

УДК 541.135.3 : 669.295

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-3-4-10

Объемное восстановление расплава $\text{FeCl}_2\text{--CaCl}_2$ кальцием, растворенным в хлориде кальция

© 2018 г. В.В. Поляков, А.В. Бабин, В.А. Лебедев

Уральский федеральный университет (УрФУ) имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 26.07.17 г., доработана 15.12.17 г., подписана в печать 22.01.18 г.

Цель данного исследования – получение высокодисперсного порошка, пригодного для сфероидизации, с последующим использованием его в аддитивных технологиях. Объемным восстановлением расплава $\text{FeCl}_2\text{--CaCl}_2$ кальцием, растворенным в CaCl_2 , получен мелкодисперсный порошок железа. Процесс состоял из трех стадий: приготовление расплавов, содержащих FeCl_2 и Ca, их смешение и высокотемпературная выдержка при 800 °С в течение 1 ч. По окончании процесса застывший плав разделяли на верхнюю и придонную части. Продукт из верхней части имел удельную поверхность 7,60 м²/г, а из нижней – 5,38 м²/г. Средний размер частиц в первом случае составлял 157 мкм, а в последнем – 124 мкм. После ультразвукового диспергирования он уменьшился до 26 и 71 мкм соответственно. Количественный рентгенофазовый анализ показал, что основная фаза порошка – металлическое железо (более 97 мас.%). Таким образом, оригинальность исследования состоит в применении объемного, интенсивного восстановления железа из хлоридных расплавов кальцием, растворенным в его хлориде. Уникальность работы заключается в полученном продукте – основная часть восстановленного железа находится в объеме расплава в виде линейных сростков длиной 40–600 мкм, диаметром 10–50 мкм, легко разрушающихся при ультразвуковом диспергировании на отдельные кристаллы, средний размер которых составляет 26 мкм. Результаты исследования показали возможность реализации процесса кальцийтермического получения мелкодисперсного железного порошка.

Ключевые слова: расплав Ca– CaCl_2 , расплав $\text{FeCl}_2\text{--CaCl}_2$, смешение расплавов, кальцийтермическое восстановление, микрофотографии, рентгенофазовый анализ, гранулометрия, ультразвуковое измельчение, аддитивные технологии.

Поляков В.В. – аспирант кафедры металлургии цветных металлов (МЦМ) УрФУ (620000, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: aheon@mail.ru.

Бабин А.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры МЦМ УрФУ. E-mail: babinav@mail.ru.

Лебедев В.А. – докт. хим. наук, профессор кафедры МЦМ УрФУ. E-mail: v.a.lebedev@urfu.ru.

Для цитирования: Поляков В.В., Бабин А.В., Лебедев В.А. Объемное восстановление расплава $\text{FeCl}_2\text{--CaCl}_2$ кальцием, растворенным в хлориде кальция // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2018. No. 3. С. 4–10. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-3-4-10.

Polyakov V.V., Babin A.V., Lebedev V.A.

$\text{FeCl}_2\text{--CaCl}_2$ melt volumetric reduction by calcium dissolved in calcium chloride

The purpose of this study is to obtain highly dispersed powder suitable for spheroidization for further application in additive technologies. Volumetric reduction of the $\text{FeCl}_2\text{--CaCl}_2$ melt by calcium dissolved in CaCl_2 produced fine iron powder. The process consisted of three stages: preparation of melts containing FeCl_2 and Ca, their mixing and high-temperature aging at 800 °C for 1 hour. At the end of the process the frozen melt was divided into upper and bottom parts. The product from the upper part had a specific surface area of 7,60 м²/g, and for the lower part it was 5,38 м²/g. Average particle size was 157 μm for the former and 124 μm for the latter. After ultrasonic dispersion, it was reduced to 26 μm and 71 μm, respectively. Quantitative X-ray phase analysis showed that the main phase of powder is metallic iron (more than 97 wt.%). Therefore, research originality is the use of volumetric, intensive reduction of iron from chloride melts by calcium dissolved in its chloride. The uniqueness of the study consists in the product obtained, i.e. the main part of reduced iron is in the melt volume as linear aggregates 40 to 600 μm in length, 10 to 50 μm in diameter that are easily broken by ultrasonic dispersion into individual crystals with an average size of 26 μm. The results of the study demonstrated the feasibility of calcium-thermal production of fine iron powder.

Keywords: Ca– CaCl_2 melt, $\text{FeCl}_2\text{--CaCl}_2$ melt, melt mixing, calcium-thermal reduction, microphotographs, X-ray phase analysis, granulometry, ultrasonic grinding, additive technologies.

Polyakov V.V. – Postgraduate student, Department of metallurgy of non-ferrous metals, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU) (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: aheon@mail.ru.

Babin A.V. – Cand. Sci. (Tech.), Assistant prof., Department of metallurgy of non-ferrous metals, UrFU. E-mail: babinav@mail.ru.

Lebedev V.A. – Dr. Sci. (Chem.), Prof., Department of metallurgy of non-ferrous metals, UrFU. E-mail: v.a.lebedev@urfu.ru.

Citation: Polyakov V.V., Babin A.V., Lebedev V.A. Ob'ёмное восстановление расплава $\text{FeCl}_2\text{--CaCl}_2$ kal'tsiem, rastvorennym v khlориде kal'tsiya. Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya. 2018. No. 3. P. 4–10. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-3-4-10.

Введение

В настоящее время железные порошки, в зависимости от предъявляемых к ним требований [1] и вида исходного сырья, производят различными способами [2–4]. Общепринято разделять эти методы на механические (измельчение, распыление потоками газа, жидкости [5] или на вращающемся диске [6], плазменная обработка [7, 8]) и физико-химические. Железный порошок, полученный механическим способом, не отличается по химическому составу от исходного материала, более того, во время измельчения происходит его загрязнение истирающими частицами мельницы. Электролитические технологии малопроизводительны и энергозатратны.

В связи с этим одним из основных способов получения порошков железа является химическое восстановление, где в качестве восстановителя используют твердый углерод [9–11], водород [12–14], СО [15, 16] или щелочные металлы. Однако в связи с ограниченностью поверхности восстановления (на границе раздела расплав–восстановитель) процесс занимает продолжительное время.

В представленной работе предложен метод получения мелкодисперсного порошка железа путем кальцийтермического восстановления хлорида двухвалентного железа. Его отличием от классической кальцийтермии является то, что кальций растворен в собственном хлориде. Объемное восстановление позволяет значительно интенсифицировать процесс восстановления солевого расплава. Благодаря тому, что кальций растворен во всем объеме расплава, основная часть полученного порошка после ультразвукового диспергирования имеет размер частиц от 10 до 60 мкм, что соответствует требованиям, предъявляемым к порошкам железа для аддитивных технологий и может использоваться в них в качестве исходного сырья после проведения классификации и сфероидизации различными методами [6–8].

Востребованность деталей из железа и сплавов на его основе, напечатанных на 3D-принтерах, обуславливает ежегодный стабильный рост индустрии аддитивных технологий [17–20]. Последние позволяют создавать детали сложной формы, которые в настоящее время невозможно либо достаточно трудоемко изготовить, используя традиционные процессы [21].

Методика проведения эксперимента

Восстановление железа растворенным в CaCl_2 кальцием проводили в расплаве $\text{BaCl}_2\text{—CaCl}_2\text{—FeCl}_2$. Индивидуальные хлориды бария и кальция предварительно сушили при температурах 150 °С в течение 2 ч, 200 °С — 1,5 ч, 300 °С — 1,5 ч, 400 °С — 1 ч и 500 °С — 1 ч. Эвтектическую смесь состава, мол. %: 36 BaCl_2 —64 CaCl_2 с $t_{\text{пл}} = 592$ °С плавил при температуре 800 °С и в дальнейшем использовали в качестве легкоплавкого электролита для анодного растворения железа.

Устройство электролитической ячейки для получения Fe-содержащего расплава показано на рис. 1.

Железный анод 6 изготовлен в виде трубы, внутри которой размещено катодное устройство, представляющее собой фарфоровую трубку 5 с эвтектической смесью хлоридов бария и кальция. Асбестовая диафрагма в нижней части катодной трубки обеспечивает разделение католита и анолита. В процессе электролиза происходит накопление ионов железа в электролите $\text{BaCl}_2\text{—CaCl}_2$ 8 и выделение кальция на железном токоподводе в катодном устройстве 3. Использование эвтектической смеси хлоридов бария и кальция позволило значительно снизить рабочую температуру расплава до 650–630 °С по сравнению с

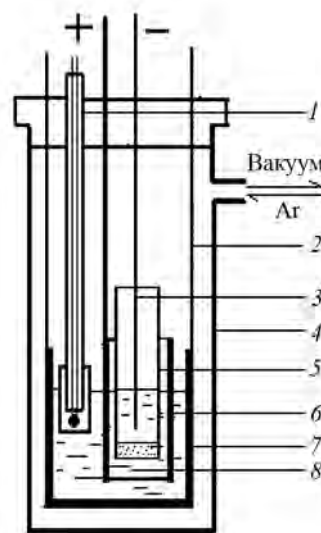


Рис. 1. Устройство электролитической ячейки для получения Fe-содержащего расплава

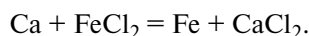
1 — хромель-алюмелевая термопара, 2 — железная подвеска тигля, 3 — железный катод, 4 — кварцевая ячейка, 5 — катодная фарфоровая трубка, 6 — железная анодная трубка, 7 — стеклоглиноуглеродный тигель, 8 — анолит

температурой плавления CaCl_2 (772 °С) и уменьшить испарение хлоридов железа. Температура контролировалась хромель-алюмелевой термопарой 1.

Для предотвращения гидролиза солей анодное растворение железа проводилось в атмосфере аргона, предварительно очищенного от примесей пропусканием над нагретой до 800 °С стружкой титана. Конечная концентрация железа в расплаве определялась по убыли массы анода, и она составила 6,5 мас.%, что совпадало с рассчитанной по количеству пропущенного электричества, если принять, что растворение металла протекает с образованием FeCl_2 .

Расплав CaCl_2 получен в результате 2-часовой выдержки кальция в его хлориде в стальном тигле при $t = 860$ °С в атмосфере очищенного аргона. Хлорид кальция был предварительно просушен, прокален и переплавлен. Согласно результатам выполненного титриметрического анализа концентрация растворенного кальция в расплаве CaCl_2 составила 7,64 мас.% (18,67 мол.%). По данным [22] в расплавленном CaCl_2 при $t = 1073$ К растворяется до 13 мас.% (29,3 мол.%) кальция. Близкие результаты приведены в монографии [23]. Согласно опубликованной в ней диаграмме состояния $\text{Ca}-\text{CaCl}_2$ максимальная растворимость кальция в CaCl_2 достигается при 830 °С и составляет 20 мол.%. По данным работы [24] растворимость кальция в CaCl_2 при 825 °С составляет 7,5 мас.% (18,2 мол.%).

Для изучения восстановительной способности Са-содержащего расплава по отношению к железу и характера получаемого продукта в стальной тигель были загружены предварительно приготовленные солевые плавы $\text{BaCl}_2-\text{CaCl}_2-\text{FeCl}_2$ и $\text{Ca}-\text{CaCl}_2$. Содержание железа (1,855 г) и кальция (1,352 г) в исходном расплаве было близким к стехиометрическому соотношению для реакции



Тигель с расплавом выдерживался при $t = 800$ °С в течение 1 ч в атмосфере очищенного аргона и охлаждался до комнатной температуры.

Результаты исследований и их обсуждение

Полученный солевой плав разделили на верхнюю ($\approx 2/3$) и нижнюю ($\approx 1/3$) части. Для извлечения частиц железа обе части солевого плава раздельно растворяли в дистиллированной во-

де, в которой хлориды растворялись, а железный порошок выпадал в осадок. Маточные растворы декантировали, а полученные железные осадки многократно промывали водой и фильтровали. Окончательную промывку на фильтре осуществляли этиловым спиртом для ускорения сушки на воздухе и предотвращения окисления железных порошков. Масса осадка при растворении верхней части плава составила 1,401 г, а нижней — 0,262 г. Судя по этим данным можно сделать вывод, что практически все восстановленное железо находилось в солевом расплаве во взвешенном состоянии.

Всего удалось собрать 1,663 г железного продукта, т.е. выход составил 90 %, что обусловлено, прежде всего, потерей наиболее мелких Fe-частиц с декантированным маточным раствором и промывными водами.

Микрофотографии железных порошков, полученные с использованием микроскопа Микромед с Levenhuk M200 BASE, из верхней и нижней частей плава, приведены на рис. 2. Видно, что мелкие зерна кристаллов железа в обоих случаях име-

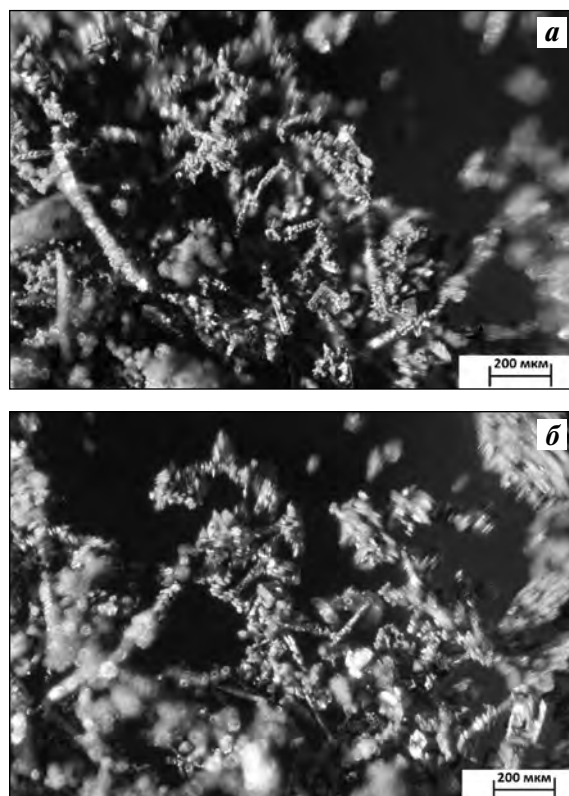


Рис. 2. Микрофотографии железного продукта, полученного из верхней (а) и нижней (б) частей плава

Увеличение — 100 \times

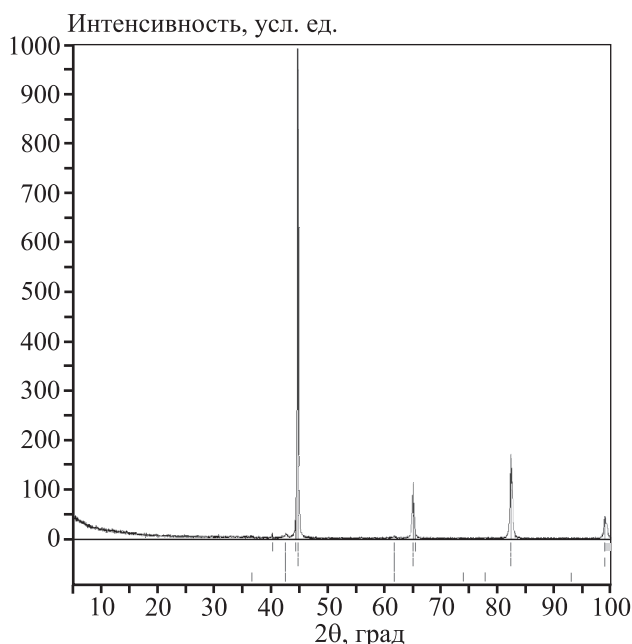


Рис. 3. Рентгенограмма железосодержащего продукта

ют примерно одинаковый размер ($\sim 10\div 50$ мкм) и срastaются в линейные и объемные конгломераты, однако в нижних слоях плава доля лучше сформированных сростков объемного образования больше, чем в верхних.

Количественный рентгенофазовый анализ, выполненный в Институте химии твердого тела УрО РАН (г. Екатеринбург), показал, что основная фаза порошка — металлическое железо (более 97 мас.%). Поскольку доля примесных фаз крайне мала и соответствующих им пиков всего три, проведение их идентификации затруднено (рис. 3).

Гранулометрический анализ железного продукта из верхней и нижней частей солевого плава проводили в Институте высокотемпературной электрохимии УрО РАН (г. Екатеринбург) на приборе Mastersizer 2000 в стандартных условиях (водная суспензия, механическое перемешивание с использованием мешалки в измерительной кювете) с предварительным ультразвуковым диспергированием.

Распределение по фракциям железного порошка из верхней части плава показано на рис. 4. Видно, что гранулометрический состав материала в стандартных условиях находится в широких пределах (35—560 мкм) с доминирующим размером 157 мкм (рис. 4, а), а после ультразвукового диспергирования он колеблется в интервале от 5 до 85 мкм с основным размером частиц 26 мкм (рис. 4, б).

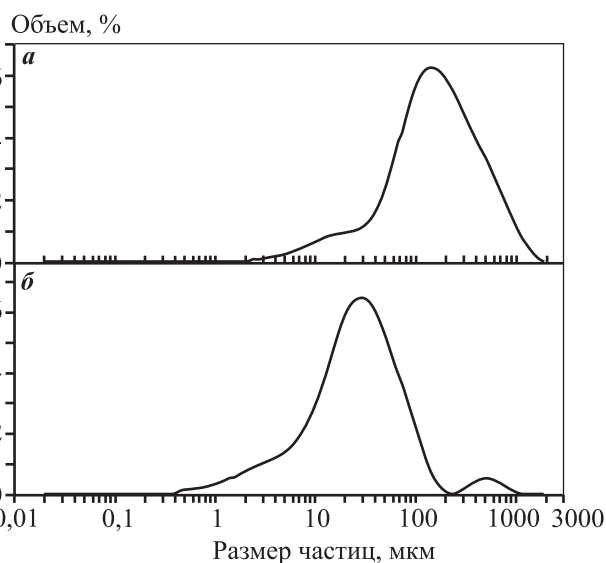


Рис. 4. Результаты гранулометрического анализа железного материала из верхней части плава

а — в стандартных условиях;

б — после ультразвукового диспергирования

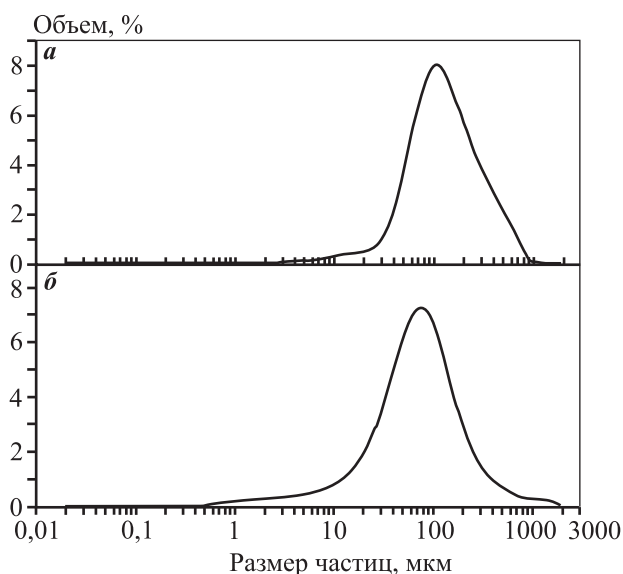


Рис. 5. Результаты гранулометрического анализа железного материала из нижней части плава

а — в стандартных условиях;

б — после ультразвукового диспергирования

Распределение по фракциям железного материала из нижней части плава демонстрирует рис. 5. Наблюдается более узкий фракционный диапазон (48—375 мкм) по сравнению с продуктом из верхней части и меньший средний размер частиц — 124 мкм (рис. 5, а). После ультразвукового диспергирования (рис. 5, б) материал существенно не

измельчился и закономерно оказался более крупным: гранулометрический состав находится в интервале от 17 до 225 мкм с основным размером частиц 71 мкм.

Как и следовало ожидать, согласно приведенным данным продукт из верхней части обладает большей величиной удельной поверхности ($7,60 \text{ м}^2/\text{г}$) по сравнению с порошком железа из нижней части ($5,38 \text{ м}^2/\text{г}$).

Заключение

В атмосфере очищенного аргона в стальном тигле при $t = 800^\circ\text{C}$ осуществлено восстановление железа из его дихлорида кальцием, растворенным в расплаве CaCl_2 . Показано, что практически все восстановленное железо находится в солевом расплаве во взвешенном состоянии.

Микрофотографии отмытых и высушенных порошков железа показывают, что они состоят из мелких зерен примерно одинакового размера для верхнего и придонного слоев плава, которые срастаются в линейные и объемные образования. В верхней части плава преобладают линейные сродки длиной от 40 до 600 мкм, а в придонной — больше доля лучше сформированных объемных сродков.

Гранулометрический состав продукта из верхнего плава находится в пределах 35—560 мкм с доминирующим размером частиц 157 мкм и удельной поверхностью $7,60 \text{ м}^2/\text{г}$. После ультразвукового диспергирования порошок существенно измельчается до 5—85 мкм с преобладающим размером 26 мкм. Порошок из придонного плава показал более узкий фракционный диапазон 48—375 мкм и более низкий средний размер частиц (124 мкм) с удельной поверхностью $5,38 \text{ м}^2/\text{г}$. После ультразвукового диспергирования материал существенно не измельчился: гранулометрический состав был в интервале от 17 до 225 мкм с основным размером частиц 71 мкм.

Количественный рентгенофазовый анализ порошка показал, что он более чем на 97 мас.% состоит из металлического железа.

Крупность полученного данным способом материала (из верхней части плава) соответствует требованиям, предъявляемым к железным порошкам для аддитивных технологий, и порошок может использоваться в них в качестве исходного сырья после проведении классификации и сфероидизации.

Литература

1. Лыков П.А. Разработка гидропневмоагрегатов машин по производству микропорошков из жидких металлов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: ЮУрГУ, 2014. <http://tekhnosfera.com/view/447915/a?#?page=1>.
2. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К., Кипарисов С.С., Костиков В.И., Крупин А.В., Кудинов В.В., Либенсон Г.А., Митин Б.С., Роман О.В. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. М.: Металлургия, 1987.
3. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия, 1972.
4. Ramakrishnan P. Iron powder from iron scrap // Conservat. Recycl. 1983. Vol. 6. No. 1. P. 49—54. DOI: dx.doi.org/10.1016/0361-3658(83)90016-4.
5. Hoeges S., Zwiren A., Schade C. Additive manufacturing using water atomized steel powders // Metal Powder Rep. 2017. Vol 72. No. 2. P. 111—117. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.mprp.2017.01.004.
6. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении: Пособие для инженеров. М.: НАМИ, 2015. С. 160—171.
7. Tsantrizos P.G., Allaire F., Entezarian M. Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization: Pat. 5707419 (USA). 1998. <https://www.google.com/patents/US5707419>.
8. Boulos M. Plasma power can make better powders // Metal Powder Rep. 2004. Vol. 59. No. 5. P. 16—21. DOI: dx.doi.org/10.1016/S0026-0657(04)00153-5.
9. Александров В.Г. Влияние «теплого прессования» и степени легирования на структуру и свойства изделий из металлических порошков: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь: ПНИПУ, 2005. http://pstu.ru/files/file/adm/dissertacii/aleksandrov/aftoreferat_aleksandrov_vg.pdf.
10. Ye Q., Zhu H., Zhang L., Ma J., Zhou L., Liu P., Chen J., Chen G., Peng J. Preparation of reduced iron powder using combined distribution of wood-charcoal by microwave heating // J. Alloys and Compd. 2014. Vol. 613. P. 102—106. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.016.
11. Martin M.I., Lopez F.A., Torralba J.M. Production of sponge iron powder by reduction of rolling mill scale // Ironmaking and Steelmaking. 2012. Vol 39. No. 3. P. 155—162.
12. Squires A.M., Johnson C.A. The h-iron process // J. Metals. 1957. P. 586—590.
13. Brooks J. Production of ferrous chloride and metallic iron powder: Pat. 2762700 A (US). 1956.

14. Gaballah N., Zikry A., Khalifa M., Farag A., El-Hussiny N., Shalabi M. Production of iron from mill scale industrial waste via hydrogen // *Open J. Inorg. Non-metal. Mater.* 2013. Vol. 3 No. 3. P. 23—28. DOI: dx.doi.org/10.4236/ojinm.2013.33005.
15. Bloemacher D. Carbonyl iron powders: Its production and new developments // *Metal Powder Rep.* 1990. Vol. 45. No. 2. P. 117—119. DOI: dx.doi.org/10.1016/S0026-0657(10)80122-5.
16. Benchiheb O., Mechachti S., Serrai S., Khalifa M.G. Elaboration of iron powder from mill scale // *J. Mater. Envir. Sci.* 2010. Vol. 1. No. 4. P. 267—276.
17. Despeisse M., Ford S. The role of additive manufacturing in improving resource efficiency and sustainability // *Proc. Int. Conf. APMS 2015*. United Kingdom: Institute for Manufacturing, University of Cambridge, 2015. <http://www.apms-conference.org>.
18. Petrick I., Simpson T. 3D Printing disrupts manufacturing // *Res. Technol. Management.* 2013. Vol. 56. No. 6. DOI: dx.doi.org/10.5437/08956308X5606193.
19. Berman B. 3-D Printing: The new industrial revolution // *Business Horizons.* 2012. Vol. 55. P. 155—162. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003.
20. Petrovic V., Gonzalez J., Ferrando O., Gordillo J., Puchades J., Griñan L. Additive layered manufacturing: Sectors of industrial application shown through case studies // *Int. J. Production Res.* 2011. Vol. 49. No. 4. P. 1061—1079. DOI: dx.doi.org/10.1080/00207540903479786.
21. Gibson I. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. N.Y.: Springer-Verlag, 2015. DOI: dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3.
22. Баймаков Ю.В., Ветюков М.М. Электролиз расплавленных солей. М.: Metallurgiya, 1966.
23. Родякин В.В. Metallurgiya kalcija. М.: Metallurgiya, 1957.
24. Лантев Д.А., Поляков В.В., Бабин А.В., Лебедев В.А. Восстановительная способность растворов кальция в его расплавленном хлориде // *Матер. 3-й науч.-техн. конф. «Metallurgiya legkikh i tupo-plavkikh metallov»* (10—11 окт. 2014). Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 169—172.
2. Antsiferov V.N., Bobrov G.V., Druzhinin L.K., Kiparisov S.S., Kostikov V.I., Krupin A.V., Kudinov V.V., Libenson G.A., Mitin B.S., Roman O.V. Poroshkovaya metallurgiya i napylennye pokrytiya [Powder metallurgy and spray coatings]. Moscow: Metallurgiya, 1987.
3. Kiparisov S.S., Libenson G.A. Poroshkovaya metallurgiya [Powder metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1972.
4. Ramakrishnan P. Iron powder from iron scrap. *Conservat. Recycl.* 1983. Vol. 6. No. 1. P. 49—54. DOI: dx.doi.org/10.1016/0361-3658(83)90016-4.
5. Hoeges S., Zwiren A., Schade C. Additive manufacturing using water atomized steel powders. *Metal Powder Rep.* 2017. Vol. 72. No. 2. P. 111—117. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.mprp.2017.01.004.
6. Zlenko M.A., Nagaitsev M.V., Dovbysh V.M. Additivnyye tekhnologii v mashinostroenii: Posobie dlya inzhenerov [Additive technologies in mechanical engineering: The manual for engineers]. Moscow: NAMI, 2015. P. 160—171.
7. Tsanzizos P.G., Allaire F., Entezarian M. Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization: Pat. 5707419 (USA). 1998. <https://www.google.com/patents/US5707419>.
8. Boulos M. Plasma power can make better powders. *Metal Powder Rep.* 2004. Vol. 59, No. 5. P. 16—21. DOI: dx.doi.org/10.1016/S0026-0657(04)00153-5.
9. Aleksandrov V.G. Vliyanie «teplogo pressovaniya» i stepeni legirovaniya na strukturu i svoystva izdelii iz metallicheskih poroshkov [The influence of «warm pressing» and the degree of alloying on the structure and properties of products made of metallic powders]: Abst. Diss. of PhD. Perm': PNIPU, 2005. http://pstu.ru/files/file/adm/dissertacii/aleksandrov/aftoreferat_aleksandrov_vg.pdf.
10. Ye Q., Zhu H., Zhang L., Ma J., Zhou L., Liu P., Chen J., Chen G., Peng J. Preparation of reduced iron powder using combined distribution of wood-charcoal by microwave heating. *J. Alloys and Compd.* 2014. Vol. 613. P. 102—106. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.016.
11. Martin M.I., Lopez F.A., Torralba J.M. Production of sponge iron powder by reduction of rolling mill scale. *Ironmaking and Steelmaking.* 2012. Vol. 39. No. 3. P. 155—162.
12. Squires A.M., Johnson C.A. The h-iron process. *J. Metals.* 1957. P. 586—590.
13. Brooks J. Production of ferrous chloride and metallic iron powder: Pat. 2762700 A (US). 1956.
14. Gaballah N., Zikry A., Khalifa M., Farag A., El-Hussiny N., Shalabi M. Production of iron from mill scale industrial waste via hydrogen. *Open J. Inorg. Non-metal. Mater.* 2013. Vol. 3 No. 3. P. 23—28. DOI: dx.doi.org/10.4236/ojinm.2013.33005.

References

1. Lykov P.A. Razrabotka gidropnevmoagregatov mashin po proizvodstvu mikroporoshkov iz zhidkikh metallov [Development of hydropneumatic machines for the production of micropowders from liquid metals]: Abst. Diss. of PhD. Chelyabinsk: YuUrGU, 2014. <http://tekhnosfera.com/view/447915/a?#?page=1>.

15. Bloemacher D. Carbonyl iron powders: Its production and new developments. *Metal Powder Rep.* 1990. Vol. 45. No. 2. P. 117—119. DOI: dx.doi.org/10.1016/S0026-0657(10)80122-5.
16. Benchiheub O., Mechachti S., Serrai S., Khalifa M.G. Elaboration of iron powder from mill scale. *J. Mater. Envir. Sci.* 2010. Vol. 1. No. 4. P. 267—276.
17. Despeisse M., Ford S. The role of additive manufacturing in improving resource efficiency and sustainability. In: *Proc. Int. Conf. APMS 2015*. United Kingdom: Institute for Manufacturing, University of Cambridge, 2015. <http://www.apms-conference.org>.
18. Petrick I., Simpson T. 3D Printing disrupts manufacturing. *Res. Technol. Management.* 2013. Vol. 56. No. 6. DOI: dx.doi.org/10.5437/08956308X5606193.
19. Berman B. 3-D Printing: The new industrial revolution. *Business Horizons.* 2012. Vol. 55. P. 155—162. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003.
20. Petrovic V., Gonzalez J., Ferrando O., Gordillo J., Puchades J., Griñan L. Additive layered manufacturing: Sectors of industrial application shown through case studies. *Int. J. Product. Res.* 2011. Vol. 49. No. 4. P. 1061—1079. DOI: dx.doi.org/10.1080/00207540903479786.
21. Gibson I. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. N.Y.: Springer-Verlag, 2015. DOI: dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3.
22. Baimakov Yu.V., Vetyukov M.M. Elektroliz rasplavlennykh solei [Electrolysis of molten salts]. Moscow: Metallurgiya, 1966.
23. Rodyakin V.V. Metallurgiya kal'tsiya [Metallurgy of calcium]. Moscow: Metallurgiya, 1957.
24. Laptev D.A., Polyakov V.V., Babin A.V., Lebedev V.A. Vosstanovitel'naya sposobnost' rastvorov kal'tsiya v ego rasplavlennom chloride. In: *Metallurgiya legkikh i tugoplavkikh metallov: Mater. 3 nauch.-tekhn. konf.* [Reducing ability of calcium solutions in its molten chloride. In: *Metallurgy of light and refractory metals: Mater. 3-rd Sci. and Techn. Conf.*] (10—11 Oct. 2014). Ekaterinburg: UrFU, 2014. P. 169—172.

Уважаемые коллеги!

Предлагаем вашему вниманию новую книгу

ФТОРИДНЫЙ ПЕРЕДЕЛ В ТЕХНОЛОГИИ ВОЛЬФРАМА

Автор: Ю.М. Королев

М.: Изд-во «Спутник +», 2018. — 152 с. ISBN 978-5-9973-4806-9



В книге описана принципиально новая технология производства беспористых полуфабрикатов и готовых изделий из вольфрама нелимитированных размеров, что расширяет ассортимент и повышает качество выпускаемой продукции. Фторидный передел в технологии вольфрама базируется на получении гексафторида вольфрама и его газофазном восстановлении водородом при полном кругообороте фторсодержащих компонентов и водорода, что обеспечивает экологическую чистоту производства, а также отсутствие расходующихся реагентов и складываемых отходов. Приведены методики оптимизации процессов и аппаратурно-технологические решения для производства крупногабаритных заготовок для последующей деформации, а также разнообразных изделий из плотного вольфрама, которые затруднительно или невозможно получить традиционными методами. Предлагаемая технология позволяет значительно снизить себестоимость выпускаемой продукции. Приведены физико-механические свойства получаемого вольфрама.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников, занятых в области разработки, производства и применения изделий из вольфрама, а также для преподавателей, аспирантов и студентов металлургических и металловедческих специальностей.