

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЖЕЛЕЗА НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ АМОРФНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Co-Fe-B-Nb

© 2019

Н.А. Волков, аспирант, младший научный сотрудник

Г.Е. Абросимова, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник
Институт физики твердого тела Российской академии наук, Черноголовка (Россия)

Ключевые слова: аморфные сплавы; нанокристаллические сплавы; структура нанокристаллических сплавов; кристаллизация аморфных сплавов; рентгеноструктурный анализ.

Аннотация: В современном мире происходит постоянное совершенствование технических приспособлений, для создания которых требуются материалы с лучшими функциональными свойствами. Одними из таких материалов являются аморфные и нанокристаллические сплавы на основе железа и кобальта. Благодаря высоким магнитным характеристикам они хорошо зарекомендовали себя в областях радио- и микроэлектроники. Также известно, что путем формирования в таких сплавах частично-кристаллической структуры эти свойства можно улучшить. Однако стандартным способом изотермического отжига такую структуру сформировать не всегда удастся, поэтому для замедления процесса кристаллизации в состав сплавов добавляют легирующие компоненты. Различное содержание внесенных компонентов влияет также на последовательность фазовых превращений при кристаллизации, а так как большинство свойств является структурно-зависимыми, то формирующаяся структура определяет и характеристики материала. Поэтому установление зависимости образующейся структуры в аморфных сплавах после термообработки является важной задачей физики конденсированного состояния.

Методом рентгенографии изучена кристаллизация аморфных сплавов системы Co-Fe-B-Nb. Кристаллизация образцов проводилась с помощью изотермических отжигов сплавов с разным содержанием компонентов при одинаковых условиях. Установлена зависимость образующейся структуры от содержания легирующего компонента. Показано, что образующаяся структура существенно зависит от концентрации железа. При содержании железа 10 ат. % и 16 ат. % структура состоит из нанокристаллов кубического кобальта и твердого раствора железа в кобальте. При уменьшении концентрации до 5 ат. % механизм кристаллизации изменяется: кристаллизация начинается с выделения кристаллов борида Co_{23}B_6 . Обсуждаются причины влияния концентрации железа в составе сплава на кристаллизацию.

ВВЕДЕНИЕ

С постоянным развитием технологий возрастает спрос на материалы с высокими функциональными свойствами. Для бурно развивающейся в наше время микроэлектроники такими материалами являются аморфные сплавы на основе железа и кобальта, обладающие магнитно-мягкими свойствами [1; 2]. Для получения материалов с желаемым комплексом магнитных свойств подбираются специальные составы. В качестве основы используется один из базовых сплавов на основе железа, кобальта или никеля, в котором есть аморфизаторы (как правило, кремний и бор), а также легирующие компоненты. В случае кобальтовых сплавов основой является система Co-Si-B. Известно, что аморфные сплавы этой системы обладают рядом хороших магнитных свойств, которые могут быть улучшены при формировании в них частично-кристаллической структуры [3–5]. В тройной системе нанокристаллическая структура не образуется, поэтому для формирования нанокристаллов вводят компоненты, способствующие повышению скорости зарождения кристаллов и уменьшению скорости их роста. В таком многокомпонентном аморфном сплаве с помощью разного рода внешних воздействий (термообработка, прокатка, облучение и др.) можно сформировать структуру, состоящую из аморфной матрицы и хаотично расположенных кристаллов. Как уже отмечено, в тройном сплаве типа Co-Si-B получить такую структуру путем простой термообработки не удастся, поэтому в сплав добавляются дополнительные легирующие компоненты с малым коэффициентом диффузии, которые позволяют замедлить

процесс диффузии и роста образующихся кристаллов. С одной стороны, добавление легирующего компонента способствует образованию наноструктуры, но, с другой стороны, эти компоненты могут значительно повлиять на свойства материалов, ухудшив их. Введение легирующего компонента может существенно менять свойства материала.

Исследованию структуры и свойств нанокристаллических материалов этого типа посвящено много работ. Например, на начальной стадии кристаллизации аморфных сплавов на основе Fe-Si-B выделяются кристаллы твердого раствора кремния в железе $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ со структурой D0_3 , равномерно распределенные в аморфной матрице [6]. Добавление к базовому составу меди и ниобия приводит к ухудшению магнитных свойств. В ряде работ исследовалось влияние легирования разными компонентами на структуру и свойства этих сплавов [6; 7]. Добавление кобальта (частичная замена железа на кобальт) приводит к улучшению высокочастотных свойств и температуры Кюри [8; 9], частичная замена железа на марганец способствует заметному повышению температуры кристаллизации и замедляет этот процесс [10; 11]. Замещение железа никелем также приводит к небольшому изменению стабильности аморфной фазы и, что более существенно, к увеличению среднего размера кристаллов [12; 13]. Согласно исследованиям [14], уменьшение размера нанокристаллов и улучшение магнитных свойств наблюдаются при замене атомов железа на другие компоненты в последовательности $\text{Nb}=\text{Ta} > \text{Mo}=\text{W} > \text{V} > \text{Cr}$. Изучалось влияние замены или изменения концентрации других компонентов

сплава. Частичное замещение ниобия титаном способствует расширению температурной области существования фазы α -Fe(Si), увеличению намагниченности и уменьшению коэрцитивной силы [15], при частичной замене ниобия вольфрамом или молибденом размер нанокристаллов увеличивается [16]. Частичная замена меди на золото облегчает зарождение α -Fe(Si) фазы, уменьшая энергию активации ее кристаллизации [17], а частичная замена бора на германий приводит к увеличению доли нанокристаллической фазы [18], что способствует улучшению магнитных свойств.

Известно значительное количество работ [19–21], посвященных изучению влияния легирующего компонента на свойства материала, в то же время исследований изменения структуры при легировании разными компонентами сравнительно мало. К примеру, в работе [22] отмечалось, что добавление в состав сплава даже 1 ат. % легирующего компонента может привести к изменению процесса кристаллизации, и появится возможность наблюдать фазу, не соответствующую фазовой диаграмме данной системы. В случае сплавов на основе кобальта с железом такой фазой является фаза с ОЦК структурой, которую раньше не наблюдали при малых концентрациях железа. Существуют различные мнения о том, какова же структура наблюдаемой фазы. В работе [20] обсуждался вопрос, имеют ли выделяющиеся нанокристаллы ОЦК решетку (пространственная группа $Im\bar{3}m$) или представляют собой выделения фазы со структурой B2 (примитивная кубическая решетка пространственной группы $Pm\bar{3}m$). Проблема при решении этого вопроса связана с близкими значениями рассеивающей способности атомов железа и кобальта, что сильно затрудняет возможность различить эти фазы.

Было высказано предположение, что основанием для формирования фазы с ОЦК решеткой в сплавах на основе кобальта могут служить кластеры на основе ниобия. Такие кластеры, существующие в аморфной фазе, могут быть потенциальными местами зарождения фазы с такой же, как у ниобия, решеткой (объемно-центрированной). Области, упорядоченные по типу образующихся при кристаллизации фаз, наблюдались в разных аморфных сплавах [23; 24]. Если эта гипотеза верна, то причиной формирования ОЦК фазы является наличие областей с родственной кристаллической решеткой. В настоящее время исследования, позволяющие с определенностью ответить на этот вопрос, продолжаются.

Поскольку свойства материала являются структурно-чувствительными, исследования изменения структуры при легировании разными компонентами нужны для получения материалов с новым комплексом физико-химических свойств, необходимых для промышленного применения. Настоящая работа посвящена исследованию влияния концентрации легирующего компонента (железа) на структуру и фазовые превращения в аморфном сплаве на основе кобальта. Определение влияния концентрации легирующих компонентов на образующуюся структуру, а также зависимости свойств от образующейся структуры важно для создания материалов с необходимыми свойствами.

Цель работы – исследование кристаллизации аморфных сплавов системы Co-Fe-B-Nb после изотермических отжигов при различной концентрации легирующего компонента (железа).

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований были отобраны аморфные сплавы, полученные скоростной закалкой расплава на быстро движущуюся подложку, скорость охлаждения составляла 10^6 K/s. Полученная таким методом лента обладала следующими геометрическими параметрами: толщина – 35–50 мкм, ширина – 1 см. Состав лент контролировался с помощью рентгеноспектрального анализа на сканирующем электронном микроскопе Zeiss Supra 50VP. Состав полученных аморфных лент на основе кобальта: $Co_{56}Fe_{16}Nb_8B_{20}$, $Co_{62}Fe_{10}Nb_8B_{20}$, $Co_{67}Fe_5Nb_8B_{20}$.

Исходные аморфные образцы подвергались изотермическому отжигу при температурах 400–550 °C, после чего образующаяся структура исследовалась методом рентгенографии. Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре SIEMENS D-5000 с использованием $Co K_\alpha$ -излучения. Для обработки спектров применялись специальные программы, позволяющие проводить сглаживание, коррекцию фона, разделение перекрывающихся максимумов и др. Анализ рентгенограмм и идентификация фаз, образующихся после термообработки, проводились с использованием банка эталонов JCPDS (прежнее название ASTM).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

После проведения закалки расплава все образцы были аморфными. Отжиг при температуре ниже 500 °C не приводил к кристаллизации аморфной фазы. При дальнейшем повышении температуры начинается кристаллизация. После изотермического отжига при температуре 550 °C образцы являлись частично-кристаллическими. После такой термообработки все образцы содержали аморфную и кристаллические фазы. Однако фазовый состав оказался разным и зависел от концентрации железа в сплаве. На рис. 1 представлены рентгенограммы образцов после изотермического отжига при 550 °C.

По полученным рентгенограммам видно, что при уменьшении концентрации железа с 16 до 10 ат. % (кривые 3 и 2 на рис. 1 соответственно) структура не меняется. В этих сплавах при кристаллизации происходит выделение нанокристаллов Co, причем одновременно образуются две кубические модификации (рис. 2, рис. 3).

Одной из них является ГЦК-Co – высокотемпературная модификация кобальта. Хотя фаза ГЦК-Co стабильна при температурах выше 427 °C, присутствие кристаллов ГЦК-Co часто наблюдается при кристаллизации не только аморфных сплавов, но и в традиционных кристаллических сплавах. Помимо ГЦК-Co в сплаве присутствуют кристаллы с ОЦК решеткой, представляющие собой твердый раствор Co(Fe). Важно отметить, что параметр решетки твердого раствора составляет 2,837 Å, что заметно меньше известного в литературе значения 2,857 Å. Если проанализировать размеры атомов, входящих в состав сплава (радиусы металлических компонентов сплава составляют 1,253, 1,241 и 1,429 Å для кобальта, железа и ниобия соответственно), становится понятно, что твердый раствор обеднен ниобием (либо вообще не содержит ниобия) и может быть также обогащен бором.

Следует отметить еще один важный момент. Изменение содержания железа даже в этой концентрационной

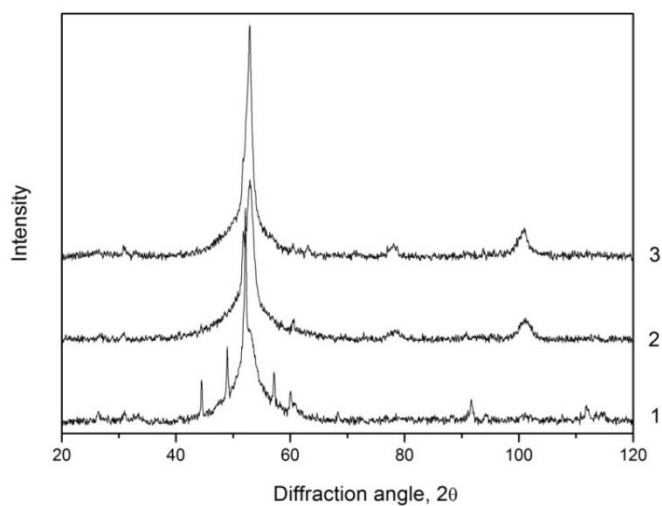


Рис. 1. Рентгенограммы образцов после изотермического отжига:
1 – $\text{Co}_{67}\text{Fe}_5\text{Nb}_8\text{B}_{20}$; 2 – $\text{Co}_{62}\text{Fe}_{10}\text{Nb}_8\text{B}_{20}$; 3 – $\text{Co}_{56}\text{Fe}_{16}\text{Nb}_8\text{B}_{20}$

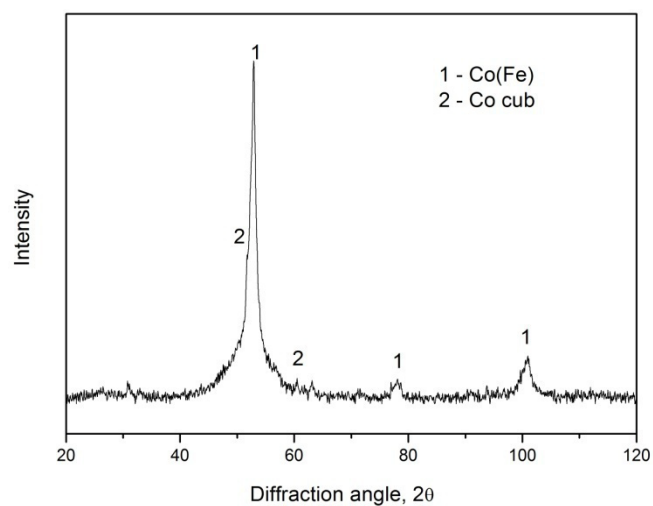


Рис. 2. Рентгенограмма сплава $\text{Co}_{56}\text{Fe}_{16}\text{Nb}_8\text{B}_{20}$ после изотермического отжига и фазового анализа

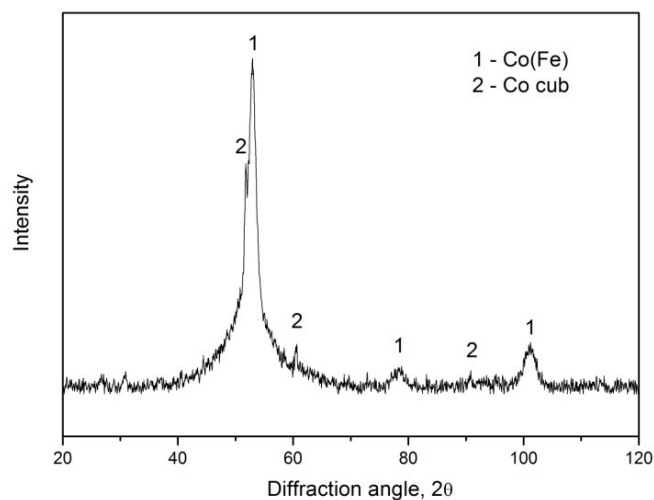


Рис. 3. Рентгенограмма сплава $\text{Co}_{62}\text{Fe}_{10}\text{Nb}_8\text{B}_{20}$ после изотермического отжига и фазового анализа

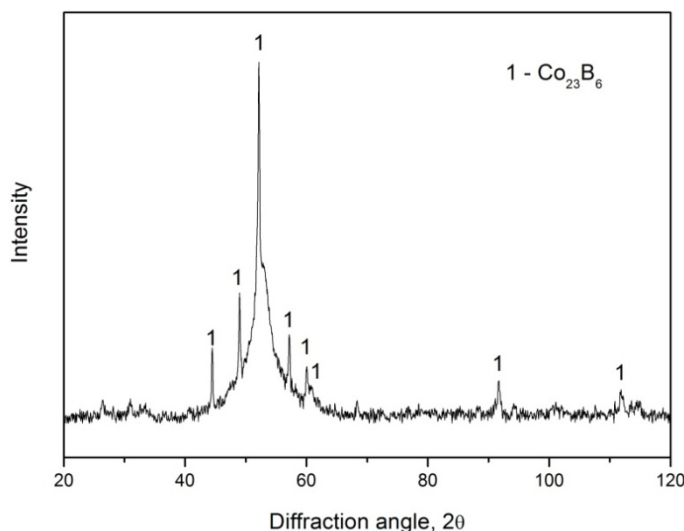


Рис. 4. Рентгенограмма сплава $\text{Co}_{67}\text{Fe}_5\text{Nb}_8\text{B}_{20}$ после изотермического отжига и фазового анализа

области приводит к изменению доли кристаллических фаз. Если проанализировать интенсивность отражений на кривых 2 и 3 рис. 1, то видно, что с увеличением концентрации железа доля ОЦК фазы возрастает.

При уменьшении концентрации железа до 5 ат. % структура резко меняется. После начала кристаллизации указанных выше фаз ГЦК-Со и ОЦК твердого раствора обнаружено не было. В образцах с 5 ат. % железа после отжига все так же присутствовала аморфная фаза, однако кристаллическая составляющая структуры оказалась другой. В этих образцах кристаллизация начинается с выделения кристаллов фазы Co_{23}B_6 (рис. 4). Важно отметить, что дифракционные отражения на рентгенограмме являются существенно более узкими, что указывает на формирование кристаллов большего размера.

Проведенное исследование показало, что кристаллизация аморфных сплавов системы Co-Fe-B-Nb существенно зависит от концентрации железа, причем при изменении его содержания происходит изменение как фазового состава, так и доли разных структурных составляющих.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что выделение кристаллической фазы на первом этапе кристаллизации в сплавах системы Co-Fe-B-Nb существенно зависит от концентрации железа. При уменьшении концентрации железа в сплаве доля ОЦК фазы уменьшается. При малом содержании железа кристаллизация начинается с выделения фазы Co_{23}B_6 , а при увеличении содержания железа кристаллизация идет с выделением двух фаз: ГЦК-Со и ОЦК твердого раствора Со(Fe).

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН при частичной поддержке РФФИ (проект 19-02-00406).

Статья подготовлена по материалам докладов участников IX Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2019) с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 9–13 сентября 2019 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chunchu V., Markandeyulu G.M. Magnetoimpedance studies in as quenched $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_8\text{CuV}_{3-x}\text{AlNb}_x$ // Journal of Applied Physics. 2013. Vol. 113. № 17. P. 17A321.
2. Xiang R., Zhou Sh., Dong B., Zhang G., Li Z., Wang Y., Chang Ch. Effect of Co addition on crystallization and magnetic properties of FeSiBPC alloys // Progress in Natural Science: Materials International. 2014. Vol. 24. № 6. P. 649–654.
3. Greer A.L. Partially or fully devitrified alloys for mechanical properties // Materials Science and Engineering. 2001. Vol. 304-306. № 1-2. P. 68–72.
4. Louzguine D.V., Inoue A. Crystallization Behaviour of Al-Based Metallic Glasses below and above glass transition temperature // Journal of Non-Crystalline Solids. 2002. Vol. 311. № 3. P. 281–293.
5. Aronin A.S., Abrosimova G.E. Reverse martensite transformation in iron nanocrystals under severe plastic deformation // Materials Letters. 2012. Vol. 83. P. 183–185.
6. Herzer G. Nanocrystalline soft magnetic materials // Physica Scripta. 1993. Vol. 1993. № T49A. P. 307–314.
7. Weltscha Z., Klama K., Lovas A. The comparison of hardness and coercivity evolution in various Fe–B based glasses (including FINEMET precursor) during relaxation and crystallization // Acta Physica Polonica A. 2017. Vol. 131. № 4. P. 669–671.
8. Gheiratmand T., Hosseini H.R.M., Davami P., Gjoka M., Loizos G., Aashuri H. Effect of annealing on soft magnetic behavior of nanostructured $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ribbons // Journal of Alloys and Compounds. 2014. Vol. 582. P. 79–82.
9. Shivaee H.A., Samadi M., Alihosseini H., Madaah Hosseini H.R. Nanocrystallization kinetics and magnetic properties of the melt spun amorphous $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{77}\text{Si}_{11}\text{B}_9\text{Cu}_{0.6}\text{Nb}_{2.4}$ alloy // Thermochimica Acta. 2014. Vol. 575. P. 64–69.
10. Bayri N., Izgi T., Gencer H., Sovák P., Gunes M., Atalay S. Crystallization kinetics of $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Mn}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ($x=0, 1, 3, 5, 7$) amorphous alloys // Journal of Non-Crystalline Solids. 2009. Vol. 355. № 1. P. 12–16.

11. Balcerski J., Brzozowski R., Wasiak M., Polański K., Moneta M. TEM, XRD and DSC analysis of thin films and foils of FeSiBNb alloys doped with Mn // *Vacuum*. 2009. Vol. 83. № SUPPL. 1. P. S182–S185.
12. Yoshizawa Y., Fujii S., Ping D.H., Ohnuma M., Hono K. Magnetic properties of nanocrystalline FeMCuNbSiB alloys (M: Co, Ni) // *Scripta Materialia*. 2003. Vol. 48. № 7. P. 863–868.
13. Agudo P., Vázquez M. Influence of Ni on the structural and magnetic properties of $\text{Ni}_x\text{Fe}_{73.5-x}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ($0 \leq x \leq 25$) alloys // *Journal of Applied Physics*. 2005. Vol. 97. № 2. P. 023901.
14. Yoshizawa Y., Yamauchi K. Magnetic properties of Fe-CuMSiB (M = Cr, V, Mo, Nb, Ta, W) alloys // *Materials Science and Engineering A*. 1991. Vol. 133. № C. P. 176–179.
15. Yan M., Tong H., Tao S., Liu J. Structural and magnetic properties of $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_{3-x}\text{Ti}_x\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ($x \leq 3$) alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. Vol. 505. № 1. P. 264–267.
16. Lu W., Fan J., Wang Y., Yan B. Microstructure and magnetic properties of $\text{Fe}_{72.5}\text{Cu}_1\text{M}_2\text{V}_2\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (M=Nb, Mo, (NbMo), (MoW)) nanocrystalline alloys // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010. Vol. 322. № 19. P. 2935–2937.
17. Chau N., Hoa N.Q., The N.D., Vu L.V. The effect of Zn, Ag and Au substitution for Cu in Finemet on the crystallization and magnetic properties // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006. Vol. 303. № 2 SPEC. ISS. P. e415–e418.
18. Muraca D., Cremaschi V., Moya J., Sirkin H. FINE-MENT type alloy without Si: Structural and magnetic properties // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008. Vol. 320. № 9. P. 1639–1644.
19. Abrosimova G.E., Matveev D.V., Pershina E.A., Aronin A.S. Effect of treatment conditions on parameters of nanocrystalline structure in Al-based alloys // *Materials Letters*. 2016. Vol. 183. P. 131–134.
20. Conde C.F., Blázquez J.S., Conde A. Nanocrystallization Process of the Hitpern Fe-Co-Nb-B Alloys // *Properties and Application of Nanocrystalline Alloys from amorphous Precursor*. The Netherlands: Kluwer Academic Publ., 2005. P. 111–121.
21. Nagase T. Formation of various types of globules in CoCuSiB immiscible alloy with amorphous phase // *Materials Transactions*. 2016. Vol. 57. № 2. P. 156–162.
22. Abrosimova G.E., Volkov N.A., Orlova N.N., Aronin A.S. BCC nanocrystal formation in an amorphous Co-Si-B-Fe-Nb alloy on heating // *Materials Letters*. 2018. Vol. 219. P. 97–99.
23. Абросимова Г.Е., Аронин А.С., Асадчиков В.Е., Серебряков А.В. Эволюция структуры аморфных сплавов Fe-B и Co-Fe-Si-B при нагреве ниже температуры кристаллизации // *Физика металлов и материаловедение*. 1986. Т. 62. № 3. С. 496–502.
24. Louzguine D.V., Kato H., Kim H.S., Inoue A. Formation of 2–5 nm size pre-precipitates of cF96 phase in a Hf-Co-Al glassy alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2003. Vol. 359. № 1-2. P. 198–201.
25. Louzguine D.V., Inoue A. Crystallization Behaviour of Al-Based Metallic Glasses below and above glass transition temperature. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2002, vol. 311, no. 3, pp. 281–293.
26. Aronin A.S., Abrosimova G.E. Reverse martensite transformation in iron nanocrystals under severe plastic deformation. *Materials Letters*, 2012, vol. 83, pp. 183–185.
27. Herzer G. Nanocrystalline soft magnetic materials. *Physica Scripta*, 1993, vol. 1993, no. T49A, pp. 307–314.
28. Weltscha Z., Klama K., Lovas A. The comparison of hardness and coercivity evolution in various Fe-B based glasses (including FINEMET precursor) during relaxation and crystallization. *Acta Physica Polonica A*, 2017, vol. 131, no. 4, pp. 669–671.
29. Gheiratmand T., Hosseini H.R.M., Davami P., Gjoka M., Loizos G., Aashuri H. Effect of annealing on soft magnetic behavior of nanostructured $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ribbons. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 582, pp. 79–82.
30. Shivaee H.A., Samadi M., Alihosseini H., Madaah Hosseini H.R. Nanocrystallization kinetics and magnetic properties of the melt spun amorphous $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{77}\text{Si}_{11}\text{B}_9\text{Cu}_{0.6}\text{Nb}_{2.4}$ alloy. *Thermochimica Acta*, 2014, vol. 575, pp. 64–69.
31. Bayri N., Izgi T., Gencer H., Sovák P., Gunes M., Atalay S. Crystallization kinetics of $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Mn}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ($x=0, 1, 3, 5, 7$) amorphous alloys. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2009, vol. 355, no. 1, pp. 12–16.
32. Balcerski J., Brzozowski R., Wasiak M., Polański K., Moneta M. TEM, XRD and DSC analysis of thin films and foils of FeSiBNb alloys doped with Mn. *Vacuum*, 2009, vol. 83, no. SUPPL. 1, pp. S182–S185.
33. Yoshizawa Y., Fujii S., Ping D.H., Ohnuma M., Hono K. Magnetic properties of nanocrystalline FeMCuNbSiB alloys (M: Co, Ni). *Scripta Materialia*, 2003, vol. 48, no. 7, pp. 863–868.
34. Agudo P., Vázquez M. Influence of Ni on the structural and magnetic properties of $\text{Ni}_x\text{Fe}_{73.5-x}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ($0 \leq x \leq 25$) alloys. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, no. 2, p. 023901.
35. Yoshizawa Y., Yamauchi K. Magnetic properties of FeCuMSiB (M = Cr, V, Mo, Nb, Ta, W) alloys. *Materials Science and Engineering A*, 1991, vol. 133, no. C, pp. 176–179.
36. Yan M., Tong H., Tao S., Liu J. Structural and magnetic properties of $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_{3-x}\text{Ti}_x\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ($x \leq 3$) alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 505, no. 1, pp. 264–267.
37. Lu W., Fan J., Wang Y., Yan B. Microstructure and magnetic properties of $\text{Fe}_{72.5}\text{Cu}_1\text{M}_2\text{V}_2\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (M=Nb, Mo, (NbMo), (MoW)) nanocrystalline alloys. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, no. 17, pp. 17A321.
38. Xiang R., Zhou Sh., Dong B., Zhang G., Li Z., Wang Y., Chang Ch. Effect of Co addition on crystallization and magnetic properties of FeSiBPC alloys. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2014, vol. 24, no. 6, pp. 649–654.
39. Greer A.L. Partially or fully devitrified alloys for mechanical properties. *Materials Science and Engineering*, 2001, vol. 304-306, no. 1-2, pp. 68–72.
40. Louzguine D.V., Inoue A. Crystallization Behaviour of Al-Based Metallic Glasses below and above glass transition temperature. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2002, vol. 311, no. 3, pp. 281–293.
41. Aronin A.S., Abrosimova G.E. Reverse martensite transformation in iron nanocrystals under severe plastic deformation. *Materials Letters*, 2012, vol. 83, pp. 183–185.
42. Herzer G. Nanocrystalline soft magnetic materials. *Physica Scripta*, 1993, vol. 1993, no. T49A, pp. 307–314.
43. Weltscha Z., Klama K., Lovas A. The comparison of hardness and coercivity evolution in various Fe-B based glasses (including FINEMET precursor) during relaxation and crystallization. *Acta Physica Polonica A*, 2017, vol. 131, no. 4, pp. 669–671.
44. Gheiratmand T., Hosseini H.R.M., Davami P., Gjoka M., Loizos G., Aashuri H. Effect of annealing on soft magnetic behavior of nanostructured $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ribbons. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 582, pp. 79–82.
45. Shivaee H.A., Samadi M., Alihosseini H., Madaah Hosseini H.R. Nanocrystallization kinetics and magnetic properties of the melt spun amorphous $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{77}\text{Si}_{11}\text{B}_9\text{Cu}_{0.6}\text{Nb}_{2.4}$ alloy. *Thermochimica Acta*, 2014, vol. 575, pp. 64–69.
46. Bayri N., Izgi T., Gencer H., Sovák P., Gunes M., Atalay S. Crystallization kinetics of $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Mn}_x\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ($x=0, 1, 3, 5, 7$) amorphous alloys. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2009, vol. 355, no. 1, pp. 12–16.
47. Balcerski J., Brzozowski R., Wasiak M., Polański K., Moneta M. TEM, XRD and DSC analysis of thin films and foils of FeSiBNb alloys doped with Mn. *Vacuum*, 2009, vol. 83, no. SUPPL. 1, pp. S182–S185.
48. Yoshizawa Y., Fujii S., Ping D.H., Ohnuma M., Hono K. Magnetic properties of nanocrystalline FeMCuNbSiB alloys (M: Co, Ni). *Scripta Materialia*, 2003, vol. 48, no. 7, pp. 863–868.
49. Agudo P., Vázquez M. Influence of Ni on the structural and magnetic properties of $\text{Ni}_x\text{Fe}_{73.5-x}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ($0 \leq x \leq 25$) alloys. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, no. 2, p. 023901.
50. Yoshizawa Y., Yamauchi K. Magnetic properties of FeCuMSiB (M = Cr, V, Mo, Nb, Ta, W) alloys. *Materials Science and Engineering A*, 1991, vol. 133, no. C, pp. 176–179.
51. Yan M., Tong H., Tao S., Liu J. Structural and magnetic properties of $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_{3-x}\text{Ti}_x\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ($x \leq 3$) alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 505, no. 1, pp. 264–267.
52. Lu W., Fan J., Wang Y., Yan B. Microstructure and magnetic properties of $\text{Fe}_{72.5}\text{Cu}_1\text{M}_2\text{V}_2\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (M=Nb, Mo, (NbMo), (MoW)) nanocrystalline alloys. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, no. 17, pp. 17A321.

REFERENCES

1. Chunchu V., Markandeyulu G.M. Magnetoimpedance studies in as quenched $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_8\text{CuV}_{3-x}\text{AlNb}_x$.

- Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, vol. 322, no. 19, pp. 2935–2937.
17. Chau N., Hoa N.Q., The N.D., Vu L.V. The effect of Zn, Ag and Au substitution for Cu in Finemet on the crystallization and magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, vol. 303, no. 2 SPEC. ISS, pp. e415–e418.
 18. Muraca D., Cremaschi V., Moya J., Sirkin H. FINE-MENT type alloy without Si: Structural and magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, vol. 320, no. 9, pp. 1639–1644.
 19. Abrosimova G.E., Matveev D.V., Pershina E.A., Aronin A.S. Effect of treatment conditions on parameters of nanocrystalline structure in Al-based alloys. *Material Letters*, 2016, vol. 183, pp. 131–134.
 20. Conde C.F., Blázquez J.S., Conde A. Nanocrystallization Process of the Hitpern Fe-Co-Nb-B Alloys. *Properties and Application of Nanocrystalline Alloys from amorphous Precursor*. The Netherlands, Kluwer Academic Publ., 2005, pp. 111–121.
 21. Nagase T. Formation of various types of globules in CoCuSiB immiscible alloy with amorphous phase. *Materials Transactions*, 2016, vol. 57, no. 2, pp. 156–162.
 22. Abrosimova G.E., Volkov N.A., Orlova N.N., Aronin A.S. BCC nanocrystal formation in an amorphous Co-Si-B-Fe-Nb alloy on heating. *Materials Letters*, 2018, vol. 219, pp. 97–99.
 23. Abrosimova G.Ye., Aronin A.S., Asadchikov V.Ye., Se-rebraykov A.V. Evolution of the structure of amorphous alloys Fe-B and Co-Fe-Si-B during heating below the crystallization point. *Physics of Metals and Metallography*, 1986, vol. 62, no. 3, pp. 70–76.
 24. Louzguine D.V., Kato H., Kim H.S., Inoue A. Formation of 2–5 nm size pre-precipitates of cF96 phase in a Hf–Co–Al glassy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2003, vol. 359, no. 1-2, pp. 198–201.

EFFECT OF IRON CONCENTRATION ON CRYSTALLIZATION OF AN AMORPHOUS ALLOY OF Co-Fe-B-Nb SYSTEM

N.A. Volkov, postgraduate student, junior researcher
G.E. Abrosimova, Doctor of Science (Physics and Mathematics), chief researcher
Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka (Russia)

Keywords: amorphous alloys; nanocrystalline alloys; structure of nanocrystalline alloys; crystallization of amorphous alloys; X-ray diffraction analysis.

Abstract: In the modern world, technical devices are being constantly improved, creation of which requires materials with the best functional properties. Amorphous and nanocrystalline iron- and cobalt-based alloys are some of such materials. They have proved to be good in the fields of radio- and microelectronics, due to the fact they have high magnetic characteristics. It is also known that these properties can be improved by the formation of a partially crystalline structure in such alloys. However, such a structure cannot always be formed using a standard method of isothermal annealing; therefore, alloying components are added to the alloy composition to slow down the crystallization process. Different content of added components also affects the sequence of phase transformations during crystallization. As most of the properties are structure-dependent, the formed structure also determines the material characteristics. Therefore, establishment of the dependence of the formed structure in amorphous alloys after heat treatment is an important task of condensed matter physics.

The crystallization of the amorphous alloys of Co-Fe-B-Nb system was studied by X-ray diffraction. The samples were crystallized using isothermal annealing of the alloys with different content of components under the same conditions. The dependence of the formed structure on the content of an alloying component is determined. It is shown that the formed structure significantly depends on the concentration of iron. With the iron content of 10 at.% and 16 at.%, the structure consists of cubic cobalt nanocrystals and a solid solution of iron in cobalt. With a decrease in the concentration to 5 at.%, the crystallization mechanism changes: crystallization begins with the precipitation of Co_{23}B_6 boride crystals. The reasons for the effect of iron concentration in the alloy composition on crystallization are discussed.