

ХОЛОДНОЕ СПЕКАНИЕ НАНОКОМПОЗИТОВ Fe–Ag и Fe–Cu КОНСОЛИДАЦИЕЙ В ПОЛЕ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

© 2019 г. А.Ф. Шарипова, С.Г. Псахье, И. Готман, М.И. Лернер, А.С. Ложкомоев, Э.Ю. Гутманас

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук (СО РАН), г. Томск

Израильский технологический институт, г. Хайфа, Израиль

ОРТ Брауде колледж, г. Кармиель, Израиль

Статья поступила в редакцию 19.07.18 г., доработана 16.09.18 г., подписана в печать 18.09.18 г.

Изложены результаты получения плотных наноконкомпозитов Fe–Ag и Fe–Cu из смесей порошков, консолидированных холодным спеканием в поле высоких давлений, а также из наноразмерных порошков серебра (Ag), железа (Fe) и меди (Cu). Приведены результаты механических испытаний наноконкомпозитов Fe–Ag и Fe–Cu. Наноконкомпозитные порошки были получены помолом микронного порошка карбонильного железа (Fe) и порошка наноразмерного оксида серебра (Ag_2O), а также нанопорошков железа и оксида меди (Cu_2O) в высокоэнергетическом атриторе. Микроструктура изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения. Компакты с плотностью около 70 % от теоретической отжигались в атмосфере водорода для восстановления оксида серебра и оксида меди до металлов и удаления оксидных пленок с поверхности частиц порошка железа. За этим следовало холодное спекание – консолидация в поле высоких давлений при комнатной температуре. Получены данные по зависимости плотности образцов от давления в диапазоне 0,25–3,0 ГПа. Для всех наноконкомпозитов при давлении 3,0 ГПа достигнуты плотности более 95 % от теоретической, а для порошков Ag и Cu получена плотность около 100 %. На всех составах получены высокие механические свойства в опытах на трехопорный изгиб и на сжатие. Установлено, что механические свойства наноконкомпозитов заметно выше, чем у композитов, полученных из микронных порошков. В наноконкомпозитах Fe–Ag и Fe–Cu наблюдалась более высокая пластичность по сравнению с образцами, полученными из наноструктурного Fe.

Ключевые слова: наноконкомпозиты, железо–серебро, железо–медь, холодное спекание, механические свойства.

Шарипова А.Ф. – аспирантка, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) (634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4), Израильский технологический институт (Технион) (32000, Израиль, г. Хайфа, Технион-Сити). E-mail: aliya.f.sharipova@gmail.com.

Псахье С.Г. – докт. физ.-мат. наук, чл.-кор. СО РАН, директор ИФПМ СО РАН. E-mail: sp@ispms.tsc.ru.

Готман И. – канд. физ.-мат. наук, проф., ОРТ Брауде колледж (2161002, Израиль, г. Кармиель). E-mail: irena.gotman@gmail.com.

Лернер М.И. – докт. техн. наук, зав. лабораторией ИФПМ СО РАН. E-mail: lerner@ispms.tsc.ru.

Ложкомоев А.С. – канд. хим. наук, ст. науч. сотр. ИФПМ СО РАН. E-mail: asl@ispms.tsc.ru.

Гутманас Э.Ю. – канд. физ.-мат. наук, проф., Технион. E-mail: gutmanas@technion.ac.il.

Для цитирования: Шарипова А.Ф., Псахье С.Г., Готман И., Лернер М.И., Ложкомоев А.С., Гутманас Э.Ю. Холодное спекание наноконкомпозитов Fe–Ag и Fe–Cu консолидацией в поле высоких давлений. *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2019. No. 1. С. 67–74. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-67-74.

Sharipova A.F., Psakhie S.G., Gotman I., Lerner M.I., Lozhkomoiev A.S., Gutmanas E.Y.

Cold sintering of Fe–Ag and Fe–Cu by consolidation in high pressure gradient

The paper states the results of obtaining Fe–Ag and Fe–Cu dense nanocomposites from composite powders consolidated by cold sintering in the high pressure gradient, as well as from nanosize powders of silver (Ag), iron (Fe) and copper (Cu). The results of mechanical tests conducted on Fe–Ag and Fe–Cu nanocomposites are provided. Nanocomposite powders were obtained by high energy attrition milling of carbonyl iron (Fe) micron scale powder and nanosize silver oxide powder (Ag_2O), as well as iron and cuprous oxide (Cu_2O) nanopowders. High resolution scanning electron microscopy was used to study the microstructure. Compacts featuring approximately 70 % of full density were annealed in hydrogen atmosphere to reduce silver and cuprous oxides to metals and to remove oxide layers from the surface of iron powder particles. This was followed by cold sintering – consolidation under high pressure at a room temperature. The data on specimen density dependence on pressure in the range of 0,25–3,0 GPa were obtained. Densities were above 95 % of the full density for all nanocomposites, and close to 100 % of the full density under 3,0 GPa for Ag

and Cu powders. High mechanical properties in three-point bending and compression were observed for all nanocomposites. It was found that mechanical properties of nanocomposites are substantially higher as compared with composites obtained from micron scale powders. Higher ductility was observed in Fe–Ag and Fe–Cu nanocomposites as compared with specimens obtained from nanostructured Fe.

Keywords: nanocomposites, iron-silver, iron-copper, cold sintering, mechanical properties.

Sharipova A.F. – Ph.D. student, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS) (634055, Russia, Tomsk, Akademicheskii pr., 2/4), Israel Institute of Technology (Technion) (Technion-City, Haifa 32000, Israel). E-mail: aliya.f.sharipova@gmail.com.

Psakhie S.G. – Dr. Sci. (Phys.-Math.), corr. member of SB RAS, prof., director of ISPMS SB RAS. E-mail: sp@ispms.tsc.ru.

Gotman I. – Ph.D (Phys.-Math. Sci.), prof., ORT Braude College (Karmiel 2161002, Israel). E-mail: irena.gotman@gmail.com.

Lerner M.I. – Dr. Sci. (Tech.), head of laboratory, ISPMS SB RAS. E-mail: lerner@ispms.tsc.ru.

Lozhkomoiev A.S. – Cand. Sci. (Chem.), senior researcher, ISPMS SB. E-mail: asl@ispms.tsc.ru.

Gutmanas E.Y. – Ph.D (Phys.-Math. Sci.), prof., Technion. E-mail: gutmanas@technion.ac.il.

Citation: Sharipova A.F., Psakhie S.G., Gotman I., Lerner M.I., Lozhkomoiev A.S., Gutmanas E.Y. Cold sintering of Fe–Ag and Fe–Cu by consolidation in high pressure gradient. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 1. P. 67–74 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-67-74.

Введение

Развитие передовой экономики и высоких технологий в значительной мере определяется использованием инновационных материалов со свойствами, которые не удается получить на существующих материалах. Наноконпозиты, в частности металлические, привлекают особое внимание исследователей и разработчиков благодаря возможности достижения комбинации высоких механических, электрических, тепловых и уникальных химических свойств. Объемные образцы и детали из композитов металл–металл с очень тонкой структурой в области наноструктур могут быть получены передовыми методами порошковой металлургии — такими, как быстрое затвердевание расплавленных металлов или помол мелкодисперсных/тонких порошков в атриторе высокой энергии с последующей консолидацией порошков в режимах «температура — время выдержки», которые не приводят к огрублению наноструктуры [1–6]. Метод холодного спекания консолидацией порошков в поле высоких давлений успешно применялся для изготовления объемных материалов и изделий, в том числе и из нанопорошков [7–12]. Среди других способов получения наноконпозитов и изделий большого размера можно отметить метод перемешивания нанопорошков разных металлов [2, 9], перемешивания нанопорошков оксидов с последующим восстановлением при относительно низких температурах [10, 11], с консолидацией в условиях, обеспечивающих сохранение наноструктуры. Дополнительные методы получения наноконпозитных порошков, напри-

мер совместное восстановление растворов солей металлов [12], совместное испарение и осаждение паров двух металлов [13], электрический взрыв проволок разных металлов [14–16], не используются для изготовления деталей больших размеров. Наноструктурные материалы, в том числе наноконпозиты, получают методами интенсивной пластической деформации объемных материалов с микронными зернами: 1) равноканальным угловым прессованием (изготавливают круглые стержни) [17, 18]; 2) многократной прокаткой (листовой металл) [19, 20]. При этом в большинстве случаев состав материалов и композитов определяется сплавами, имеющимися в наличии. Стали и алюминиевые сплавы с наноструктурой и высокими механическими свойствами были получены холодным спеканием быстро охлажденных порошков [2, 21].

Наноконпозиты Fe–Ag и Fe–Cu интересны тем, что могут быть отнесены к так называемым умным материалам, обладающим высокими механическими и магнитными свойствами, сравнительно высокой электро- и теплопроводностью. Наноконпозиты Fe–Ag и Fe–Cu представляют собой наногальванические пары и могут быть использованы для создания прочных биодеградируемых имплантатов [22, 23].

В настоящей статье представлены результаты получения наноконпозитных порошков систем Fe–Ag и Fe–Cu, плотных образцов из этих порошков методом холодного спекания, исследования их микроструктуры и механических свойств.

1. Материалы и методы исследования

1.1. Приготовление нанокompозитных смесей Fe—Ag и Fe—Cu и нанопорошков Fe, Cu и Ag

Для приготовления нанокompозитных порошков Fe—Ag и Fe—Cu использовались микронные порошки карбонильного железа, оксида серебра, а также нанопорошки железа (н-Fe) и оксида меди (н-Cu₂O). Нанокompозиты Fe—10%Ag, Fe—20%Ag и Fe—25%Cu (об.%) были приготовлены помолом в атриторе высокой энергии «Union Process 01HD» (Union Process, США) в среде гексана при соотношении масс шаров и шихты 20 : 1 (2000 г шаров из нержавеющей стали и 100 г порошка). Порошок Ag₂O применяли вместо порошка Ag, так как при высокоэнергетическом помоле частицы серебра агломерируются [23]. Помол производился в течение 8 ч для смесей Fe—Ag и 6 ч — для смесей н-Fe—н-Cu₂O. Микрофотографии ВРСЭМ (сканирующая электронная микроскопия высокого разрешения) исходных порошков карбонильного железа, оксида серебра и порошка Fe—20Ag после высокоэнергетического помола приведены на рис. 1, а исходных порошков н-Fe и н-Cu₂O — на рис. 2. Нанопорошки н-Ag и н-Cu были получены помолом (4 ч) в атриторе высокой энергии с последующим восстановлением в потоке водорода при $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1 ч). Нанопорошок Fe (50 нм) был поставлен компанией «Riechest Group» (Китай).

1.2. Приготовление плотных образцов из нанокompозитов Fe—Ag и Fe—Cu и нанопорошков Fe, Cu и Ag

Для исследования зависимости плотности образцов от приложенного давления были приготовлены образцы в ячейке диаметром 10 мм в диапазоне давлений 0,25—3,0 ГПа. Для получения плотных образцов порошки компактировались до 70—80 % теоретической плотности при давлении 400 МПа. Компакты обрабатывались в потоке водорода при $t = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ ч}$, для удаления тонкого оксидного слоя с поверхности частиц (согласно [16], при такой термообработке не наблюдается огрубление микроструктуры смесей порошков Fe—Ag). Далее следовало холодное спекание — консолидация порошка в ячейках высокого давления из специальной быстрорежущей стали при комнатной температуре и давлении 3 ГПа. Для испытаний на изгиб изготавливались диски диаметром 10 мм и толщиной 1,5 мм, для испытаний на сжатие — образцы диаметром 5 мм и высотой 4 мм.

1.3. Изучение характеристик порошков и консолидированных образцов

Фазовый состав порошков до и после высокоэнергетического помола и после обработки компактов в потоке водорода исследовали с помощью дифрактометра рентгеновских лучей (XRD) «Philips

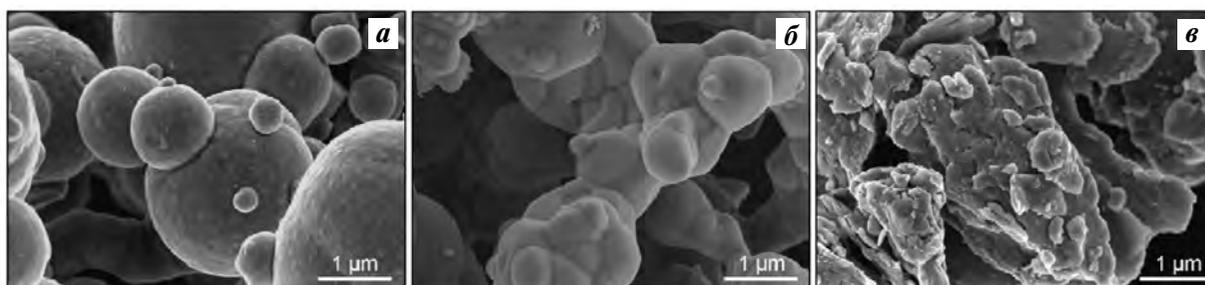


Рис. 1. Микрофотографии (ВРСЭМ) исходных порошков карбонильного железа (а), оксида серебра (б) и порошка Fe—20Ag (в) после высокоэнергетического помола

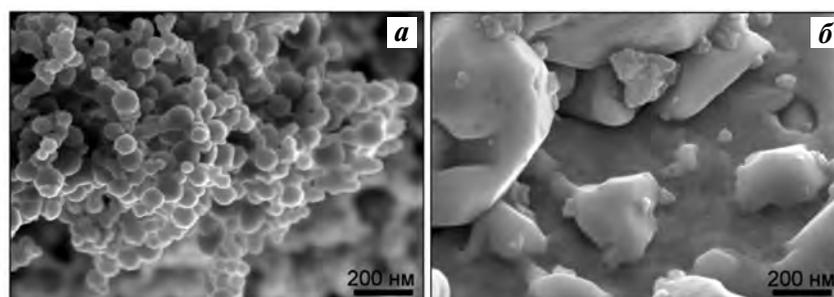


Рис. 2. Микрофотографии (ВРСЭМ) исходных порошков наножелеза (н-Fe) (а) и наноксида меди (н-Cu₂O) (б)

PW3710» (Philips, Нидерланды) с длиннофокусной трубкой, оперирующей при 40 кВ и 40 мА. Сканирование проводилось в диапазоне $2\theta = 30\div 70^\circ$ с шагом $0,02^\circ$ и выдержкой в каждой точке 2 с. Микроструктуру порошков и консолидированных образцов изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ—SEM) «Quanta 200» (FEI, США) с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (ЭДС—EDS) при напряжении 20 кВ (глубина проникновения электронов — около 1 мкм) и сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения (ВРСЭМ—HRSEM) «Ultra Plus» (Zeiss, Германия). Плотность образцов определяли методом Архимеда. Относительную плотность консолидированных образцов рассчитывали как отношение измеренной плотности к теоретической плотности смесей порошков. Испытания на сжатие и трехточечный изгиб проводили на установке «Instron 1195» (Instron, США) со скоростью нагружения 10^{-5} с^{-1} . Прочность на изгиб вычисляли по формуле

$$\sigma_{\text{и}} = 3Pl / (2bh^2), \quad (1)$$

где P — нагрузка, l — расстояние между опорами трехточечного изгиба, b — ширина образца, h — его высота. Для каждой смеси порошков было испытано не менее 3 образцов.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Микроструктура порошков после высокоэнергетического помола и термообработки в потоке водорода

Рентгенограммы смеси порошков карбонильного железа и оксида серебра до и после обработки в потоке водорода при $t = 450^\circ\text{C}$ ($\tau = 1 \text{ ч}$) для состава Fe—20Ag показаны на рис. 3.

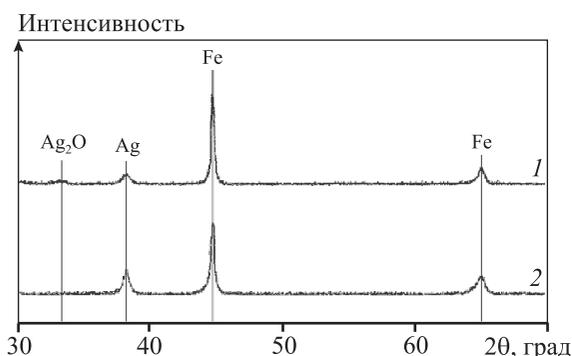


Рис. 3. Рентгенограммы нанопорошка Fe—20Ag исходного (1) и после обработки в потоке водорода при $t = 450^\circ\text{C}$, $\tau = 1 \text{ ч}$ (2)

Рентгенограммы исходных порошков н-Fe и н-Cu₂O и смеси порошков Fe—25Cu после высокоэнергетического помола и термообработки в потоке водорода при $t = 450^\circ\text{C}$, $\tau = 1 \text{ ч}$, приведены на рис. 4. Можно отметить, что отношение высот пиков на рентгенограммах (см. рис. 3 и 4) коррелирует с количественным составом нанопорошков.

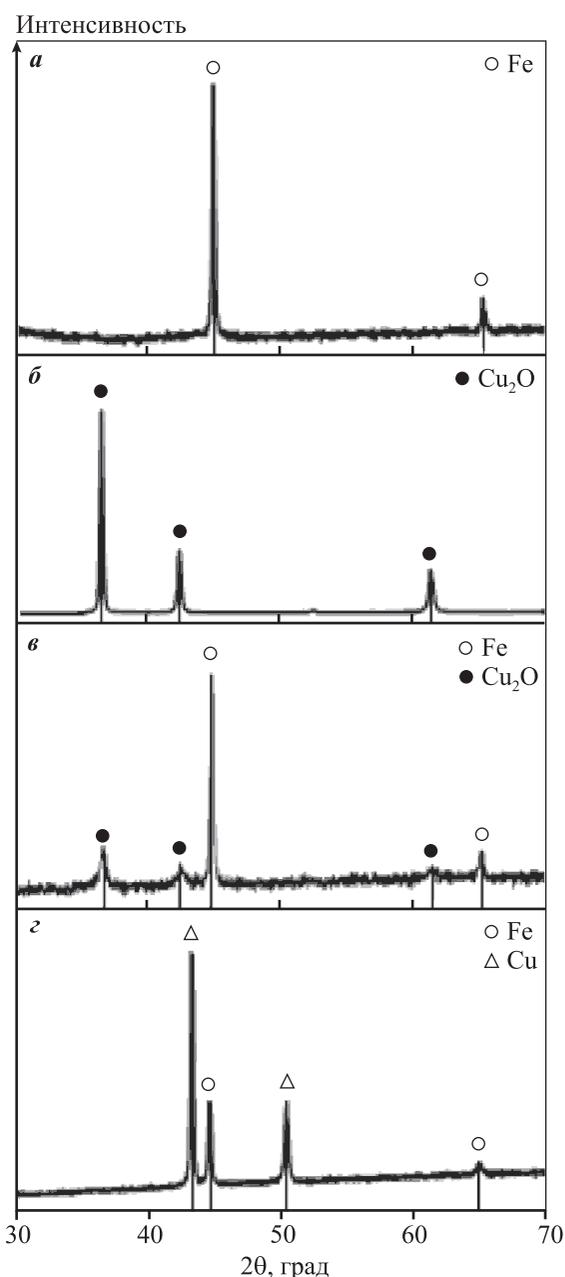


Рис. 4. Рентгенограммы исходных порошков н-Fe (а) и н-Cu₂O (б), смеси порошков н-Fe (75 мас.%) и н-Cu₂O (25 мас.%) после 6 ч высокоэнергетического помола (в) и нанокompозита Fe—25Cu (г), полученного холодным спеканием при давлении 3 ГПа молотого порошка в, термически обработанного в потоке водорода при $t = 450^\circ\text{C}$ ($\tau = 1 \text{ ч}$)

Размер зерен Fe, Ag и Cu, оцененный по уширению пиков, составил 27 ± 4 нм для Fe, 18 ± 3 нм для Ag и 22 ± 4 нм для Cu.

Fe и Cu, как и Fe и Ag, — несмешивающиеся металлы, поэтому высокоэнергетический помол не приводит к механическому легированию. Из рентгенограмм видно, что термообработка в потоке водорода обуславливает восстановление оксида серебра и оксида меди.

2.2. Холодное спекание нанокompозитных порошков Fe—Ag и Fe—Cu и нанопорошков Fe, Cu и Ag

Графики зависимости относительной плотности образцов Fe—10Ag, Fe—20Ag и Fe—25Cu как функции приложенного давления при консолидации приведены на рис. 5, а. При давлении $P = 3$ ГПа плотность состава Fe—20Ag достигла 99 % от теоретической, для Fe—10Ag — 98,5 %, а для Fe—25Cu — 98 %. На рис. 5, б представлены зависимости плотности от давления для нанопорошка Fe и нанопорошков Ag и Cu, полученных восстановлением в потоке водорода оксида серебра (Ag_2O) и оксида меди (Cu_2O). Более высокие значения плотности для состава Fe—20Ag можно объяснить более высокой пластичностью и сжимаемостью нано-Ag (см. рис. 5, б). Плотность образцов Fe—25Cu (98 %), полученных холодным спеканием при $P = 3$ ГПа, на 4 % выше, чем у образцов из нанокompозитных

порошков близкого состава Fe—28Cu, полученных взрывом проволок [14].

Следует отметить, что после восстановления оксидной пленки на частицах компактов в потоке водорода при $t = 450$ °C на их поверхности остается по крайней мере мономолекулярный слой оксида, что для частиц размером 50 нм, по оценкам [16], соответствует ~1 % общей плотности, так как плотность оксидов Fe, Cu и Ag ниже плотности металлов.

Микрофотографии ВРСЭМ поверхности образцов, полученных холодным спеканием при $P = 3$ ГПа нанопорошков Fe—20Ag, Fe—25Cu после обработки в потоке водорода при $t = 450$ °C и порошка Ag, восстановленного из оксида серебра при $t = 200$ °C, а также образца состава Fe—10Ag, полученного холодным спеканием перемешанной вручную смеси карбонильного железа с оксидом серебра, приведены на рис. 6.

Можно видеть, что для всех образцов достигнута высокая плотность. Плотность ≈ 100 % от теоретической получена для образца из нанопорошка Ag и образца из перемешанной вручную смеси карбонильного железа с оксидом серебра Fe—10Ag.

2.3. Механические свойства нанокompозитов Fe—Ag, Fe—Cu, полученных холодным спеканием

Кривые зависимости деформации от напряжения на изгиб образцов из нанокompозитных

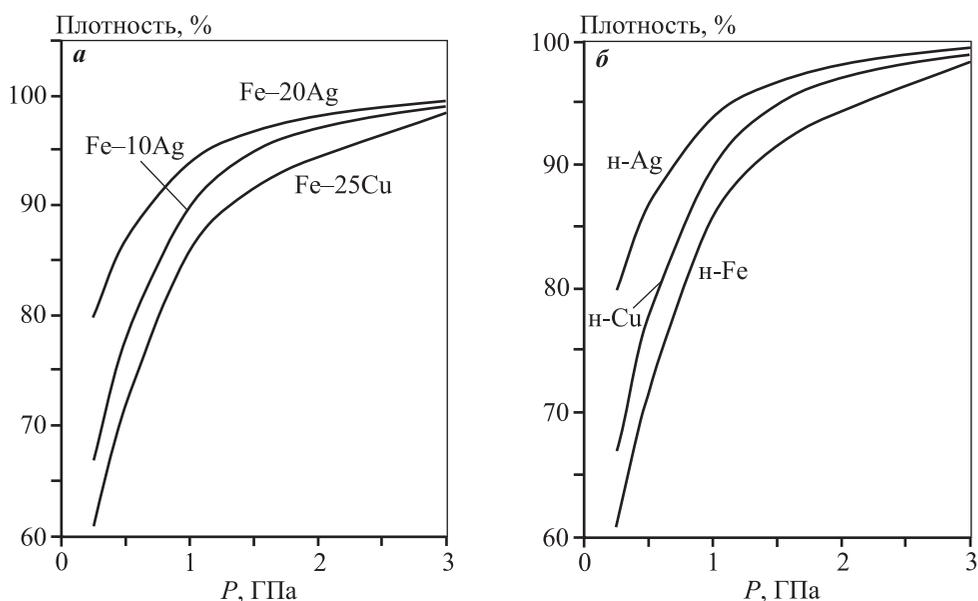


Рис. 5. Относительная плотность образцов, прошедших обработку в потоке водорода при $t = 450$ °C, $\tau = 1$ ч, как функция от приложенного давления

а — нанокompозитные порошки Fe—10Ag, Fe—20Ag и Fe—25Cu; б — нанопорошки Fe, Ag и Cu

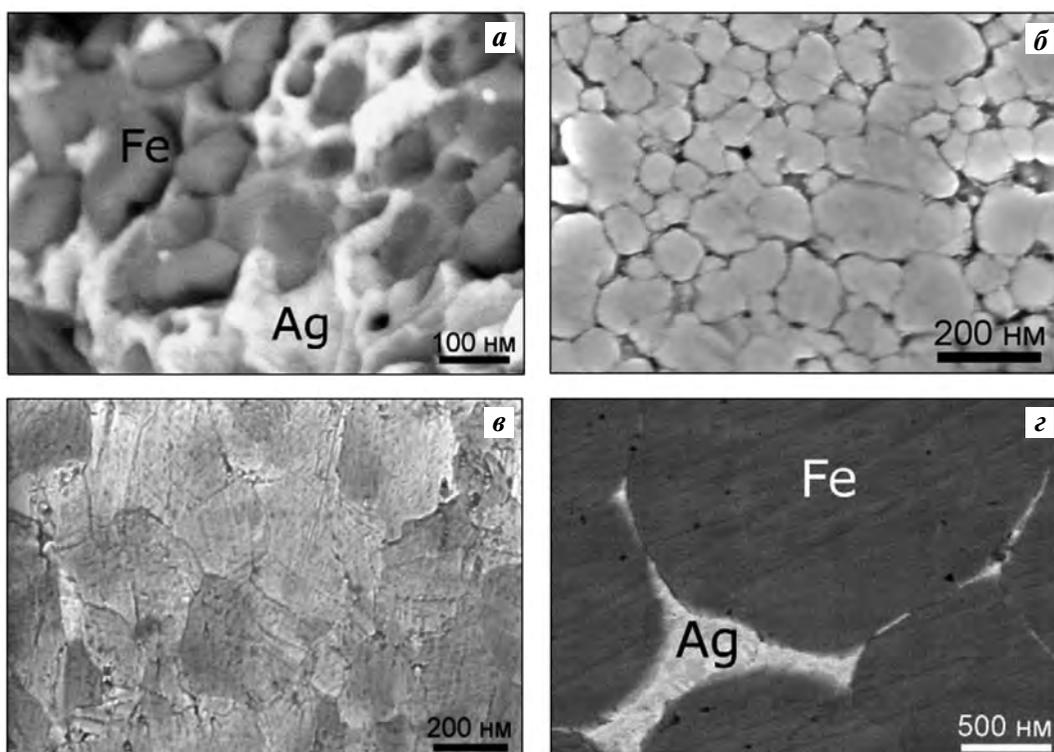


Рис. 6. Микрофотографии (ВРСЭМ) поверхности образцов, полученных холодным спеканием при $P = 3$ ГПа нанокompозитных порошков Fe–20Ag (а), Fe–25Cu (б), порошка Ag, восстановленного из оксида серебра в потоке водорода при $t = 200$ °C (в) и образца Fe–10Ag, полученного холодным спеканием перемешанной вручную смеси карбонильного железа с оксидом серебра (г)

порошков Fe–10Ag, Fe–20Ag и Fe–25Cu, полученных холодным спеканием при $P = 3$ ГПа и прошедших обработку в потоке водорода при $t = 450$ °C, $\tau = 1$ ч, приведены на рис. 7. Очень высокая прочность на изгиб — выше 1000 МПа — была достигнута для образцов, полученных холодным спеканием нанокompозитного порошка Fe–10Ag. Для образцов, полученных холодным спеканием нанокompозитных порошков Fe–20Ag и Fe–25Cu, также характерны высокие значения прочности на изгиб — более 800 МПа. У всех образцов наблюдалась высокая пластичность. Микрофотографии поверхностей излома образцов Fe–20Ag и Fe–25Cu, полученных холодным спеканием при $P = 3$ ГПа после обработки компактов 70 %-ной (от теор.) плотности в потоке водорода при $t = 450$ °C, $\tau = 1$ ч, показаны на рис. 8. Поверхность разрушения соответствует выраженной пластической деформации.

Для нанокompозитов, полученных холодным спеканием, в опытах на сжатие наблюдались высокие значения предела текучести (σ_T): 830 МПа для Fe–10Ag, 785 МПа для Fe–20Ag и 720 МПа для Fe–25Cu. Для образцов, полученных холодным

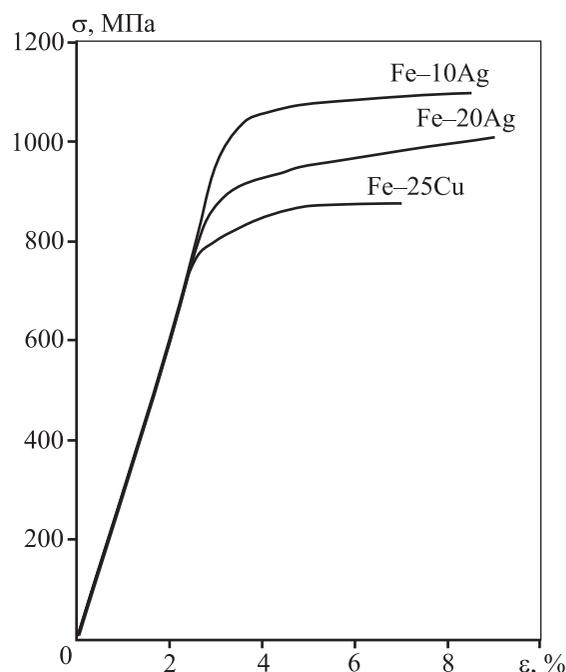


Рис. 7. Кривые зависимости напряжения на изгиб от деформации образцов, полученных холодным спеканием при $P = 3$ ГПа после обработки компактов 70 %-ной плотности в потоке водорода при $t = 450$ °C, $\tau = 1$ ч

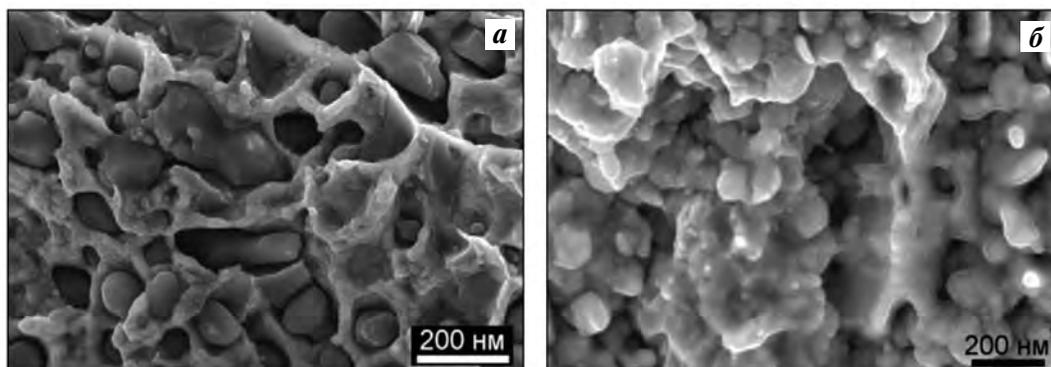


Рис. 8. Микрофотографии (ВРСЭМ) поверхности излома образцов, полученных холодным спеканием при $P = 3$ ГПа нанокompозитных порошков Fe–20Ag (а) и Fe–25Cu (б) после обработки компактов 70 %-ной (от теор.) плотности в потоке водорода при $t = 450$ °С, $\tau = 1$ ч

спеканием нанопорошка Fe при $P = 3$ ГПа, предел текучести на сжатие $\sigma_T = 1080$ МПа. В работе [7] для образцов, полученных холодным спеканием нанопорошка Fe с размером частиц 30 нм, были получены близкие значения σ_T . Предел текучести образцов, полученных холодным спеканием нанопорошка Cu, составил $\sigma_T = 380$ МПа. Это значение несколько выше предела текучести образцов, полученных холодным спеканием нанопорошка Cu из восстановленного в потоке водорода при $t = 300$ °С оксида меди CuO [10]. Для образцов, полученных холодным спеканием нанопорошка Ag, $\sigma_T = 245$ МПа.

Следует отметить, что плотные образцы, полученные холодным спеканием нанопорошков Fe–10Ag, Fe–20Ag и Fe–25Cu, становятся постоянными магнитами после намагничивания в магнитном поле. Образцы Fe–20Ag и Fe–25Cu, обладая высокой прочностью, по предварительным результатам показывают высокую электропроводность.

Выводы

1. Нанокompозитные порошки Fe–10Ag, Fe–20Ag и Fe–25Cu получены помолот микронных порошков карбонильного железа и оксида серебра, а также нанопорошков Fe и оксида меди в высокоэнергетическом атриторе с последующим восстановлением оксидов и оксидных пленок на поверхности частиц в потоке водорода при $t = 450$ °С.

2. Холодным спеканием — консолидацией нанокompозитных порошков Fe–10Ag, Fe–20Ag и Fe–25Cu в поле высоких давлений при $P = 3$ ГПа — достигнуты плотности, близкие к теоретическим значениям, при сохранении наноструктуры.

3. Повышенная прочность на изгиб >1000 МПа для Fe–10Ag, >900 МПа для Fe–20Ag и >800 МПа для Fe–25Cu, а также высокая пластичность наблюдались у образцов, полученных при $P = 3$ ГПа. Высокие значения предела текучести (>700 МПа) и пластичности (>20 %) отмечены у образцов всех составов: Fe–10Ag, Fe–20Ag и Fe–25Cu.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013—2020 годы (направление III.23).

Литература/References

1. Lenel F.V. Powder metallurgy: principles and applications. Princeton, NJ, USA: MPIF, 1980.
2. Gutmanas E.Y. Materials with fine microstructures by advanced powder metallurgy. *Prog. Mater. Sci.* 1990. Vol. 34. P. 261–366.
3. Gutmanas E.Y. Cold-sintering — high pressure consolidation. In: *ASM Handbook. Powder Metal Technologies and Applications*. Vol. 7. ASM Int., Materials Park, OH, USA, 1998. P. 574–583.
4. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling. *Prog. Mater. Sci.* 2001. Vol. 46. P. 1–184.
5. Ma E. Alloys created between immiscible elements. *Prog. Mater. Sci.* 2005. Vol. 50. P. 413–509.
6. Herr U., Ying J., Gonser U., Gleiter H. Alloy effects in consolidated binary mixtures of nanometer-sized crystals investigated by Mossbauer spectroscopy. *Solid State Commun.* 1990. Vol. 76. P. 197–202.
7. Gutmanas E.Y., Rabinkin A., Roitberg M. Cold sintering under high pressure. *Scr. Metall.* 1979. Vol. 13. P. 11–15.
8. Gutmanas E.Y. Cold sintering under high pressure — mechanisms and application. *Powder Metall. Int.* 1983. Vol. 15. P. 129–132.

9. Gutmanas E.Y., Trusov L.K., Gotman I. Consolidation, microstructure and mechanical properties of nanocrystalline metal powders. *Nanostruct. Mater.* 1994. Vol. 4. P. 893—901.
10. Gutmanas E.Y., Trudler A., Gotman I. Processing and properties of dense Cu nanocomposites. *Mater. Sci. Forum.* 2002. Vol. 386—388. P. 329—334.
11. Karwan-Baczewska J., Gotman I., Gutmanas E.Y., Shapiro M. Small particles with better contacts make nanocomposites kings of conductivity. *Metal Powder Report.* 2005. Vol. 60 (6). P. 28—34.
12. Toshima N., Yonezawa T. Bimetallic nanoparticles — novel materials for chemical and physical applications. *New J. Chem.* 1998. Vol. 22. P. 1179—1201.
13. Gleiter H. Nanocrystalline materials. *Progr. Mater. Sci.* 1989. Vol. 33. P. 223—315.
14. Kotov Y.A. Electric explosion of wires as a method for preparation of nanopowders. *J. Nanoparticle Res.* 2003. Vol. 5. P. 539—550.
15. Lerner M.I., Pervikov A.V., Glazkova E.A., Svarovskaya N.V., Lozhkomoev A.S., Psakhie S.G. Structures of binary metallic nanoparticles produced by electrical explosion of two wires from immiscible elements. *Powder Technol.* 2016. Vol. 288. P. 371—378.
16. Lerner M.I., Psakhie S.G., Lozhkomoev A.S., Sharipova A.F., Pervikov A.V., Gotman I., Gutmanas E.Y. Fe—Cu nanocomposites by high pressure consolidation of powders prepared by electric explosion of wires. *Adv. Eng. Mater.* 2018. Vol. 20. No. 1701024. P. 1—6.
17. Segal V.M. Equal channel angular extrusion: from macro-mechanics to structure formation. *Mater. Sci. Eng.* 1999. Vol. A271. P. 322—333.
18. Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T.G., Zechetbauer M.J., Zhu T.T. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation: ten years later. *JOM.* 2016. Vol. 68. P. 1216—1226.
19. Bachmaier A., Pippan R. Generation of metallic nanocomposites by severe plastic deformation. *Int. Mater. Rev.* 2013. Vol. 58. P. 41—62.
20. Viswanathan V., Laha T., Balani K., Agarwal A., Seal S. Challenges and advances in nanocomposite processing techniques. *Mater. Sci. Eng. Rep.* 2006. Vol. 54. No. 5—6. P. 121—285.
21. Botstein O., Gutmanas E.Y., Lawley A. Stability and mechanical behavior of cold sintered P/M aluminium alloys. *Modern Dev. Powder Met. MPIF.* 1985. Vol. 15. P. 761—773.
22. Sharipova A., Psakhie S.G., Swain S.K., Gotman I., Gutmanas E.Y. High-strength bioresorbable Fe—Ag nanocomposite scaffolds: processing and properties. In: *AIP Conf. Proc.* 2015. Vol. 1683. No. 020244.
23. Sharipova A., Swain S.K., Gotman I., Starosvetsky D., Psakhie S.G., Unger R., Gutmanas E.Y. Mechanical, degradation and drug-release behavior of nano-grained Fe—Ag composites for biomedical applications. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2018. Vol. 86. P. 240—249.