

УДК 538.9

**ВЛИЯНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПЛОТНОСТЬ СПЛАВА
Co–Fe–Si–B–Nb В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ И ЖИДКОМ СОСТОЯНИЯХ****© 2021 г. Б. А. Русанов^{a, *}, В. Е. Сидоров^{a, b}, С. А. Петрова^{b, c},
П. Швец Ст.^d, Д. Яничкович^d**^aУральский государственный педагогический университет, Екатеринбург, Россия^bУральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия^cИнститут металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия^dИнститут физики Словацкой академии наук, Братислава, Словакия

*e-mail: rusfive@mail.ru

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

После доработки 17.03.2021 г.

Принята к публикации 19.03.2021 г.

Аморфизирующиеся сплавы на основе кобальта и железа активно изучаются в последние годы, благодаря уникальным магнитным и электрическим свойствам. В настоящей работе выполнен дифференциальный термический анализ (ДТА) и изучена плотность сплава $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4$ (базовый состав) с малыми добавками редкоземельных металлов (Nd, Sm, Tb, Yb). Из данных ДТА определены температуры фазовых переходов сплавов. Установлено, что малые добавки редкоземельных металлов (1 и 2 ат. %) повышают температуру солидус и понижают температуру ликвидус базового состава. Небольшие тепловые эффекты, наблюдаемые в сплавах с неодимом, тербием и иттербием, в районе 1080–1100°C, могут свидетельствовать о распаде соединений типа РЗМ-В. В сплавах с добавками самария таких эффектов не обнаружено, что позволяет предположить, что самарий в исследуемых сплавах не образует фазу Sm_2B_5 , а уходит в раствор. Экспериментальные исследования плотности выполнены в широком интервале температур, включая кристаллическое и жидкое состояния, на автоматизированной установке, реализующей абсолютный вариант метода проникающего гамма-излучения. Показано, что температурные зависимости плотности в кристаллическом состоянии являются нелинейными, а в жидком состоянии хорошо описываются линейными функциями. При перегреве расплавов выше определенной температуры зафиксирован гистерезис плотности (несовпадение значений плотности при нагреве и последующем охлаждении), что может свидетельствовать о структурных превращениях, происходящих в расплаве. Установлено, что добавки РЗМ вызывают рост плотности сплава, однако, происходит это нелинейно и зависит от содержания РЗМ. Из экспериментальных данных по плотности сплавов рассчитаны коэффициенты их объемного расширения и молярные объемы.

Ключевые слова: плотность, гамма-абсорбционный метод, дифференциальный термический анализ, объемно-аморфизирующиеся сплавы, расплавы, кобальт, железо, коэффициент теплового расширения, молярный объем

DOI: 10.31857/S0235010621040083

ВВЕДЕНИЕ

Объемно-аморфные сплавы на основе кобальта и железа, особенно композиции Co–Fe–Si–B–Nb, в последние годы занимают особое место в исследованиях, посвященных металлическим стеклам, благодаря уникальным магнитным, механическим и электрическим свойствам [1–4]. Эти сплавы в виде стержней и аморфных лент уже

нашли применение в промышленности, например, в качестве высокочувствительных сенсорных датчиков [5].

Одним из важных критериев практической применимости новых объемно-аморфных сплавов является их стеклообразующая способность. На сегодняшний день известно много работ, посвященных стеклообразующей способности (Glass-Forming Ability – *GFA*) и расчетам ее критериев (см., например, [6–11]). В работах [6, 12, 13] показано, что составы на основе кобальта и железа имеют относительно низкую стеклообразующую способность, что существенно ограничивает круг практических применений этих материалов. Поиск оптимальных составов с высокой стеклообразующей способностью, из которых возможно получение объемно-аморфных стержней диаметром до 5–10 мм, сопряжен с определением характеристических температур (солидус, ликвидус, температура переохлаждения, температура стеклования и т.п.). Однако, следует отметить, что при всем разнообразии критериев *GFA*, они не обладают предсказательной функцией, т.е. не позволяют оценить возможности получения металлических стекол априорно. Действительно, сначала нужно приготовить качественный аморфный образец, определить его характеристические температуры и лишь затем возможен расчет критериев *GFA*. С другой стороны, очень важна информация о состоянии расплава, из которого происходит закалка аморфных образцов. Структурные превращения в жидком состоянии, которые характерны для многокомпонентных сплавов, могут быть обнаружены при измерении их теплофизических свойств.

Одним из таких свойств, с помощью которого возможно определить структурные превращения в жидком состоянии, является плотность [14]. В настоящее время систематические исследования плотности сплавов на основе кобальта и железа, склонных к объемной аморфизации, практически не проводились, а все известные нам работы дают аддитивную оценку плотности и молярного объема [15, 16].

В данной работе проведены измерения плотности базовой композиции $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4$ и сплавов с малыми (1 и 2 ат. %) добавками редкоземельных металлов (Nd, Sm, Tb, Yb) в широком температурном интервале, включая жидкое состояние. По экспериментальным данным рассчитаны коэффициенты теплового расширения сплавов и их молярные объемы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сплав номинального состава $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4$ (Master Alloy – *MA*) и сплавы с малыми (1 и 2 ат. %) добавками редкоземельных металлов (Nd, Sm, Tb, Yb) были приготовлены путем переплава исходных компонентов в индукционной печи при температуре 1700°C в течение получаса в атмосфере аргона. Химический состав образцов до опытов был определен на атомно-адсорбционном спектрометре. По данным рентгенофазового анализа фазовый состав *MA* был следующий: 1) “чистый” кобальт и раствор Co–Fe (микрообласти с разной концентрацией) – 52%; 2) оксиды (преимущественно $\text{Fe}_{2,2}\text{Co}_{0,8}\text{O}_4$ и CoO) – 13%; 3) сложные ($\text{Fe}_3\text{Co}_3\text{B}_2$, $\text{Fe}_3\text{Si}_{0,4}\text{B}_{0,6}$) и простые (Co_2B , Fe_2B) бориды – 29%; 4) метастабильная фаза 23:6 (преимущественно $\text{Co}_{11,2}\text{Fe}_{9,8}\text{Nb}_2\text{B}_6$) – 6%. Добавки редкоземельных металлов приводят к увеличению доли фазы Co–Fe, уменьшению оксидов и исходных боридов и появлению новых соединений РЗМ–бор.

Температуры начала плавления (солидус) и окончания плавления (ликвидус) полученных сплавов определены с помощью метода дифференциального термического анализа (ДТА) на анализаторе Perkin Elmer DTA-7. Измерения проводили в режиме непрерывного нагрева со скоростью 10 град./мин в потоке аргона. Для обработки экспериментальных данных и определения характеристических температур было использовано программное обеспечение Pyris Data Analysis.

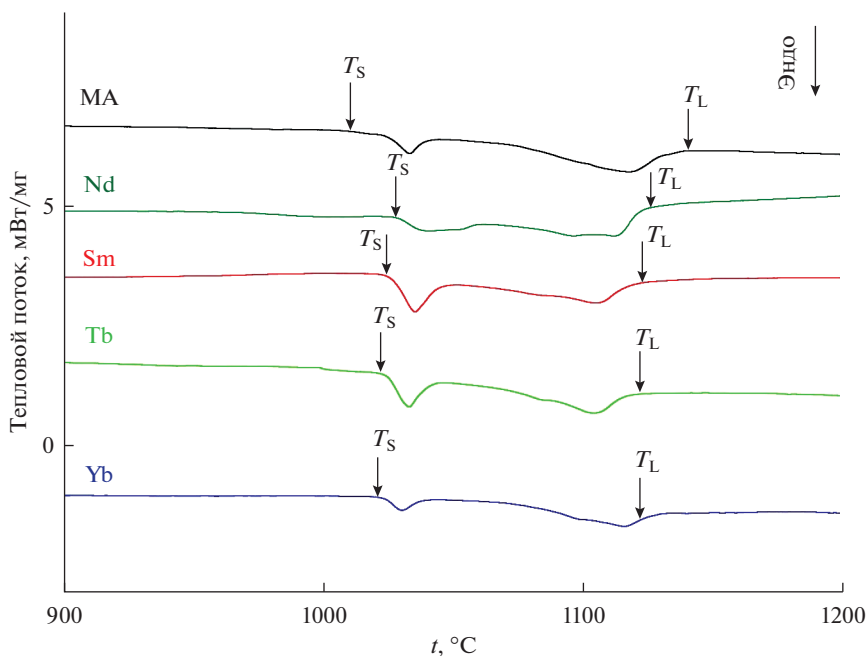


Рис. 1. ДТА-кривые для базового сплава $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4$ (МА) и сплавов с добавками 1 ат. % редкоземельных металлов, полученные в ходе нагрева. Стрелками показаны температуры начала плавления (солидус – T_S) и окончания плавления (ликвидус – T_L).

Плотность сплавов измерена на автоматизированной установке, реализующей абсолютный вариант метода проникающего гамма-излучения в температурном интервале 50–1550°C. Опыты выполнены в режиме непрерывного нагрева и последующего охлаждения со скоростью 2 град/мин в атмосфере высокоочищенного гелия. Подробное описание экспериментальной установки приведено в работе [14]. Слитки готовых сплавов предварительно переплавлялись в печи гамма-плотномера в тиглях из оксида бериллия в вакууме при температуре 1700°C для придания образцам цилиндрической формы. В процессе плавления образцы перемешивались три раза с помощью погружной термопары в чехле из оксида бериллия. Относительная погрешность определения плотности составила $\pm 1\%$. На основе полученных результатов рассчитаны молярные объемы и коэффициенты термического расширения сплавов в кристаллическом и жидком состояниях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ДТА-кривые для базового состава (МА) и сплавов, содержащих 1 ат. % редкоземельных металлов, представлены на рис. 1.

По результатам ДТА анализа установлено, что процесс плавления базового состава и сплавов с малыми добавками редкоземельных элементов занимает достаточно широкий температурный интервал (более 100°C). Основные тепловые эффекты наблюдаются при солидусе и ликвидусе. Установлено, что добавки 1 и 2 ат. % редкоземельных металлов к МА повышают температуру солидус и понижают температуру ликвидус. Незначительные по амплитуде тепловые эффекты, наблюдаемые в сплавах с неодимом, тербием и иттербием, в районе 1080–1100°C, могут свидетельствовать о распаде

Таблица 1. Температуры солидус и ликвидус сплавов $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4$ + РЗМ

Сплав	$T_S, ^\circ\text{C}$	$T_L, ^\circ\text{C}$
$\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4 - MA$	1007	1141
$MA + 1 \text{ ат. \% Nd}$	1028	1125
$MA + 2 \text{ ат. \% Nd}$	1043	1136
$MA + 1 \text{ ат. \% Sm}$	1026	1121
$MA + 2 \text{ ат. \% Sm}$	1024	1121
$MA + 1 \text{ ат. \% Tb}$	1024	1117
$MA + 2 \text{ ат. \% Tb}$	1028	1120
$MA + 1 \text{ ат. \% Yb}$	1023	1129
$MA + 2 \text{ ат. \% Yb}$	1021	1118

соединений РЗМ–бор. В сплавах с добавкой самария тепловых эффектов в этой области температур не обнаружено, что позволяет предположить, что самарий в исследуемых сплавах не образует фазу Sm_2B_5 , а уходит в раствор. Данный факт делает самарий наиболее предпочтительной добавкой к базовой композиции для повышения ее стеклообразующей способности.

Температуры солидус (T_S) и ликвидус (T_L) для всех исследованных составов представлены в табл. 1.

Температурная зависимость плотности сплава $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4$ представлена на рис. 2.

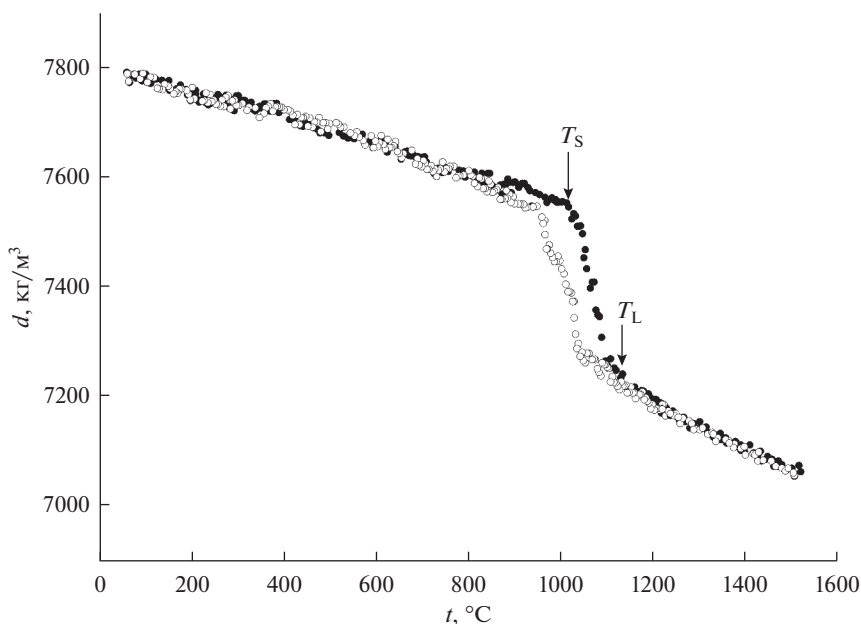


Рис. 2. Температурная зависимость плотности базового состава $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4$ (MA). Темные точки – нагрев, светлые – охлаждение. Стрелками показаны температуры солидус и ликвидус.

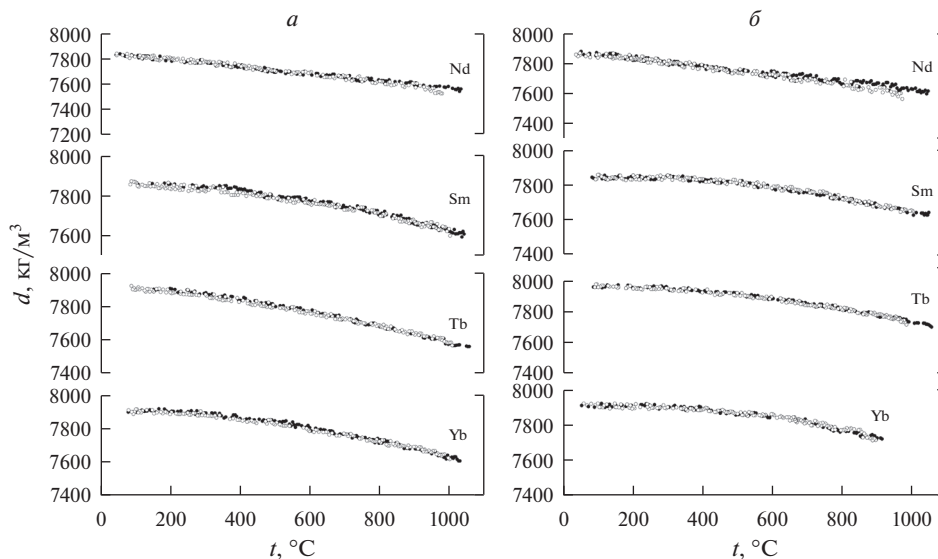


Рис. 3. Температурные зависимости плотности сплавов $MA + 1$ ат. % РЗМ (а) и $MA + 2$ ат. % РЗМ (б) в кристаллическом состоянии. Темные точки – нагрев, светлые – охлаждение.

Установлено, что плотность MA монотонно убывает с ростом температуры в кристаллическом и жидком состояниях. Значения температур солидуса и ликвидуса совпадают со значениями, определенными в ДТА-анализе, с точностью до 3°C . Процесс плавления сопряжен с резким уменьшением плотности, которое можно разделить на два этапа в соответствии с этапами плавления, которые были зафиксированы в опытах по ДТА. На температурной зависимости плотности эти этапы могут быть идентифицированы по наклону кривой плотности при нагреве и охлаждении.

На рис. 3 представлены политермы плотности сплавов, содержащих 1 и 2 ат. % РЗМ в кристаллическом состоянии.

Отметим, что температурные зависимости плотности в кристаллическом состоянии являются нелинейными. Это может свидетельствовать о постепенном, растянутом по температуре изменении фазового состава.

На рис. 4 представлены температурные зависимости плотности сплавов в жидком состоянии.

В ходе опытов было установлено, что при нагреве сплавов до температур выше 1350°C появляется небольшой гистерезис плотности, т.е. несовпадение значений d , полученных при нагреве и охлаждении. Несмотря на то, что гистерезис находится в пределах погрешностей измерения плотности, он появляется всегда при нагреве из кристаллического состояния. Изотермические выдержки при температурах ниже 1350°C в процессе нагрева или последующего охлаждения не приводят к изменениям значений плотности. Наличие гистерезиса может свидетельствовать о том, что перегрев за указанную температуру изменяет структуру жидкости, и, как следствие, может существенно повлиять на стеклообразующую способность сплавов и их свойства в аморфном состоянии.

На рис. 5 представлены изотермы плотности исследованных сплавов при трех различных температурах – в кристаллическом и жидком состояниях в зависимости от используемого редкоземельного металла.

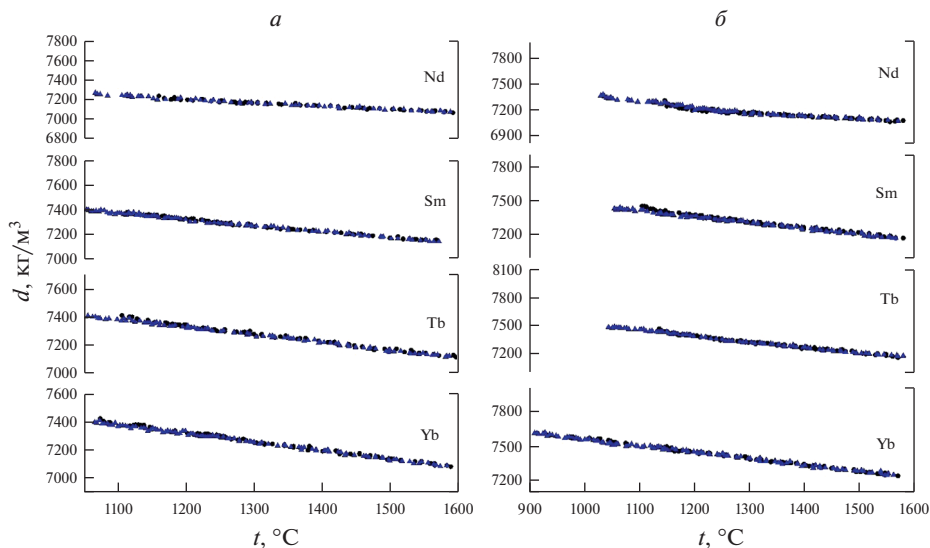


Рис. 4. Температурные зависимости плотности сплавов $MA + 1$ ат. % РЗМ (а) и $MA + 2$ ат. % РЗМ (б) в жидком состоянии. Точки – нагрев, треугольники – охлаждение.

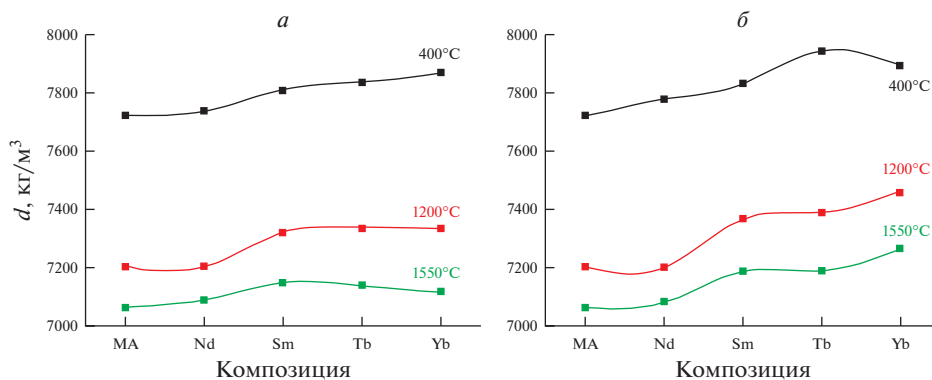


Рис. 5. Изотермы плотности сплавов $MA + 1$ ат. % РЗМ (а) и $MA + 2$ ат. % РЗМ (б) в зависимости от используемого редкоземельного металла.

Видно, что добавки РЗМ вызывают рост плотности MA , однако, происходит это нелинейно и зависит от содержания РЗМ.

В жидком состоянии температурные зависимости плотности могут быть аппроксимированы линейными функциями вида:

$$d_{\text{Liq}} = d_L(1 - \alpha_L(T - T_L)),$$

где d_L – плотность при температуре ликвидус, α_L – коэффициент теплового расширения, T_L – температура ликвидус.

Коэффициенты линейной аппроксимации плотности сплавов в жидком состоянии представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты линейной аппроксимации плотности в жидком состоянии

Сплав	$T_L, ^\circ\text{C}$	$d_L, \text{кг/м}^3$	$\alpha_L \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4 - MA$	1141	7215 ± 14	5.4 ± 0.1
$MA + 1 \text{ ат. \% Nd}$	1125	7220 ± 15	4.6 ± 0.2
$MA + 2 \text{ ат. \% Nd}$	1136	7239 ± 18	4.7 ± 0.2
$MA + 1 \text{ ат. \% Sm}$	1121	7369 ± 12	6.2 ± 0.1
$MA + 2 \text{ ат. \% Sm}$	1121	7421 ± 19	6.8 ± 0.2
$MA + 1 \text{ ат. \% Tb}$	1117	7375 ± 16	7.6 ± 0.2
$MA + 2 \text{ ат. \% Tb}$	1120	7437 ± 13	7.8 ± 0.1
$MA + 1 \text{ ат. \% Yb}$	1129	7401 ± 14	8.2 ± 0.1
$MA + 2 \text{ ат. \% Yb}$	1118	7507 ± 9	7.5 ± 0.1

Таблица 3. Значения молярного объема сплавов $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4 + \text{PЗМ}$ при фиксированных температурах

Сплав	$V_{\text{mol}} \cdot 10^{-6}, \text{м}^3/\text{моль}, (30^\circ\text{C})$	$V_{\text{mol}} \cdot 10^{-6}, \text{м}^3/\text{моль}, (1550^\circ\text{C})$
$\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4 - MA$	6.31	6.95
$MA + 1 \text{ ат. \% Nd}$	6.39	7.07
$MA + 2 \text{ ат. \% Nd}$	6.48	7.21
$MA + 1 \text{ ат. \% Sm}$	6.38	7.02
$MA + 2 \text{ ат. \% Sm}$	6.50	7.12
$MA + 1 \text{ ат. \% Tb}$	6.34	7.04
$MA + 2 \text{ ат. \% Tb}$	6.42	7.15
$MA + 1 \text{ ат. \% Yb}$	6.36	7.08
$MA + 2 \text{ ат. \% Yb}$	6.51	7.11

Из экспериментальных данных рассчитаны значения молярного объема сплавов: $V_{\text{mol}} = \frac{M}{d}$, где M – молярная масса сплава, d – плотность сплава. Результаты расчета представлены в табл. 3 для двух фиксированных значений температуры – 30 и 1550°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования плотности сплава $\text{Co}_{48}\text{Fe}_{25}\text{Si}_4\text{B}_{19}\text{Nb}_4$ с малыми добавками редкоземельных металлов из начала, середины и конца ряда лантаноидов проведены в широком температурном интервале, включая кристаллическое и жидкое состояния. Определены температуры фазовых переходов сплавов. Рассчитаны коэффициенты объемного расширения и молярные объемы. Установлено, что малые добавки редкоземельных металлов повышают температуру солидус и понижают температуру ликвидус базового состава. При перегреве расплавов выше 1350°C зафиксирован гистерезис плотности, что может свидетельствовать о структурных превращениях. Перегрев расплава за указанную температуру может существенно повлиять на стеклообразующую способность сплавов и их свойства в аморфном состоянии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-03-00433. П. Швец Ст. и Д. Яничкович признательны за поддержку проектов VEGA 2/0144/21, APVV-19-0369.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Panina L.V., Mohri K., Uchiyama T. et al. Giant magneto-impedance in Co-rich amorphous wires and films // IEEE Trans. Magn. 1995. **31**. P. 1249–1253.
2. Suryanarayana C., Inoue A. Bulk metallic glasses. CRC Press, Boca Raton. 2011.
3. Mohri K., Kawashima K., Kozhawa T. et al. Magneto-inductive effect (MIEffect) in amorphous wires // IEEE Trans. Magn. 1992. **28**. P. 3150–3156.
4. Man Q., Sun H., Dong Y. et al. Enhancement of glass-forming ability of CoFeBSiNb bulk glassy alloys with excellent soft-magnetic properties and superhigh strength // Internet. 2010. **18**. P. 1876–1879.
5. Inoue A., Takeuchi A. Recent progress in bulk glassy, nanoquasicrystalline and nanocrystalline alloys // Mater. Sci. Eng. A. 2004. **375–377**. P. 16–30.
6. Aykol M., Akdeniz M.V., Mekhrabov A.O. Solidification behavior, glass forming ability and thermal characteristics of soft magnetic Fe–Co–B–Si–Nb–Cu bulk amorphous alloys // Internet. 2011. **19**. № 9. P. 1330–1337.
7. Long Z.L., Liu, W. Zhong M. et al. A new correlation between the characteristics temperature and glass-forming ability for bulk metallic glasses // J. Therm. Anal. Calorim. 2018. **132**. № 3. P. 1645–1660.
8. Deng R.J., Long Z.L., Peng L. et al. A new mathematical expression for the relation between characteristic temperature and glass-forming ability of metallic glasses // J. Non-Cryst. Solids. 2020. **533**. 119829.
9. Guo S., Liu C.T. New glass forming ability criterion derived from cooling consideration // Internet. 2010. **18**. № 11. P. 2065–2068.
10. Long Z.L., Xie G.Q., Wei H.Q. et al. On the new criterion to assess the glass-forming ability of metallic alloys // Mater. Sci. Eng. A. 2009. **509**. № 1. P. 23–30.
11. Zhang G.H., Chou K.C. A criterion for evaluating glass-forming ability of alloys // J. Appl. Phys. 2009. **106**. № 9. 094902.
12. Louzguine-Luzgin D.V., Bazlov A.I., Ketov S.V., Inoue A. Crystallization behavior of Fe- and Co-based bulk metallic glasses and their glass-forming ability // Mater. Chem. and Phys. 2015. **162**. P. 197–206.
13. Chang C., Shen B., Inoue A. Synthesis of bulk glassy alloys in the (Fe,Co,Ni)–B–Si–Nb system // Mater. Sci. Eng. A. 2007. **449–451**. P. 239–242.
14. Rusanov B.A., Baglasova E.S., Popel P.S., Sidorov V.E., Sabirzyanov A.A. Gamma-Densitometer for Studies of High-Temperature Metal Melts // High Temp. 2018. **56**. № 3. P. 439–443.
15. Sterkhova I.V., Kamaeva L.V., Lad'yanov V.I., Chtchelkatchev N.M. Role of Ta and Nb alloying elements on the viscosity of Fe–B–Si melts // J. Mol. Liq. 2020. **323**. 114636.
16. Parthiban R., Stoica M., Kaban I. et al. Viscosity and fragility of the supercooled liquids and melts from the Fe–Co–B–Si–Nb and Fe–Mo–P–C–B–Si glass-forming alloy systems // Internet. 2015. **66**. P. 48–55.

**THE INFLUENCE OF RARE-EARTH METALS ON DENSITY
OF Co–Fe–Si–B–Nb ALLOY IN CRYSTALLINE AND LIQUID STATES**

B. A. Rusanov¹, V. E. Sidorov^{1,2}, S. A. Petrova^{2,3}, P. Svec Sr.⁴, D. Janickovic⁴

¹*Ural State Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia*

²*Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*

³*Institute of Metallurgy UB RAS, Yekaterinburg, Russia*

⁴*Institute of Physics, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia*

Cobalt and iron-based alloys with tendency to amorphization is a hot topic nowadays due to their unique magnetic and electrical properties. In the present work the differential thermal analysis (DTA) and density measurements of Co₄₈Fe₂₅Si₄B₁₉Nb₄ alloy (base composition) with small additions of rare earth metals (Nd, Sm, Tb, Yb) are performed. The temperatures of phase transitions in the alloys are determined by DTA. It was found that small additions of rare earth metals (1 and 2 at %) increase solidus temperature and decrease liquidus of the base composition. Small thermal effects that were observed in the alloys with neodymium, terbium and ytterbium in the range 1080–1100°C, may indicate the decomposition of REM-B type compounds. In the alloys with samarium such effects were not found. That means that samarium does not form the Sm₂B₅ phase in the investigated alloys but goes into solution. Density was studied experimentally in a wide temperature range, including crystalline and

liquid states, on an automated setup where the absolute variant of gamma-penetration method was realized. It is shown that temperature dependences of density in crystalline state are nonlinear and in liquid state are well described by linear functions. When melts are overheated above a certain temperature, density hysteresis (incoincidence of heating and cooling curves) appears; that may indicate structural transformations occurring in the melt. It is found that the rare-earth additions increase density of investigated alloys, however, this occurs non-linearly and depends on REM content. Basing on density experimental data, the coefficients of volume expansion and molar volumes are calculated.

Keywords: density, gamma-absorption method, differential thermal analysis, bulk metallic glasses, melts, cobalt, iron, thermal expansion coefficient, molar volume

REFERENCES

1. Panina L.V., Mohri K., Uchiyama T. et al. Giant magneto-impedance in Co-rich amorphous wires and films // *IEEE Trans. Magn.* 1995. **31**. P. 1249–1253.
2. Suryanarayana C., Inoue A. Bulk metallic glasses. CRC Press, Boca Raton. 2011.
3. Mohri K., Kawashima K., Kozhawa T. et al. Magneto-inductive effect (MIEffect) in amorphous wires // *IEEE Trans. Magn.* 1992. **28**. P. 3150–3156.
4. Man Q., Sun H., Dong Y. et al. Enhancement of glass-forming ability of CoFeBSiNb bulk glassy alloys with excellent soft-magnetic properties and superhigh strength // *Intermet.* 2010. **18**. P. 1876–1879.
5. Inoue A., Takeuchi A. Recent progress in bulk glassy, nanoquasicrystalline and nanocrystalline alloys // *Mater. Sci. Eng. A.* 2004. **375–377**. P. 16–30.
6. Aykol M., Akdeniz M.V., Mekhrabov A.O. Solidification behavior, glass forming ability and thermal characteristics of soft magnetic Fe–Co–B–Si–Nb–Cu bulk amorphous alloys // *Intermet.* 2011. **19**. № 9. P. 1330–1337.
7. Long Z.L., Liu W., Zhong M. et al. A new correlation between the characteristics temperature and glass-forming ability for bulk metallic glasses // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2018. **132**. № 3. P. 1645–1660.
8. Deng R.J., Long Z.L., Peng L. et al. A new mathematical expression for the relation between characteristic temperature and glass-forming ability of metallic glasses // *J. Non-Cryst. Solids.* 2020. **533**. 119829.
9. Guo S., Liu C.T. New glass forming ability criterion derived from cooling consideration // *Intermet.* 2010. **18**. № 11. P. 2065–2068.
10. Long Z.L., Xie G.Q., Wei H.Q. et al. On the new criterion to assess the glass-forming ability of metallic alloys // *Mater. Sci. Eng. A.* 2009. **509**. № 1. P. 23–30.
11. Zhang G.H., Chou K.C. A criterion for evaluating glass-forming ability of alloys // *J. Appl. Phys.* 2009. **106**. № 9. 094902.
12. Louzguine-Luzgin D.V., Bazlov A.I., Ketov S.V., Inoue A. Crystallization behavior of Fe- and Co-based bulk metallic glasses and their glass-forming ability // *Mater. Chem. and Phys.* 2015. **162**. p. 197–206.
13. Chang C., Shen B., Inoue A. Synthesis of bulk glassy alloys in the (Fe,Co,Ni)–B–Si–Nb system // *Mater. Sci. Eng. A.* 2007. **449–451**. P. 239–242.
14. Rusanov B.A., Baglasova E.S., Popel P.S., Sidorov V.E., Sabirzyanov A.A. Gamma-Densitometer for Studies of High-Temperature Metal Melts // *High Temp.* 2018. **56**. № 3. P. 439–443.
15. Sterkhova I.V., Kamaeva L.V., Lad'yanov V.I., Chtchelkatchev N.M. Role of Ta and Nb alloying elements on the viscosity of Fe–B–Si melts // *J. Mol. Liq.* 2020. **323**. 114636.
16. Parthiban R., Stoica M., Kaban I., et al. Viscosity and fragility of the supercooled liquids and melts from the Fe–Co–B–Si–Nb and Fe–Mo–P–C–B–Si glass-forming alloy systems // *Intermet.* 2015. **66**. P. 48–55.