

ВЛИЯНИЕ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ ВОЗВРАТА В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В АМОРФНЫХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

© 2016

В.А. Милютин, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории микромагнетизма
Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

Ключевые слова: отжиг в магнитном поле; сплавы на основе железа; холоднокатаные сплавы; аморфный сплав; метод EBSD.

Аннотация: Настоящая статья посвящена изучению вопроса формирования структуры в процессе отжига под действием сильного магнитного поля в сплавах на основе железа. Подобные исследования приобрели значительную актуальность в последние годы, так как выяснение механизмов взаимодействия сильных магнитных полей с процессами, происходящими в твердых телах, представляет важность как с фундаментальной точки зрения, так и с практической. Несмотря на активность исследователей и наличие достаточного количества работ, данный вопрос по сей день остается открытым, а приводимые в научной литературе сведения и объяснения часто противоречат друг другу. В статье приведены экспериментальные данные, полученные в результате отжига образцов в условиях сильного постоянного магнитного поля 6, 10 и 20 Тл. В процессе отжига происходили процессы возврата деформированных холодной прокаткой сплавов Fe-3 % Si и Fe-50 % Ni. Исследованы структура, магнитные свойства и микротвердость. Установлено, что магнитное поле задерживает процессы возврата в кристаллических деформированных сплавах, а также способствует формированию в них зародышей с направлением легкого намагничивания. Это связывается в первую очередь с влиянием магнитного поля на движение дислокаций. Кроме того, проведена кристаллизация полученного закалкой на барабан аморфного сплава Fe₈₁Si₇B₁₂. В аморфных сплавах кристаллизация в условиях сильного магнитного поля приводит к увеличению размера образующихся зерен по сравнению с кристаллизацией без поля. Какого-либо влияния магнитного поля на текстуру сплавов, кристаллизованных из аморфного состояния, не выявлено.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле, прикладываемое в процессе термообработки металлических сплавов, как дополнительный фактор воздействия на формирование структуры, применяется достаточно давно. Существует ряд классических работ по обработке постоянным магнитным полем [1–4], в которых отмечается перспективность подобного воздействия на формирование структуры и свойств. Существенные результаты были получены В.Д. Садовским и М.А. Кривоглазом [5; 6] при изучении влияния сильного импульсного магнитного поля на мартенситное превращение. Обнаружено смещение точки начала мартенситного превращения в сторону повышения температур с ростом значения напряженности магнитного поля. Однако, если для мартенситного превращения достаточно воздействия импульсом длительностью 0,01 с, то для оценки влияния сильного магнитного поля на диффузионно-контролируемые процессы необходимо длительное непрерывное воздействие. Подобные установки по созданию сильных постоянных магнитных полей до 35 Тл и более с возможностью поддержания высоких температур внутри появились сравнительно недавно. Авторы [7] утверждают, что при обработке в полях такой величины можно ожидать уникальных явлений при формировании структуры. С появлением нового оборудования произошел всплеск активности исследователей [8–11]. На сегодняшний день появились работы, в которых обобщаются накопленные экспериментальные данные по влиянию сильного магнитного поля на протекание первичной рекристаллизации, фазовых превращений и кристаллизации из аморфного состояния [12–14]. В этих работах утверждается, что термическая обработка в сильном магнитном поле может быть действенным инструментом для получения

заданной структуры и свойств в промышленно важных материалах, в то же время отмечается необходимость дальнейших исследований вопроса. Очевидно, что на данной стадии развития исследований имеется много противоречивых результатов по влиянию внешнего магнитного поля на процессы, происходящие при отжиге различных материалов, а также в настоящее время нет общепризнанных представлений о механизмах и теоретическом объяснении такого влияния. Целью данной работы является получение новых данных для понимания механизмов взаимодействия сильного магнитного поля со структурой сплавов на основе железа в процессе ее эволюции.

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ

Отжиг в магнитном поле проводился в Гренобле (Франция) в Лаборатории сильных магнитных полей (LNCMI), которая входит в состав Европейской лаборатории магнитных полей (EMFL). Использовался резистивный магнит с внутренним диаметром 50 мм, позволяющий получать максимальное постоянное магнитное поле напряженностью 20 Тл. Внутрь вставлялся спиральный SiC-нагреватель длиной 200 мм. Образцы длиной 20 мм и шириной 5 мм, находящиеся в вакууме в запаянных ампулах, помещались в середину нагревательного элемента. Использовалось поле величиной 6, 10 и 20 Тл. Отжиг производился посадкой в печь на заданную температуру. Отжиг без поля проводился в тех же условиях. Охлаждение всех образцов происходило вне установки без приложения внешнего поля.

Исследование структуры и свойств отожженных образцов выполнялось в Институте физики металлов УрО РАН (Екатеринбург). Анализ структуры и ориентировок в отожженных образцах Fe-3 % Si и Fe-50 % Ni

проводили методом дифракции обратно отраженных электронов (EBSD). Шаг при сканировании составлял, в зависимости от обработки, от 1 до 4 мкм, увеличение 200 или 400.

Магнитные свойства определяли с помощью вибромагнитометра Lake Shore 7407, погрешность измерений – 1 %. Микротвердость исследовали с помощью микротвердомера ПМТ-3М. Измерения проводили с нагрузкой 0,69 или 0,98 Н с усреднением 15 измерений по всей площади образца, погрешность измерений составляла 2 %.

Исследование структуры кристаллизованных сплавов $Fe_{81}Si_7B_{12}$ проводилось методом EBSD с помощью сканирующего микроскопа высокого разрешения Carl Zeiss Auriga с предварительной пробоподготовкой методом ионного травления в Центре коллективного пользования Уральского федерального университета (Екатеринбург). Шаг при съемке составлял 2 или 3 нм. Съемка для каждого образца производилась несколько раз с различных участков. Методом секущих определен средний линейный размер зерна в каждом образце после отжига. Погрешность измерений составляла 10 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сплав Fe-3 % Si

Исходным материалом служили образцы электротехнической стали (технический сплав Fe-3 % Si с ОЦК-решеткой), взятой после холодной прокатки в заводских условиях до толщины 0,75 мм (66 %). Точка Кюри этого сплава составляет примерно 742 °С. Отжиг в магнитном поле напряженностью 10 и 20 Тл, а также без поля проводился при температуре 450 °С в течение 10 минут. Направление магнитного поля совпадало с направлением прокатки.

Температура 450 °С ниже температуры начала первичной рекристаллизации, а также ниже температуры Кюри, т. е. дорекристаллизационный отжиг проходил в ферромагнитном состоянии. Известно, что в структуре при этой температуре происходят процессы возврата. Низкотемпературный отжиг после холодной прокатки сплава со степенью деформации около 70 % приводит к освобождению ячеек от дислокаций, утонению стенок и началу роста одних ячеек за счет других.

Степень протекания процессов возврата можно оценить по величине значений микротвердости. Известно также, что в деформированном материале расшифровка картин Кикучи затруднена, и чем выше напряженное состояние материала, тем труднее оценить структуру методом EBSD. В программном обеспечении EBSD имеется специальная опция – «Image Quality» (IQ), показывающая степень расшифровки картин Кикучи в исследованном образце. На рис. 1 представлены картины качества линий Кикучи для образцов сплава Fe-3 % Si после отжига в магнитном поле различной величины. Видно, что с повышением величины прикладываемого поля площадь темных участков возрастает, что означает, что степень расшифровки линий Кикучи ухудшается. При этом на ориентационных картах практически не различимы отдельные участки структуры, что характерно для сильно деформированных материалов.

В таблице 1 приведены значения микротвердости. Величина микротвердости выше для образцов, отожженных в поле, а качество расшифровки картин Ки-

кучи ниже, что указывает на то, что приложение магнитного поля при отжиге деформированного сплава задерживает протекание процессов возврата.

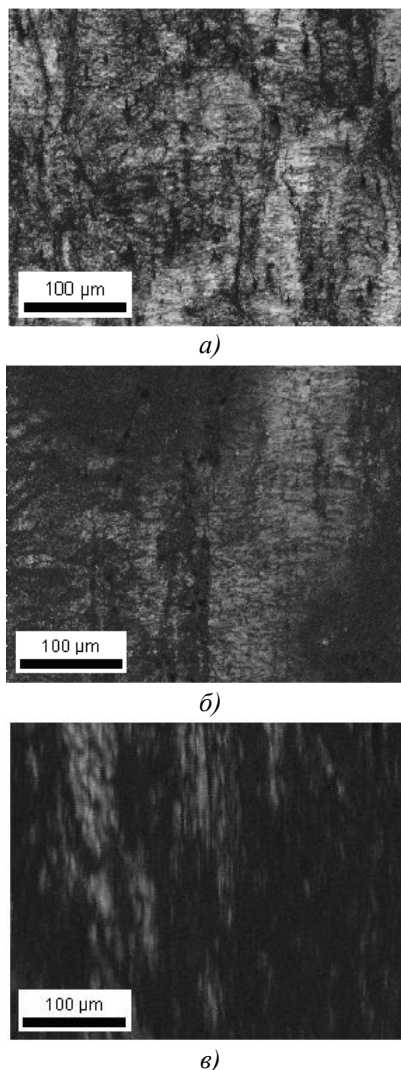


Рис. 1. Картины качества линий Кикучи в образцах сплава Fe-3 % Si после магнитного отжига при 450 °С, 10 минут: а) 0 Тл; б) 10 Тл; в) 20 Тл

Для всех обработанных образцов были построены полевые зависимости намагниченности. Как известно, намагниченность насыщения материала не меняется при изменении структуры и кристаллографической текстуры. Однако удалось установить различие в значениях величин магнитной индукции при промежуточных значениях намагничивающего поля, ниже насыщения. В качестве промежуточного было выбрано значение поля 192 кА/м. Величина намагниченности при этом значении поля приведена в табл. 1. Можно видеть, что процесс намагничивания происходит с большей скоростью для образцов, подвергнутых обработке в сильном магнитном поле. Для образцов, отожженных в магнитном поле 10 и 20 Тл, величины намагниченности в пределах ошибки одинаковы, в то время как для образца, отожженного без поля, величина намагниченности заметно ниже. Эти данные косвенно свидетельствуют о том, что образцы, отожженные в сильном магнитном

Таблица 1. Микротвердость ($H_{\mu}^{0,98}$) и магнитная индукция ($B_{192 \text{ кА/м}}$) в поле 192 кА/м в образцах сплава Fe-3 % Si после магнитного отжига при 450 °С, 10 минут

H=0 Тл		H=10 Тл		H=20 Тл	
$H_{\mu}^{0,98}$, МПа	$B_{192 \text{ кА/м}}$, Тл	$H_{\mu}^{0,98}$, МПа	$B_{192 \text{ кА/м}}$, Тл	$H_{\mu}^{0,98}$, МПа	$B_{192 \text{ кА/м}}$, Тл
2260	1,85	2500	1,93	2600	1,91

поле, содержат больше структурных областей с направлением легкого намагничивания $\langle 001 \rangle$.

Сплав Fe-50 % Ni

Лента из сплава Fe-50 % Ni была получена в результате прокатки на 99 % на лабораторном прокатном стане с полированными валками в ИФМ УрО РАН. Известно, что при рекристаллизации прокатанных лент из этого сплава с ГЦК-решеткой образуется острая однокомпонентная кубическая текстура. Направлением легкого намагничивания в сплаве Fe-50 % Ni является ребро куба $\langle 001 \rangle$, точка Кюри сплава – 500 °С, температура начала рекристаллизации около 550 °С.

Отжиг в магнитном поле 10 и 20 Тл, а также без поля проводили при температуре 490 °С с выдержкой 15 минут. При этой температуре сплав находился в ферромагнитном состоянии и еще не претерпевал рекристаллизационного превращения. Кроме того, образцы, подвергнутые дорекристаллизационному отжигу при 490 °С в поле и без поля, отжигались затем в лабораторной вакуумной печи без магнитного поля в Институте физики металлов при температуре 600 °С 30 минут.

При анализе структуры и свойств образцов, отоженных при 490 °С, использовались те же методы, что и для сплава Fe-3 % Si, нагрузка на микротвердомере составляла 0,69 Н. Качество расшифровки картин Кикучи уменьшается с повышением напряженности поля (рис. 2).

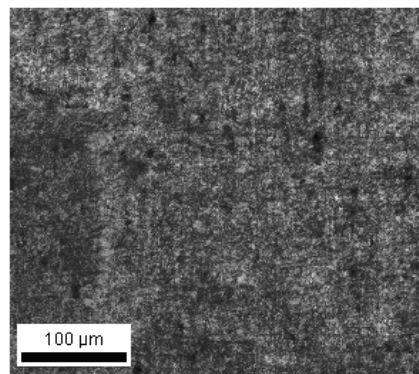
Величина микротвердости после отжига в поле 20 Тл заметно выше, чем после отжига без поля, – 2509 и 2192 МПа соответственно.

Таким образом, так же как и в сплаве Fe-3 % Si, косвенными методами показана тенденция замедления процессов разупрочнения материала при отжиге в магнитном поле. Причиной этого явления можно считать торможение движения дислокаций магнитным полем в ферромагнитном материале, что более подробно обсуждается в работе [15], а также замедление диффузии в магнитном поле [16; 17].

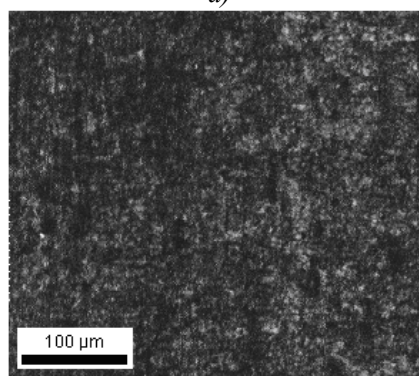
Для образцов Fe-50 % Ni после дорекристаллизационного отжига были построены полевые зависимости намагниченности. Так же как и в сплаве Fe-3 % Si, обнаружено повышение значений намагниченности в полях до насыщения, что может свидетельствовать о преимущественном формировании в процессе магнитного отжига структурных областей с направлением легкого намагничивания по сравнению с отжигом без поля. Для того чтобы проверить такое предположение, был проведен последующий рекристаллизационный отжиг этих образцов при 600 °С в течение 30 минут без приложения магнитного поля.

Оказалось, что кубическая текстура более полно реализуется в образце, предварительно отоженном в магнитном поле. Объемная доля ориентировки $\{100\} \langle 001 \rangle (\pm 10^\circ)$ составляет 90,7 % и 94,1 % для предварительного отжига в поле 0 и 20 Тл соответственно. Это происходит, вероятно, потому, что в образце, под-

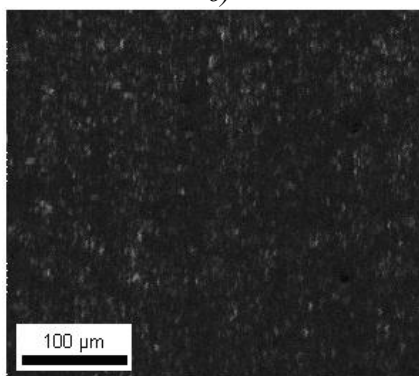
вергнутом дорекристаллизационному отжигу в магнитном поле, больше субзерен с кубической ориентировкой, способных к дальнейшему росту при температуре рекристаллизации.



а)



б)



в)

Рис. 2. Картины качества линий Кикучи в образцах сплава Fe-50 % Ni после магнитного отжига при 490 °С, 15 минут: а) 0 Тл; б) 10 Тл; в) 20 Тл

Кристаллизация аморфного сплава $Fe_{81}Si_7B_{12}$

Сплавы на основе соединения FeSiB широко используются в промышленности в качестве магнитомягких материалов, имеют низкую коэрцитивную силу

и высокую намагнитченность насыщения. В научной литературе имеются работы по отжигу подобных сплавов в магнитных полях различной величины [18–20].

Аморфная лента из сплава $Fe_{81}Si_7B_{12}$ толщиной 25 мкм и шириной 2,5 мм была получена путем закалки на барабан в Институте физики металлов УрО РАН. Отжиг в магнитном поле производился посадкой в печь на температуру 580 °С с выдержкой 30 минут. При данной температуре происходит выделение кристаллической фазы α -Fe(Si) из аморфной матрицы. Величина поля составляла 6 и 20 Тл, аналогичные отжики проводились без приложения магнитного поля. Структура кристаллизованных образцов представлена на рис. 3. Средний размер зерен составил 198, 169 и 174 нм для образцов, отожженных в поле 20 Тл, 6 Тл и без поля, соответственно.

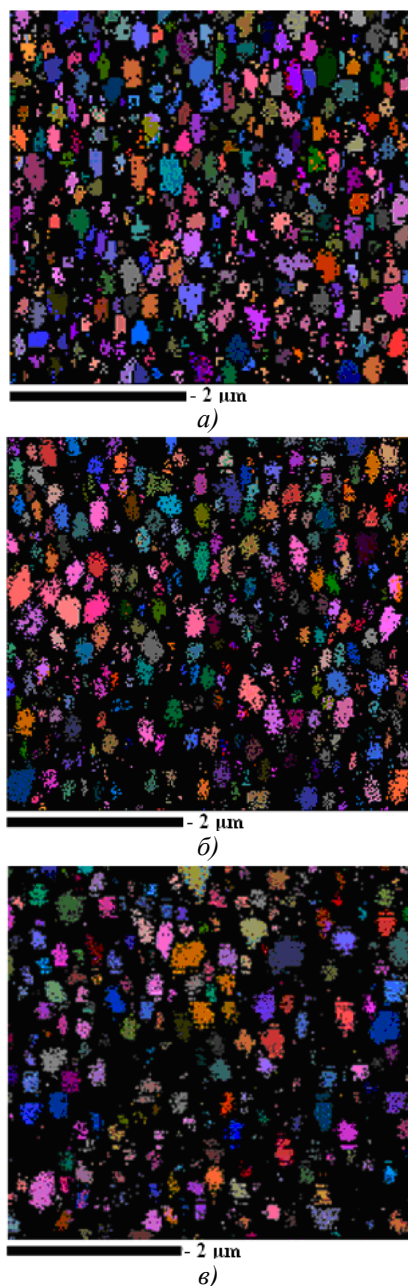


Рис. 3. Ориентационные карты образцов, отожженных при 580 °С в течение 30 минут: а) без поля; б) в поле 6 Тл; в) в поле 20 Тл

Расчет объемной доли компонент $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$ и $\{112\}$ с рассеянием $\pm 10^\circ$ в плоскости образцов, подвергнутых отжигу, не показал преимуществ какой-либо одной из них при воздействии магнитного поля. На рис. 3 представлены ориентационные карты кристаллизованных образцов.

В работе [19] показано, что приложение магнитного поля напряженностью менее 6 Тл вдоль направления ленты в процессе кристаллизующего отжига сплава $Fe_{78}Si_9B_{13}$ не оказывает какого-либо влияния на структуру сплава. В настоящей работе показано увеличение среднего размера зерна при кристаллизующем отжиге в магнитном поле 20 Тл, однако авторы [20] обнаружили смещение температуры начала кристаллизации фазы α -Fe(Si) в сторону увеличения температур в присутствии сильного магнитного поля для сплава Fe-Si-B. Этот факт может указывать на то, что увеличение размера зерна при отжиге в магнитном поле в нашей работе связано с процессами роста зерен, а не их зарождения. Для однозначного определения механизма взаимодействия сильного магнитного поля с процессами структурообразования при кристаллизующем отжиге аморфных сплавов планируется проведение дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ

В работе показано, что сильное постоянное магнитное поле, прикладываемое в процессе отжига ферромагнитных сплавов Fe-3 % Si и Fe-50 % Ni, при температурах до начала рекристаллизации замедляет процессы возврата, а также способствует формированию структурных областей с направлением легкого намагничивания.

При данных условиях эксперимента процесс кристаллизации аморфного сплава $Fe_{81}Si_7B_{12}$ ускоряется при приложении магнитного поля 20 Тл, образования какой-либо преимущественной ориентировки при этом не выявлено.

Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук И.В. Гервасьевой и профессору LNCMI-CNRS Э. Бинону.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Магнит», № 01201463328) при частичной поддержке УрО РАН (проект № 15-9-2-33).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Smolukowski R., Turner R. Influence of magnetic field on recrystallization // Journal of Applied Physics. 1949. Vol. 20. № 8. P. 745–746.
- Граник Г.И., Берштейн М.Л. О влиянии магнитного поля на текстуру рекристаллизации железа // Физика металлов и металловедение. 1966. Т. 21. № 1. С. 837–841.
- Martikeinen H.O., Lindroos V.K. Observations on the effect of magnetic field on the recrystallization in ferrite // Scandinavian Journal of Metallurgy. 1981. Vol. 10. № 1. P. 3–8.
- Watanabe T., Suzuki Y., Tani S., Ikawa H. The effects of magnetic annealing on recrystallization and grain boundary character distribution (GBCD) in iron-cobalt alloy polycrystals // Philosophical magazine letters. 1990. Vol. 62. № 1. P. 19–17.

5. Садовский В.Д. Магнитное поле и фазовые превращения в стали // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1965. № 7. С. 16–18.
6. Кривоглаз М.А., Садовский В.Д., Смирнов Л.В., Фокина Е.А. Закалка стали в магнитном поле. М.: Наука, 1977. 119 с.
7. Liu K.M., Lu D.P., Zhou H.N., Wen S.F., Wei S.Y., Hu Q., Wan Z.Z. Microstructure and properties of Cu-17Fe alloy aged treatment in high magnetic field // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 194-196. P. 1270–1274.
8. Bennett T.A., Jaramillo R.A., Laughlin D.E., Wilgen J.B., Kisner R., Mackiewicz-Ludtka G., Ludtka G.M., Kalu P.N., Rollett A.D. Texture evolution In Fe-1%Si as a function of high magnetic field // *Solid State Phenomena*. 2005. Vol. 105. P. 151–156.
9. Masahashi N., Matsuo M., Watanabe K. Development of preferred orientation in annealing of Fe–3.25% Si in high magnetic field // *Journal of Materials Research*. 1998. Vol. 13. № 2. P. 457–461.
10. Kim B., Park S., Kim S. The effect of magnetic field annealing on the texture of 2nd recrystallization for a deformed Fe-3.2%Si steel sheet // *Metals and materials*. 2004. Vol. 10. № 6. P. 559–565.
11. Bacaltchuk C.M.B., Castello-Blanco G.A., Garmestani H. Magnetic field effect on the microstructure of low silicon steel // *Proc. 14th Int. Conf. on Textures of Materials (Leuven)*. Switzerland, 2005. P. 1165–1170.
12. Watanabe T., Tsurekawa S., Zhao X., Zuo L., Esling C. A new challenge: grain boundary engineering for advanced materials by magnetic field application // *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41. № 23. P. 7747–7759.
13. Zhang Y., Esling C., Zhao X., Zuo L. Application of a high magnetic field during thermo-treatment of metallic materials as a potential means for microstructure modification // *Materials Science Forum*. 2010. Vol. 638-642. P. 202–207.
14. Rivoirard S. High steady magnetic field processing of functional magnetic materials // *JOM*. 2013. Vol. 65. № 7. P. 901–909.
15. Gervasyeva I.V., Beaunon E., Milyutin V.A., Volkova E.G., Rodionov D.P., Khlebnikova Y.V., Shishkin D.A. Formation of structure and crystallographic texture in Fe-50%Ni thin tapes under high magnetic field annealing // *Physica B: Condensed Matter*. 2015. Vol. 468-469. P. 66–71.
16. Мазанко В.Ф., Покоев А.В., Миронов В.М. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций. Т. 1. М.: Машиностроение, 2006. 346 с.
17. Покоев А.В., Степанов Д.И. Диффузионная магнитная аномалия никеля в монокристаллическом кремнистом железе // *Письма в Журнал технической физики*. 1996. Т. 22. № 6. С. 28–32.
18. Wolfus Y., Yeshurun Y., Felner I. Crystallization kinetics in amorphous ferromagnets. Effect of temperature and magnetic field // *Philosophical Magazine B*. 1987. Vol. 56. № 6. P. 963–968.
19. Fujii H., Tsurekawa S., Matsuzaki T., Watanabe T. Evolution of a sharp {110} texture in microcrystalline Fe₇₈Si₉B₁₃ during magnetic crystallization from the amorphous phase // *Philosophical magazine letters*. 2006. Vol. 86. № 2. P. 113–122.
20. Onodera R., Kimura S., Watanabe K., Lee S., Yokoyama Y., Makino A., Koyama K. Magnetic field effects on crystallization of iron-based amorphous alloys // *Materials Transactions*. 2013. Vol. 54. № 2. P. 188–191.

REFERENCES

1. Smolukowski R., Turner R. Influence of magnetic field on recrystallization. *Journal of Applied Physics*, 1949, vol. 20, no. 8, pp. 745–746.
2. Granik G.I., Bershteyn M.L. On the influence of magnetic field on the recrystallization texture of iron. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1966, vol. 21, no. 1, pp. 837–841.
3. Martikeinen H.O., Lindroos V.K. Observations on the effect of magnetic field on the recrystallization in ferrite. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 1981, vol. 10, no. 1, pp. 3–8.
4. Watanabe T., Suzuki Y., Tani S., Ikawa H. The effects of magnetic annealing on recrystallization and grain boundary character distribution (GBCD) in iron-cobalt alloy polycrystals. *Philosophical magazine letters*, 1990, vol. 62, no. 1, pp. 19–17.
5. Sadovsky V.D. Magnetic field and crystalline transformations in steel. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1965, no. 7, pp. 16–18.
6. Krivoglaz M.A., Sadovsky V.D., Smirnov L.V., Fokina E.A. *Zakalka stali v magnitnom pole* [Quenching of steel in magnetic field]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 119 p.
7. Liu K.M., Lu D.P., Zhou H.N., Wen S.F., Wei S.Y., Hu Q., Wan Z.Z. Microstructure and properties of Cu-17Fe alloy aged treatment in high magnetic field. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 194-196, pp. 1270–1274.
8. Bennett T.A., Jaramillo R.A., Laughlin D.E., Wilgen J.B., Kisner R., Mackiewicz-Ludtka G., Ludtka G.M., Kalu P.N., Rollett A.D. Texture evolution In Fe-1%Si as a function of high magnetic field. *Solid State Phenomena*, 2005, vol. 105, pp. 151–156.
9. Masahashi N., Matsuo M., Watanabe K. Development of preferred orientation in annealing of Fe–3.25% Si in high magnetic field. *Journal of Materials Research*, 1998, vol. 13, no. 2, pp. 457–461.
10. Kim B., Park S., Kim S. The effect of magnetic field annealing on the texture of 2nd recrystallization for a deformed Fe-3.2%Si steel sheet. *Metals and materials*, 2004, vol. 10, no. 6, pp. 559–565.
11. Bacaltchuk C.M.B., Castello-Blanco G.A., Garmestani H. Magnetic field effect on the microstructure of low silicon steel. *Proc. 14th Int. Conf. on Textures of Materials (Leuven)*. Switzerland, 2005, pp. 1165–1170.
12. Watanabe T., Tsurekawa S., Zhao X., Zuo L., Esling C. A new challenge: grain boundary engineering for advanced materials by magnetic field application. *Journal of Materials Science*, 2006, vol. 41, no. 23, pp. 7747–7759.
13. Zhang Y., Esling C., Zhao X., Zuo L. Application of a high magnetic field during thermo-treatment of metallic materials as a potential means for microstructure modification. *Materials Science Forum*, 2010, vol. 638-642, pp. 202–207.

14. Rivoirard S. High steady magnetic field processing of functional magnetic materials. *JOM*, 2013, vol. 65, no. 7, pp. 901–909.
15. Gervasyeva I.V., Beaunon E., Milyutin V.A., Volkova E.G., Rodionov D.P., Khlebnikova Y.V., Shishkin D.A. Formation of structure and crystallographic texture in Fe-50%Ni thin tapes under high magnetic field annealing. *Physica B: Condensed Matter*, 2015, vol. 468–469, pp. 66–71.
16. Mazanko V.F., Pokoev A.V., Mironov V.M. *Diffuzionnye protsessy v metallakh pod deystviem magnitnykh poley i impulsnykh deformatsiy* [Diffusive processes in metals affected by the magnetic fields and pulse deformations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. Vol. 1, 346 p.
17. Pokoev A.V., Stepanov D.I. Diffusive magnetic anomaly of nickel in monocrystalline silicon iron. *Pisma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1996, vol. 22, no. 6, pp. 28–32.
18. Wolfus Y., Yeshurun Y., Felner I. Crystallization kinetics in amorphous ferromagnets. Effect of temperature and magnetic field. *Philosophical Magazine B*, 1987, vol. 56, no. 6, pp. 963–968.
19. Fujii H., Tsunekawa S., Matsuzaki T., Watanabe T. Evolution of a sharp {110} texture in microcrystalline Fe₇₈Si₉B₁₃ during magnetic crystallization from the amorphous phase. *Philosophical magazine letters*, 2006, vol. 86, no. 2, pp. 113–122.
20. Onodera R., Kimura S., Watanabe K., Lee S., Yokoyama Y., Makino A., Koyama K. Magnetic field effects on crystallization of iron-based amorphous alloys. *Materials Transactions*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 188–191.

THE INFLUENCE OF STRONG MAGNETIC FIELD ON THE PROCESSES OF RECOVERY IN CRYSTALLINE IRON-BASE ALLOYS AND CRYSTALLIZATION IN AMORPHOUS IRON-BASE ALLOYS

© 2016

V.A. *Milyutin*, postgraduate student, junior researcher of laboratory of micromagnetism
Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg (Russia)

Keywords: magnetic annealing; iron-base alloys; cold-rolled alloys; amorphous alloy; EBSD method.

Abstract: The paper covers the study of the issue of the structure forming in the process of annealing affected by the strong magnetic field in the iron-base alloys. Such surveys became rather significant in recent years, as the specifying of mechanisms of strong magnetic fields interaction with the processes taking place in solid bodies is very topical from both the fundamental and the practical points of view. Despite the activity of the researchers and the availability of a number of works, this issue remains open to the present time, and the information and the explanation given in scientific literature contradict one another very often. The paper gives experimental data obtained in the result of specimens annealing under the conditions of the strong constant magnetic field of 6, 10 and 20 T. During the annealing, the processes of recovery of cold-rolled deformed Fe-3 % Si and Fe-50 % Ni alloys. The authors studied the structure, the magnetic properties, and the microhardness and determined that the magnetic field delays the recovery processes in the crystalline deformed alloys and causes the formation of nucleuses with the easy direction of magnetization. It is associated first with the magnetic field influence on the motion of dislocations. Moreover, the authors carried out the crystallization of Fe₈₁Si₇B₁₂ amorphous alloy produced by quenching on the drum. In amorphous alloys, the crystallization in the conditions of strong magnetic field causes the increase in the produced grain size in comparison with the crystallization without the field. The authors have not determined any magnetic field influence on the alloys texture crystallized from amorphous state.