Влияние способа выплавки прекурсора на структуру и свойства “толстого” аморфного микропровода Co-сплава

П. П. Умнов, Д. М. Панферов, Т. Р. Чуева, Н. В. Умнова, К. С. Филиппов, В. В. Молоканов

Проведен анализ двух способов выплавки модельного Co-сплава из шихтовых материалов коммерческой чистоты. Одностадийный способ — плавка в вакуумной индукционной печи и двухстадийный способ — индукционная плавка и повторный переплав слитка в вакуумной печи сопротивления, включающий комплексную металлургическую очистку расплава. Установлено, что двухстадийный переплав обеспечивает снижение содержания кислорода в прекурсоре на порядок, до 0,005 масс. %. Из стержневых прекурсоров, полученных от каждой плавки методом Улитовского – Тейлора, изготовлены микропровода диаметром 100 мкм. Установлено, что микропровода, полученные из прекурсоров обеих партий, являются аморфными. Механизм деформации микропроводов протекает с образованием сетки полос сдвига на поверхности микропровода. Микропровода, полученные из чистых по кислороду прекурсоров, обладают более высоким уровнем прочностных и пластических характеристик при растяжении и кручении. Отмечено, что при промышленном получении “толстых” аморфных микропроводов с высоким уровнем свойств целесообразно использовать для выплавки прекурсоров двухстадийный переплав, включающий стадию комплексной металлургической очистки расплава.

Ключевые слова: аморфный микропровод, метод Улитовского-Тейлора, механические свойства, прекурсор.

Введение

Новая группа “толстых” аморфных микропроводов с диаметром металлической жилы более 50 мкм, получаемых методом Улитовского – Тейлора, обладает недостижимым ранее высоким уровнем механических и магнитных свойств [1, 2]. Перспективы практического использования таких микропроводов связаны в первую очередь с созданием сверхупругих композитов, стресс-композитов, изготовлением новых видов медицинского инструмента [3]. В лаборатории аморфных сплавов Института металлургии РАН получены образцы “толстых” аморфных микропроводов с использованием высокочистых исходных материалов чистотой не ниже 99,9 % и проводятся их систематические исследования [4 – 7]. Однако, ожидаемые объемы производства “толстых” микропроводов могут быть достигнуты лишь при использовании материалов коммерческой чистоты, не превышающей, как правило, 99 %. Стеклообразующая способность и уровень механических, физических и магнитных свойств аморфных сплавов определяется составом, чистотой исходных материалов и методом выплавки прекурсора [8]. С металлургической точки зрения, расплав, из которого получают прекурсор, используемый для приготовления микропровода методом Улитовского – Тейлора, представляет собой концентрированный многокомпонентный раствор с высоким сродством к кислороду. Выбранный метод плавки должен обеспечить высокую чистоту и однородность химического состава прекурсора. Такой прекурсор должен иметь стабильные геометрические параметры, гладкую зеркальную поверхность, не содержащую дефектов и обладать устойчивостью к механическим воздействиям. Метод вакуумной индукционной плавки в атмосфере инертного газа обеспечивает процесс интенсивного перемешивания расплава и позволяет достичь требуемой химической однородности расплава в заданном объеме. Такой

способ плавки в основном используется при изготовлении аморфных лент в лабораториях и на металлургических заводах. Повысить чистоту расплава по примесям внедрения и неметаллическим включениям можно при использовании вакуумных печей сопротивления на основе технологии выплавки, включающей стадии вакуумирования и раскисления [9].

Цель работы — определение способа выплавки прекурсоров модельного $Co_{69}Fe_4Cr_4Si_{12}B_{11}$ сплава из шихтовых материалов коммерческой чистоты, обеспечивающего получение методом Улитовского – Тейлора аморфных микропроводов с высокой стеклообразующей способностью и высоким комплексом механических свойств.

Методика эксперимента

Для решения поставленной задачи были выбраны два способа плавки прекурсора сплава $Co_{69}Fe_4Cr_4Si_{12}B_{11}$:

Способ 1 — сплавление исходных компонентов и лигатур коммерческой чистоты в вакуумной индукционной печи с последующим частичным отбором прекурсоров; Способ 2 — плавка компонентов в вакуумной индукционной печи и повторный переплав слитка в вакуумной печи сопротивления, включающий стадии металлургической очистки расплава, отбор прекурсоров.

Шихтовые материалы общей массой 1 кг расплавляли в индукционной лабораторной вакуумной печи INDUTHERM в корундовом тигле. Расплав перегревали до 1550 °С, затем охлаждали до 1200 °С и проводили частичный отбор первой партии прекурсоров методом насасывания расплава в кварцевые трубки диаметром 4 мм (рис. 1*а*).

После плавки в индукционной печи оставшийся слиток массой 0,6 кг подвергали повторному переплаву в лабораторной вакуумной печи сопротивления по режиму: нагрев в атмосфере Ar до расплавления, вакуумирование до полного удаления оксидной пленки, рафинирование расплава в гелий-водородной смеси, повторное вакуумирование, гомогенизация при 1600 °С и охлаждение в аргоне, отбор второй партии прекурсоров при 1200 °С (рис. 1*б*).

Из прекурсоров, полученных способом 1 и 2, на лабораторной установке методом Улитовского – Тейлора [10] изготовлены “толстые” микропровода диаметром 100 мкм, с которых механически удалена стеклянная оболочка. Пластичность микропроводов контролировали по технологической пробе на способность к формированию полного узла без разрушения [11]. Процессы кристаллизации исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при непрерывном нагреве со скоростью 20 °С/мин на микрокалориметре Setaram Setsys Evolution. Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводили на автоматизированном рентгеновском дифрактометре ДРОН–4–07 с использованием монохроматизированного CoK_α-излучения. Испытания на одноосное статическое растяжение осуществляли на универсальной испытательной машине Instron 5848 со скоростью 2 мм/мин. Поведение микропроводов при одностороннем закручивании до разрушения исследовали на лабораторном стенде [6] на образцах аморфных микропроводов на базе l = 1000 мм при нагрузке 0,2 Н. Фрактографические исследования боковой поверхности и изломов микропроводов были проведены методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на двулучевом микроскопе FEI Versa 3D Low Vac.

Эксперимент и обсуждение результатов

Визуальным анализом установлено, что образцы обеих партий сохраняют стабильные геометрические

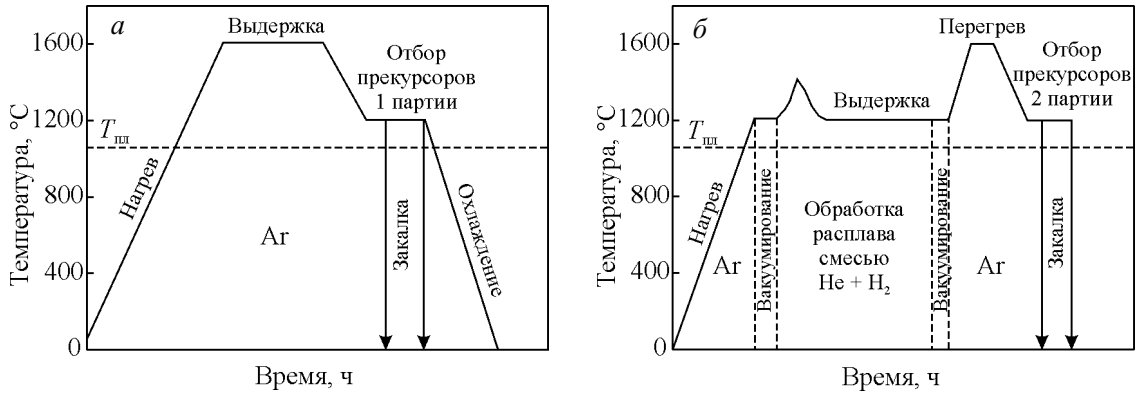


Рис. 1. Режимы плавки прекурсоров Co-сплава: *а* — в индукционной печи; *б* — в вакуумной печи сопротивления.

размеры по всей длине прекурсора (30 – 50 см), отклонение от линейности не превышает ± 2 мм. Прекурсоры имеют гладкую зеркальную поверхность. На поверхности фиксируется наличие отдельных нерегулярных газовых пор размером 0,5 – 3 мм. Содержание пор в образцах второй партии ниже, а размер пор меньше.

По результатам химического анализа прекурсоров установлено, что содержание основных компонентов сохраняется в рамках заданного химического состава в обеих партиях. Однако, использование двухстадийного способа обработки расплава позволило на порядок снизить содержание кислорода до 0,005 масс. %, и сохранить низким содержание азота до значений 0,007 масс. % (табл. 1).

Таблица 1

Результаты химического анализа прекурсора Co-сплава после плавки способами 1 и 2

Элементы	Химический состав сплава, масс. %	
	плавка по способу 1	плавка по способу 2
Co	82,1	82,5
Fe	4,1	4,1
Cr	4,3	4,1
B	2,6	2,4
Si	6,9	6,9
Примеси (Al, Ca, Mg, Ni, Ti …)	≤ 0,4	≤ 0,4
Газы O	0,02	0,005
N	0,006	0,007

Из прекурсоров, полученных плавкой способами 1 и 2, методом Улитовского-Тейлора получены образцы микропроводов диаметром 100 мкм с удаленной стеклянной оболочкой. По данным РСА структура микропроводов обеих партий является аморфной (рис. 2). Результаты ДСК анализа показали, что нет различий в механизме кристаллизации и температурах фазовых превращений микропроводов, полученных из прекурсоров обеих партий (рис. 3, табл. 2).

Результаты испытаний механических свойств микропроводов, полученных из прекурсоров первой

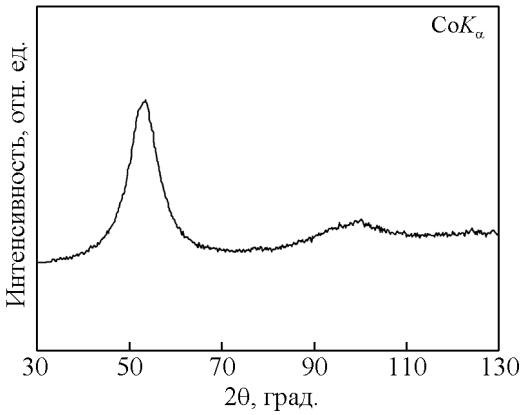


Рис. 2. Характерная дифрактограмма аморфного микропровода Co-сплава d = 100 мкм.

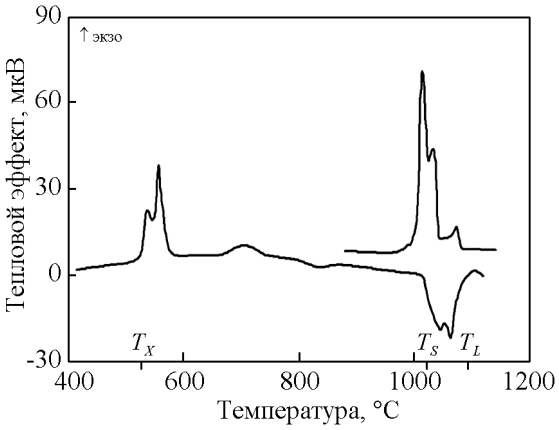


Рис. 3. Характерная термограмма аморфного микропровода Co-сплава d = 100 мкм.

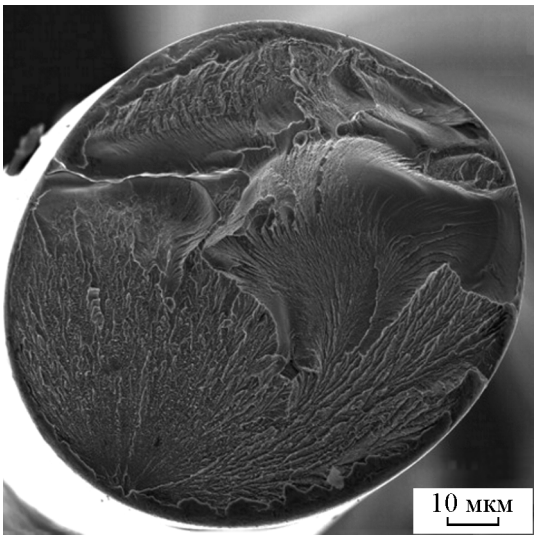
и второй партии, представлены в табл. 2. Из приведенных данных следует, что микропровода из 2 партии имеют более высокие прочностные и пластические свойства (табл. 2).

Прочность при растяжении микропроводов, полученных из 2-й партии прекурсоров, составляет 3100 МПа, что превосходит значения прочности для ряда высокопрочных сталей. По данным РЭМ после испытания на растяжение микропровода 1-й партии имеют хрупко-вязкий излом (рис. 4*а*). Излом микро-

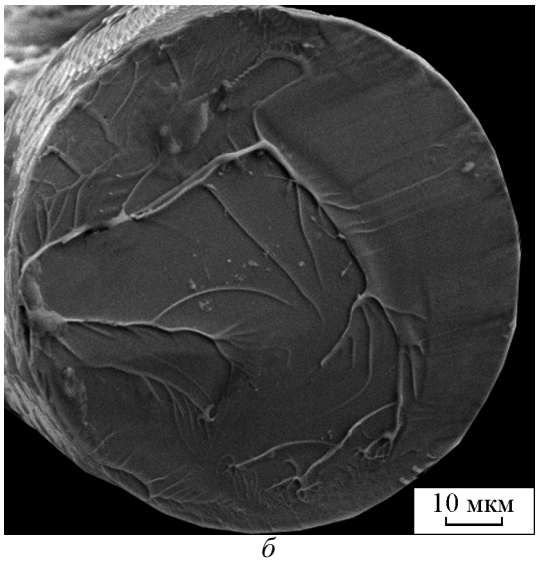
Таблица 2

Термические и механические свойства аморфных микропроводов Co-сплава диаметром 100 мкм, изготовленных из прекурсоров, полученных плавкой способами 1 и 2

Способ плавки	Термические свойства			Механические свойства		
	Температура начала кристаллизации, T_X, °C	Температура солидус, T_S, °C	Температура ликвидус, T_L, °C	Предел прочности при растяжении, σ_B, МПа	Диаметр узла при стягивании, D, мм	Число оборотов до разрушения, об/см
1	525	1025	1105	2700	~ 5	< 0,5
2	528	1026	1100	3100	< 1	1,5 – 2



а



б

Рис. 4. Вид изломов микропроводов Co-сплава d = 100 мкм после испытания на растяжение: *а* — плавка прекурсора способом 1 — хрупко-вязкий излом; *б* — плавка прекурсора способом 2 — вязкий излом.

проводов 2-й партии содержит крупные одиночные “вены” и широкую гладкую область зоны сдвига (рис. 4*б*), что характерно для вязкого излома.

Технологическая проба на способность к образованию узла (табл. 2) показала, что микропровода из второй партии прекурсоров обладают более высокой пластичностью, для них может быть получен полный узел при стягивании (рис. 5). Микропровода из первой партии прекурсоров разрушаются при затягивании в узел на диаметре узла около 5 мм.

Исследование микропроводов на кручение показало, что микропровода из 1-й партии прекурсоров разрушаются при закручивании не более чем на 0,5 об/см, а микропровода из 2-й партии — на 1,5 – 2 об/см. Пластическая деформация всех микропроводов при кручении, растяжении и изгибе протекает с образованием на поверхности микропровода сетки полос сдвига (рис. 6). Наличие такой сетки подтверждает механизм деформации, характерный для аморфных сплавов [12].

Совокупность полученных результатов показывает, что микропровода, полученные из чистых по кислороду прекурсоров, обладают более высоким уровнем прочностных и пластических характеристик

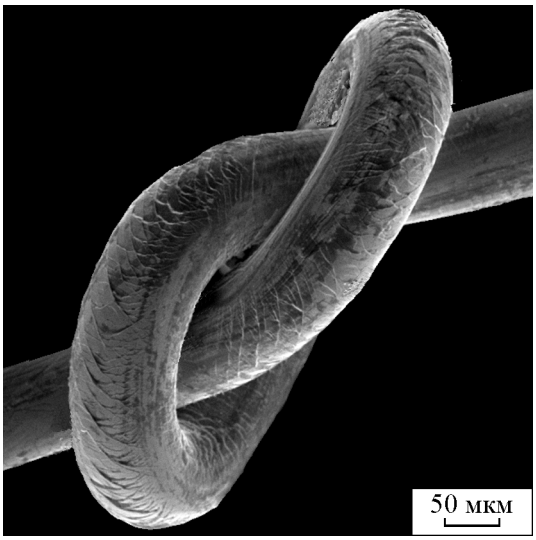


Рис. 5. Характерный вид узла аморфного микропровода, полученного из прекурсора 2-й партии.

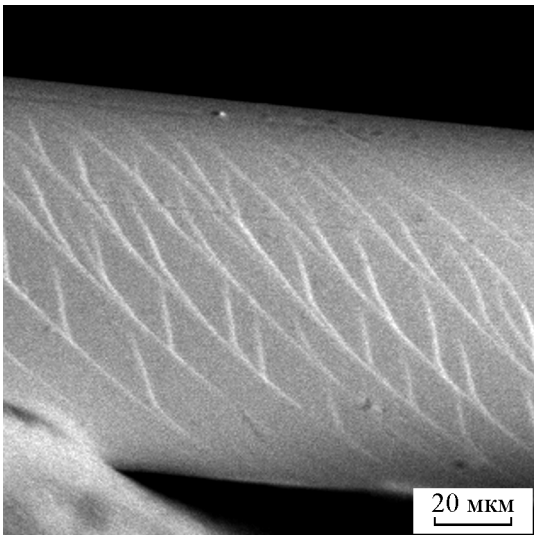


Рис. 6. Характерный вид боковой поверхности аморфных микропроводов после испытания на кручение.

при растяжении и кручении. При массовом производстве “толстых” аморфных микропроводов с высоким уровнем свойств из шихтовых материалов коммерческой чистоты целесообразно использовать для выплавки прекурсоров двухстадийный переплав, включающий стадии комплексной металлургической очистки расплава.

Выводы

1. Установлено, что двухстадийный переплав модельного сплава $Co_{69}Fe_4Cr_4Si_{12}B_{11}$ из шихтовых материалов коммерческой чистоты обеспечивает снижение содержания кислорода в прекурсоре на порядок, до значений 0,005 масс. %.

2. Результаты РСА и ДСК исследований показали, что микропровода диаметром 100 мкм, полученные из прекурсоров обеих партий, имеют аморфную структуру

3. Показано, что пластическая деформация “толстых” аморфных микропроводов протекает по механизму образования и распространения сетки полос сдвига на поверхности микропровода.

4. Микропровода, полученные с использованием двухстадийного переплава имеют более высокий уровень прочностных и пластических характеристик по сравнению с микропроводами, полученными без использования стадии очистки расплава.

5. Двухстадийный переплав, включающий стадии комплексной металлургической очистки расплава, целесообразно использовать для выплавки прекурсоров при промышленном получении “толстых” аморфных микропроводов с высоким уровнем свойств.

Литература

1. Воркачев К.Г., Мохирев И.И., Чуева Т.Р., Умнов П.П., Умнова Н.В., Молоканов В.В., Заболотный В.Т. Механические свойства “толстых” аморфных металлических проводов, полученных методом Улитовского – Тейлора. Металлы, 2010, № 4, с. 93 – 98.
2. Gudoshnikov S., Ignatov A., Tarasov V., Gorbunov S., Molokanov V., Chueva T., Usov N. Magnetoelastic properties of Co-based amorphous ferromagnetic microwires. Physica. Status Solidi A, 2015, v. 1 – 4, pp. 1 – 4.
3. Faxiang Qin, Hua-Xin Peng. Ferromagnetic microwires enabled multifunctional composite materials. Progress in Materials Science, 2013, v. 58, pp. 183 – 259.
4. Чуева Т.Р., Молоканов В.В., Заболотный В.Т., Умнов П.П., Умнова Н.В., Шалыгина Е.Е., Шалыгин А.Н., Харламова А.М. Составы, получение, структура и свойства “толстых” ферромагнитных аморфных микропроводов. Физика и химия обработки материалов, 2014, № 2, с. 48 – 55.
5. Umnov P.P., Umnova N. V., Stegnukhin A. A., Lavrenyuk A.V., Samsonova V. V., and Molokanov V.V. Effect of quenching conditions on the structure and properties of a “thick” microwire fabricated by the Ulitovskii–Taylor method. Russian Metallurgy (Metally), 2014, v. 4, pp. 263 – 266.
6. Чуева Т.Р., Молоканов В.В., Заболотный В.Т., Умнов П.П., Умнова Н.В. Формирование “толстых” пластичных аморфных ферромагнитных микропроводов, полученных методом Улитовского-Тейлора, в системе $Fe_{75}Si_{10}B_{15} – Co_{75}Si_{10}B_{15} – Ni_{75}Si_{10}B_{15}$. Перспективные материалы, 2014, № 3, с. 34 – 39.
7. Shalygina E.E., Shalygin A.N., Kharlamova A.M., Molokamov V.V., Umnova N.V., Umnov P.P. Structural and magnetic properties of “thick” Co-rich microwires produced by the Ulitovsky-Taylor method. Universal Journal of Physics and Application 2014, v. 2(3), pp. 143 – 149.
8. Molokanov V.V., Chebotnikov V.N. Glass forming ability, structure and properties of Ti- and Zr-intermetallic compound based alloys. Key Eng. Mater., 1990, v. 40 – 41, pp. 319 – 332.
9. Молоканов В.В., Шалыгин А.Н., Петржик М.И., Михайлова Т.Н., Филиппов К.С., Кашин В.И., Свиридова Т.А., Дьяконова Н.П. Влияние состояния расплава на стеклообразующую способность, структуру и свойства быстрозакаленных литых стержней объемного аморфного сплава на основе железа. Перспективные материалы, 2003, № 3, с.10 – 16.
10. Larin V.S., Torcunov A.V., Zhukov A., Gonzalez J., Vazquez M., Panina L. Preparation and properties of glass-coated microwires. J. Magn. Magn. Mater., 2002, v. 249, iss. 1 – 2, pp. 39 – 45.
11. Умнов П.П., Молоканов В.В., Куракова Н.В., Шалыгин А.Н., Гришин В.Н., Колмаков А.Г., Ковнеристый Ю.К. Дефекты и их влияние на физико-механические свойства композиционного микропровода аморфная металлическая жила – стеклянная оболочка. Деформация и разрушение материалов, 2007, № 10, с. 40 – 46.
12. Глейзер А.М., Молотилов Б.В. Структура и механические свойства аморфных сплавов. М.: Металлургия, 1992, 208 с.

References

1. Vorkachev K.G., Mokhirev I.I., Chueva T.R., Umnov P.P., Umnova N.V., Molokanov V.V., Zabolotnyi V.T. Mechanical properties of “thick” amorphous metallic wires produced by the Ulitovskii–Taylor method. *Metally — Russian Metallurgy*, 2010, vol. 7, pp. 658 – 662.
2. Gudoshnikov S., Ignatov A., Tarasov V., Gorbunov S., Molokanov V., Chueva T., Usov N. Magnetoelastic properties of Co-based amorphous ferromagnetic microwires. Physica Status Solidi A, 2015, vol. 1 – 4, pp. 1 – 4.

3. Faxiang Qin, Hua-Xin Peng. Ferromagnetic microwires enabled multifunctional composite materials. Progress in Materials Science, 2013, vol. 58, pp. 183 – 259.
4. Chueva T.R., Molokanov V.V., Zabolotnyi V.T., Umnov P.P., Umnova N.V., Shalygina E.E., Shalygin A.N., Kharlamova A.M. Sostavy, poluchenie, struktura I svoistva “tolstykh” ferromagnitnykh amorfnykh mikroprovodov [Composition, fabrication, structure and properties of “thick” ferromagnetic amorphous microwires]. *Fisika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment* (in Russ), 2014, no. 2, pp. 48 – 55.
5. Umnov P.P., Umnova N.V., Stegnukhin A.A., Lavrenyuk A.V., Samsonova V.V., Molokanov V.V. Effect of quenching conditions on the structure and properties of a “thick” microwire fabricated by the Ulitovskii–Taylor Method. *Metally — Russian Metallurgy*, 2014, vol. 4, pp. 263 – 266.
6. Chueva T.R., Molokanov V.V., Zabolotnyi V.T., Umnov P.P., Umnova N.V. Phormirovanie “tolstykh” plastichnykh amorfnykh ferromagitnykh mikroprovodov, poluchennykh metodom Ulitovskogo-Teylora, v sisteme $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ – $Co_{75}Si_{10}B_{15}$ – $Ni_{75}Si_{10}B_{15}$ [Formation of “thick” ductile amorphous ferromagnetic microwires fabricated by Ulitovskii – Taylor method in system $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ – $Co_{75}Si_{10}B_{15}$ – $Ni_{75}Si_{10}B_{15}$]. *Perspektivnye materialy — Perspective materials* (in Russ), 2014, no. 3, pp. 34 – 39
7. Shalygina E.E., Shalygin A.N., Kharlamova A.M., Molokamov V.V., Umnova N.V., Umnov P.P. Structural and magnetic properties of “thick” Co-rich microwires produced by the Ulitovsky-Taylor method. Universal Journal of Physics and Application 2014, vol. 2(3), pp. 143 – 149.
8. Molokanov V.V., Chebotnikov V.N. Glass forming ability, structure and properties of Ti- and Zr-intermetallic compound based alloys. Key Eng. Mater., 1990, vol. 40 – 41, pp. 319 – 332.
9. Molokanov V.V., Shalygin A.N., Petrzhik M.I., Mikhailova T.N., Filippov K.S., Kashin V.I., Sviridova T.A., Diakonova N.P. Vliyanie sostoyaniya rasplava na stekloobrazuyushchuyu sposobnost, strukturu i svoistva bystrozakalennykh litykh sterjnei ob’emnogo amorfnogo splava na osnove jeleza [Influence of state the melt on glass-forming ability, structure and properties of rapidly cast bulk amorphous rods of the iron-based alloy]. *Perspektivnye materialy — Advanced materials* (in Russ), 2003, no. 3, pp. 10 – 16.
10. Larin V.S., Torcunov A.V., Zhukov A., Gonzбlez J., Vazquez M., Panina L. Preparation and properties of glass-coated microwires, J. Magn. Magn. Mater., 2002, vol. 249, iss. 1 – 2, pp. 39 – 45.
11. Umnov P.P., Molokanov V.V., Kurakova N.V., Shalygin A.N., Grishin V.N., Kolmakov A.G., Kovneristy U.K. Defekty i ikh vliyanie na fisiko-mekhanicheskie svoistva komposizionnogo mikroprovoda amorfnaya metallicheskaya jila – steklyannaya obolochka [Defects and their influence on physical and mechanical properties of the composite microwires amorphous metal core – glass coat]. *Deformaziya i rasrushenie materialov — Deformation and fracture of materials* (in Russ), 2007, no. 10, pp. 40 – 46.
12. Gleizer A.M., Molotilov B.V. *Struktura i mekhanicheskie svoistva amorfnykh splavov* [Structure and mechanical properties of amorphous alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1992, 208 p.

Статья поступила в редакцию 3.12.2015 г.

Умнов Павел Павлович *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физико-химического анализа и получения аморфных и нанокристаллических сплавов.*

Панферов Дмитрий Михайлович *— — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49), инженер-исследователь, специалист в области материаловедения и машиностроения.*

Чуева Татьяна Равильевна *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физико-химического анализа и получения аморфных и нанокристаллических сплавов. E-mail: chueva.tr@gmail.com.*

Умнова Надежда Витальевна *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физико-химического анализа и получения аморфных и нанокристаллических сплавов.*

Филлипов Константин Сергеевич *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области металлургии расплавов.*

Молоканов Вячеслав Владимирович *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области физико-химического анализа и получения аморфных и нанокристаллических сплавов. E-mail: molokano@imet.ac.ru.*

The influence of the precursor melting method on structure and properties of “thick” amorphous microwires Co-alloy

P. P. Umnov, D. M. Panferov, T. R. Chueva, N. V. Umnova, K. S. Fillipov, V. V. Molokanov

In work was held the analysis of the two methods of melting the model Co-alloy of the raw materials of commercial purity. Single stage — melting in a vacuum induction furnace; and two stage — induction melting and further melting of ingot in the vacuum electric resistance furnace, which includes complex metallurgical purification of the melt. It found that the two stage remelting can reduce the oxygen content in precursors to the order to 0,005 %. Microwires with diameter of 100 microns were produced by Ulitovsky-Taylor method from rods precursors obtained from each melt. It was found that the microwires prepared from of both parties precursors were amorphous. The mechanism of deformation for microwires proceeds with the formation of netting shear bands on the surface of microwires. Microwires obtained from pure oxygen precursors have a higher level of strength and ductile characteristics under tension and torsion. It was noted that for the industrial production of «thick» amorphous microwires with a high level of properties should be used the two-stage melting for of precursors, comprising the stage of a complex metallurgical purification of melt.

Keywords: amorphous microwire, mechanical properties, precursor, Ulitovsky-Taylor method.

Umnov Pavel *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS (119991, Russia, Moscow, Leninsky pr. 49), Ph.D (Eng), senior researcher, specialist in physico-chemical analysis and preparation of amorphous and nanocrystalline alloys.*

Panferov Dmitriy *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS (119991, Russia, Moscow, Leninsky pr. 49), research engineer, materials science and engineering.*

Chueva Tatiana *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS (119991, Russia, Moscow, Leninsky pr. 49), Ph.D (Eng), senior researcher, specialist in physico-chemical analysis and preparation of amorphous and nanocrystalline alloys.*

Umnova Nadezhda *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS (119991, Russia, Moscow, Leninsky pr. 49), Ph.D (Eng), senior researcher, specialist in physico-chemical analysis and preparation of amorphous and nanocrystalline alloys.*

Filippov Konstantin *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS (119991, Russia, Moscow, Leninsky pr. 49), Ph.D (Eng), senior researcher, specialist in metallurgy of melts.*

Molokanov Vyacheslav *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS (119991, Russia, Moscow, Leninsky pr. 49), Ph.D (Eng), senior research scientist, specialist in physico-chemical analysis and preparation of amorphous and nanocrystalline alloys. E-mail: molokano@imet.ac.ru.*