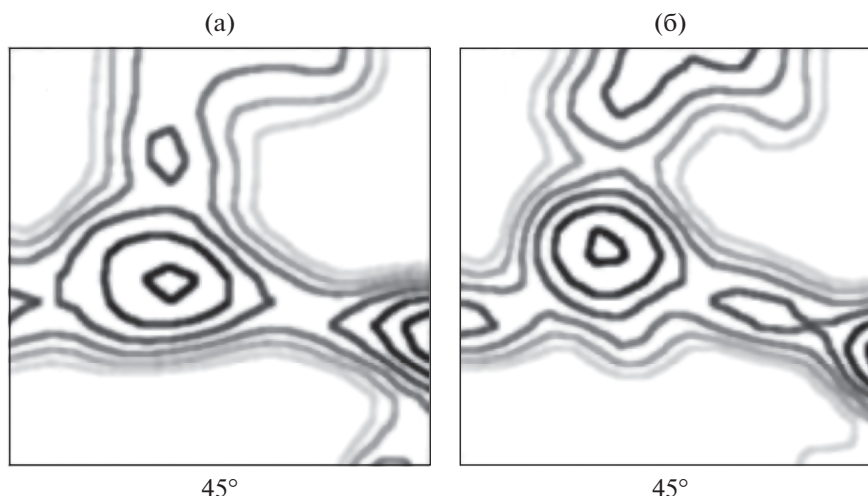


Рис. 5. Текстура рекристаллизации на сечении ФРО при $\varphi_2 = 45^\circ$ после двукратной прокатки: до толщины 0.20 (а) и 0.25 мм (б).

использованием оборудования Центра коллективного пользования ИФМ УрО РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема “Магнит”) Г.р. № АААА-А18-118020290129-5 при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН № 18-10-2-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wuppermann C.-D.* Steel in the 21 century / 2nd International Symposium “Magnetism and Metallurgy”, Germany, Freiberg, June 21–23, 2006.
2. *Landgraf F.J.G., Paolinelli S.C., Cunha M.A., de Campos M.F.* Texture optimization in Non-Oriented Electrical Steels: The Role of the Goss Texture Component // *Mat. Sci. For.* 2005. V. 495–497. P. 543–552.
3. *Миндлин Б.И., Настич В.П., Чеглов А.Е.* Изотропная электротехническая сталь. М. Интермет инжиниринг, 2006. 240 с.
4. *Komatsubara M.* Development of Electrical Steels for Higher Frequency Applications // The report at the 20th Annual Conference on Properties and Applications of Magnetic Materials. Chicago. 2001. P. 1–5.
5. *Oda Y., Okubo T., Takata M.* Recent Development of Non-Oriented Electrical Steel in JFE Steel // *JFE TECHNICAL REPORT*. № 21. 2016. P. 7–13.
6. *Чеглов А.Е., Барыбин В.А., Бахтин С.В., Ярошенко А.В., Альмов М.И., Юсупов В.С., Парахин В.И.* Разработка технологии производства электротехнических изотропных сталей для магнитных сердечников электромашин с высоким КПД // *Производство проката*. 2015. № 8. С. 3–6.
7. *Bunge H.J.* Texture Analysis in Materials Science. London: Butterworths. 1982. 592 p.
8. *Гервасьева И.В., Зимин В.А.* Текстуры и структурные преобразования в изотропной электротехнической стали // *ФММ*. 2009. Т. 108. № 5. С. 482–493.
9. *Гервасьева И.В.* Использование количественных характеристик текстуры для прогнозирования структурно-ориентационных преобразований при отжиге // *ФММ*. 2004. Т. 98. № 3. С. 80–89.