

DOI: 10.18721/JEST.230125

УДК 621.762.2:621.926

А.В. Григорьев, Н.Г. Разумов, А.А. Попович, А.В. Самохин

ПЛАЗМЕННАЯ СФЕРОИДИЗАЦИЯ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ Nb-Si, ПОЛУЧЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Аддитивные технологии являются способом изготовления изделий различной формы по данным компьютерной модели путем послойного добавления материала в виде порошка. Общие требования к порошкам для аддитивных технологий — сферическая форма частиц и высокая однородность гранулометрического состава. Характеристики производимых в настоящее время порошков явно лимитируют область применения аддитивных технологий. Разработка новых методов получения исходных материалов для аддитивных технологий позволит расширить номенклатуру используемых сплавов. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по обработке в потоке термической плазмы порошковых сплавов на основе системы Nb-Si, полученных с помощью механического легирования элементарных порошков Nb, Si, Al, Ti и Cr. В результате комплекса выполненных экспериментальных исследований показана принципиальная возможность получения сферических порошковых сплавов на основе системы Nb-Si из порошков, полученных механическим легированием. Показано, что поверхность получаемых частиц после сфероидизации неровная и отображает литую структуру материала. На микрошлифах выявлены три фазовых составляющих, имеющих различный оптический контраст: Nb₅Si₃, Nb₃Si и Nb_{тв.р-р.}, что подтверждается результатами рентгенофазового анализа.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ; ПЛАЗМЕННАЯ СФЕРОИДИЗАЦИЯ; ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЛАЗМА; ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ; СФЕРИЧЕСКИЙ ПОРОШОК.

Ссылка при цитировании:

А.В. Григорьев, Н.Г. Разумов, А.А. Попович, А.В. Самохин. Плазменная сфероидизация порошков на основе сплавов Nb-Si, полученных механическим легированием // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 247–255. DOI: 10.18721/JEST.230125

A.V. Grigoriev, N.G. Razumov, A.A. Popovich, A.V. Samokhin

PLASMA SPHEROIDIZATION OF Nb-Si-BASED POWDER ALLOYS OBTAINED BY MECHANICAL ALLOYING

Additive technologies are a method of making products of various shapes by adding layers of material in powder using a computer model. The general requirement to powders for additive technology is a spherical particle shape and particle size distribution of high uniformity. Today, the characteristics of powders limit the field of application of additive technologies. Development of new methods for obtaining raw materials for additive technologies will expand the range of used alloys. This paper presents the results of experimental studies of a Nb-Si-based powder alloy, produced by mechanical alloying of Nb, Si, Al, Ti and Cr elemental powders in the flow of thermal plasma. Experimental results show that plasma spheroidizing of Nb-Si-based powders obtained by mechanical alloying is possible. It is shown that after spheroidization the particle surface is rough, which indicates the cast structure of the material. Three phases having different optical contrast are revealed on microsections: Nb₅Si₃, Nb₃Si and Nb_{ss}, which is confirmed by X-ray diffraction.

MECHANICAL ALLOYING; PLASMA SPHEROIDIZATION; THERMAL PLASMA; HEAT RESISTANT ALLOY; SPHERICAL POWDER.

Citation:

A.V. Grigoriev, N.G. Razumov, A.A. Popovich, A.V. Samokhin, Plasma spheroidization of Nb-Si-based powder alloys obtained by mechanical alloying, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (1) (2017) 247–255, DOI: 10.18721/JEST.230125

Введение

Аддитивные технологии, широко известные как трехмерная печать, являются способом изготовления изделий различной формы по данным компьютерной модели путем послойного добавления материала в виде порошка, проволоки, жидкости и др. [1]. Трехмерная печать изделий из металлов и их сплавов представляет большой интерес для многих высокотехнологичных отраслей промышленности. Усиленный интерес к аддитивным технологиям вызван прежде всего возможностью создания объектов сложной геометрической формы за короткий период времени без необходимости изготовления дополнительной оснастки [2].

Общие требования к порошкам для аддитивных технологий — сферическая форма частиц и высокая однородность гранулометрического состава. Сферическая форма обеспечивает более компактную укладку частиц в определенный объем, а также текучесть порошка с минимальным сопротивлением в системах подачи материала. Более 90 % всех порошков, применяемых в аддитивных технологиях, получают методами диспергирования (распыление) расплава [3–5]. К основным технологиям получения порошков для установок послойного синтеза относят газовую и центробежную атомизацию. Методы атомизации позволяют получать мелкодисперсные порошки со сферической формой частиц при достаточно высокой производительности процесса с контролируемой дисперсностью порошка и обеспечивают высокий выход годного по фракции порошка, однако у данного типа методов есть ряд недостатков [5]. Так, например, частицы порошка, получаемые методами газовой атомизации, могут иметь внутреннюю пористость из-за захлопывания инертного газа внутри частиц в процессе их кристаллизации. Наиболее характерный и неизбежный дефект порошков, получаемых распылением жидкого металла потоком инертного газа, — это сателлиты, то есть «налипание» мелких частиц на более крупные и т. д.

Характеристики производимых в настоящее время порошков явно лимитируют область применения аддитивных технологий, в частности узок спектр порошков по химическому составу. В результате нельзя реализовать возможности по обеспечению свойств конструкционных и функциональных материалов, а также достичь высокой точности изготовления и качества поверхности. Разработка новых методов получения исходных материалов для аддитивных технологий позволит расширить номенклатуру используемых сплавов. Один из альтернативных путей получения порошков — механические методы (размол, механическое легирование) [6, 7] с последующей сфероидизацией. Порошки, получаемые путем размолла на данный момент для аддитивных технологий не применяют, так как их частицы имеют осколочную, неправильную форму. Для придания сферической формы порошкам применяется сфероидизация — преобразование исходного порошкового материала неравноосной формы с целью получения частиц с формой близкой к сферической. Существует несколько методов сфероидизации порошков, один из которых — термическое воздействие потока плазмы [8, 9]. Высокая температура, достигающая в струе плазмы 10000 °С, позволяет расплавлять и испарять даже самые тугоплавкие соединения. Контролируя такие параметры, как скорость подачи, траектория движения порошка, расход плазмообразующего газа и мощность плазменного потока, можно добиться получения частиц соединений заданного состава со сферической формой [10–14].

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по обработке в потоке термической плазмы порошковых сплавов на основе системы Nb-Si, полученных с помощью механического легирования элементарных порошков Nb, Si, Al, Ti и Cr.

Материалы и методы

Порошки сплавов Nb-16Si, Nb-25Ti-2Al-2Cr-16Si и Nb-24Ti-2Al-10Cr-16Si были получены механическим легированием порошков

чистых элементов в планетарной мельнице Fritsch Pulverisette 4. В качестве исходных компонентов использовали элементарные порошки с чистотой 99 %. Скорость вращения реакторов — 200 об/мин, соотношение массы загружаемого порошка к массе шаров — 1:10, время синтеза — 6 часов. Подготовка порошков для механического легирования и загрузка в реактор мельницы проводилась в атмосфере аргона в герметичной перчаточной камере.

Экспериментальные исследования по индукционной плазменной сфероидизации порошков сплава Nb-16Si были выполнены с использованием плазменной установки ИМЕТ имени А.А. Байкова РАН на базе электродугового генератора термической плазмы с вихревой стабилизацией разряда [9] при следующих диапазонах значений параметров процесса: мощность плазмотрона — 18 кВт; расход плазмообразующего газа (аргон, аргон-водородные смеси) — 2 м³/ч, расход порошка — 3 г/мин.

Аналогичные исследования порошков сплавов Nb-25Ti-2Al-2Cr-16Si и Nb-24Ti-2Al-10Cr-16Si, полученных механолегированием, выполнены с использованием установки TekSphero 15 производства Tekna Plasma Systems Inc. (Канада) при следующих значениях параметров процесса: мощность плазмотрона — 15 кВт; расход плазмообразующего газа (аргон-водородная смесь) — 2,4 м³/ч; расход порошка — 40 г/мин.

Фазовый состав изучали методом рентгенофазового анализа на установке Bruker D8 Advance в CuK α -излучении ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$).

Дальнейшая обработка дифракционных данных осуществлялась по методу Ритвельда с использованием программы Diffrac Plus Topas фирмы BRUKER. Исследование морфологии частиц и структуры полученных сплавов проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа Mira 3 Tescan. Распределение элементов по объему частицы порошка определяли на шлифах методом рентгеновского микроанализа с помощью приставки Oxford INCA Wave 500 к сканирующему электронному микроскопу.

Результаты и их обсуждение

На начальном этапе экспериментальные исследования по индукционной плазменной сфероидизации порошков выполняли на базовом сплаве Nb-16Si. В качестве исходных использовались порошки сплава осколочной формы с размером частиц до 100 мкм, полученные механическим легированием (рис. 1). При детальном исследовании порошка установлено, что частицы представляют собой агломераты микронных и субмикронных частиц с довольно равномерным распределением исходных компонентов по объему.

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что в потоке термической плазмы аргона с добавками водорода, генерируемой в электродуговом плазмотроне, могут быть получены сферические порошки сплава Nb-16Si (рис. 2). Ввиду наличия в исходном сырье широкого распределения частиц по размерам и низкой механической

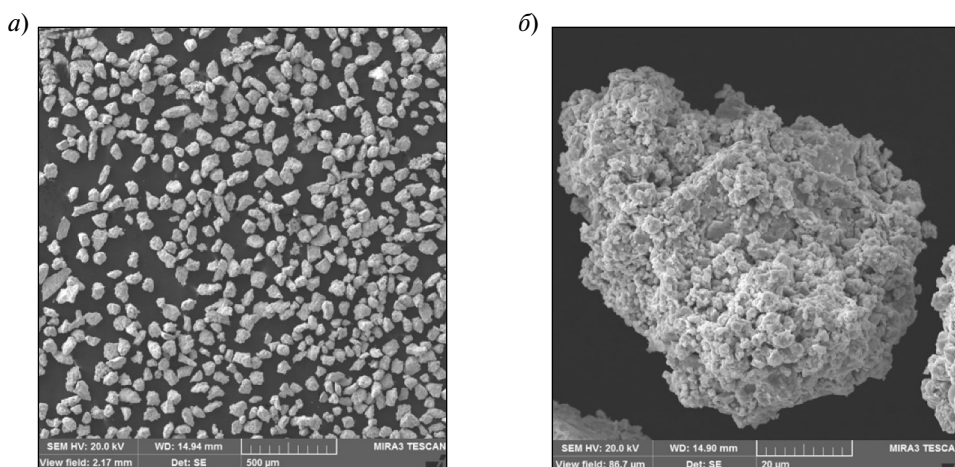


Рис. 1. Морфология частиц порошка Nb-16Si после механического легирования

прочности частиц, приводящей к их разрушению на мелкие фрагменты, в процессе плазменной сфероидизации возможно испарение наиболее мелких частиц с последующей конденсацией паров в виде мелкодисперсных и субмикронных частиц (рис. 2, б). Результаты исследования гранулометрического состава (рис. 2, в) показали, что при сфероидизации происходит уменьшение размера частиц, вызванное уплотнением агломератов и частичным испарением материала с поверхности частиц при оплавлении.

На рис. 3 приведены изображения частиц порошка после удаления загрязняющих мелкодисперсных и субмикронных частиц путем промывки в ультразвуковой ванне. Визуально

определяемые периодические изменения на поверхности частицы (рис. 3, а, б), вызванные кристаллизационными процессами, соответствуют поперечным размерам ячеисто-дендритных кристаллитов, которые образуются в объеме капли (рис. 4). Их вершины в процессе радиального роста достигают поверхности частицы, где вследствие объемной усадки остаточного расплава при затвердевании возникают оконтуривающие их канавки. Обращает на себя факт различия поверхности крупных и мелких частиц, что вызвано различной скоростью охлаждения частиц. С уменьшением размера частиц скорость их охлаждения увеличивается, что препятствует росту дендритов.

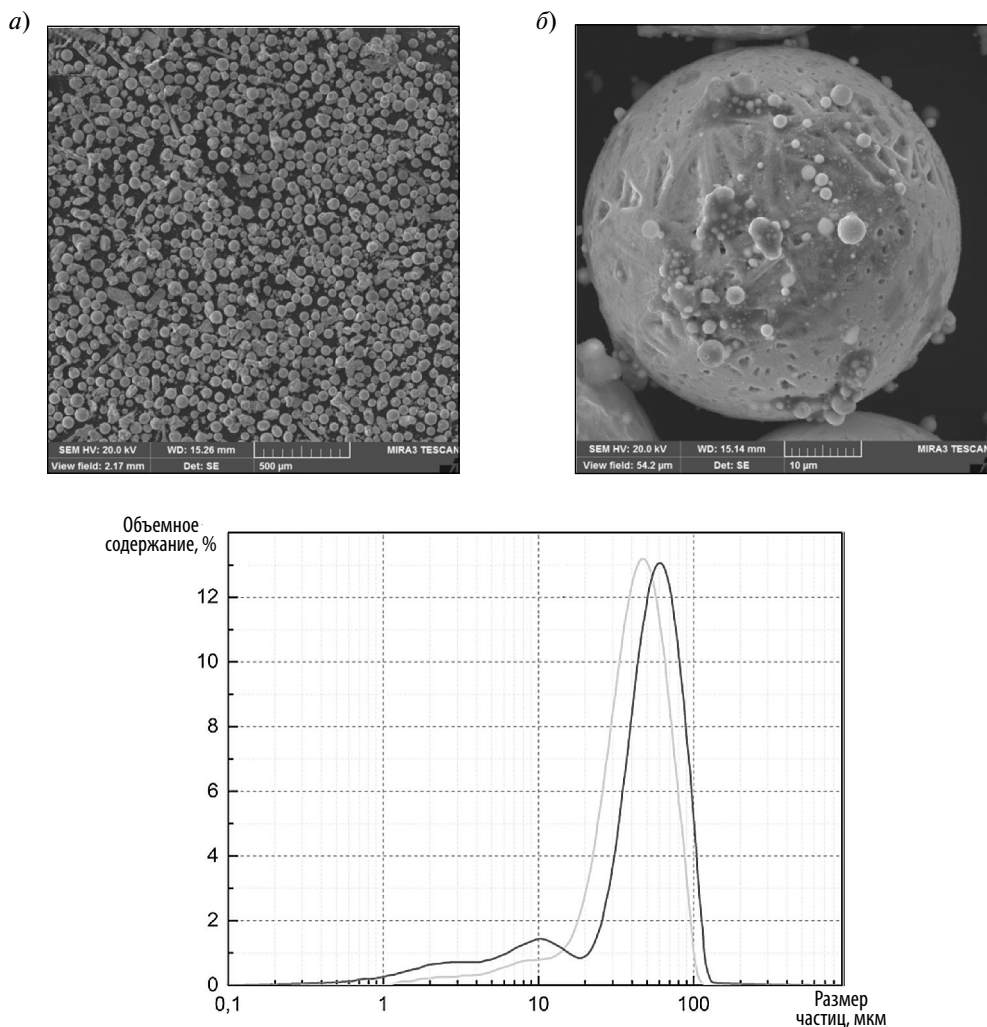


Рис. 2. Морфология частиц (а, б) и гранулометрический состав (в) порошка сплава Nb-16Si после плазменной сфероидизации на установке ИМЕТ РАН:
 ————— — после сфероидизации; ————— — до сфероидизации

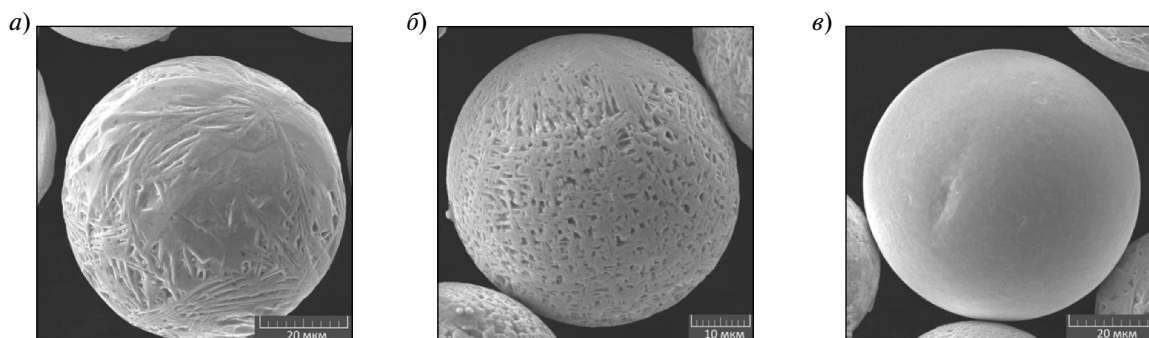


Рис. 3. Морфология частиц порошка сплава Nb-16Si после плазменной сфероидизации на установке ИМЕТ РАН

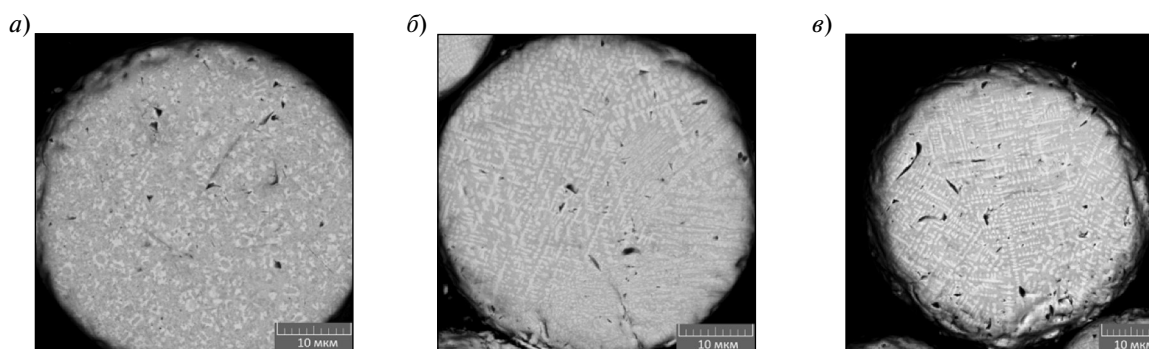


Рис. 4. Микроструктура частиц порошка сплава Nb-16Si после плазменной сфероидизации на установке ИМЕТ РАН

Исследование микрошлифов показало, что сферические частицы имеют структуру, состоящую из равноосных дендритов (см. рис. 4), размеры которых на периферии частиц мало отличаются от размеров дендритов центральных областей. Порядок осей подобных дендритов сложно определить, поскольку направление роста не всегда можно отчетливо проследить. С увеличением размера частиц расстояние между дендритными ветвями увеличивается, поскольку повышение продолжительности затвердевания интенсифицирует процесс коалесценции, вызывая растворение тонких ветвей с расширением междудендритных промежутков.

На микрошлифах видны три фазовых составляющих, которые имеют различный оптический контраст: темно-серая, серая, светло-серая (см. рис. 4). Наиболее темная фаза с минимальной плотностью соответствует интерметаллиду Nb_5Si_3 , серая — Nb_3Si , а светлая фазовая составляющая — $Nb_{ТВ,Р-Р}$, что подтверждается кривой распределения элементов в объеме частицы.

Наличие пор микронного и субмикронного размера во внутренней структуре сферических частиц может быть связано либо с образованием водяных паров в результате водородного восстановления оксидов металлов, либо с перегревом частиц. Известно, что процесс сфероидизации частицы в потоке плазмы требует ее нагрева до температуры плавления и полного передела. По причине того, что исходный порошок имеет довольно широкое распределение по гранулометрическому составу, возможен перегрев (нагрев до температуры кипения) некоторых частиц, что ведет к образованию пузырьков внутри частицы, ухудшающих физико-химические свойства готового материала.

Рентгенофазовый анализ порошков, полученных механолегированием, показал наличие пиков твердого раствора ниобия ($Nb_{ТВ,Р-Р}$), а также силицидов ниобия — Nb_5Si_3 , Nb_3Si (рис. 5). Основные пики на рентгенограмме отвечают твердому раствору ниобия с кубической решеткой и параметром $a = 3,33 \text{ \AA}$, а также силициду

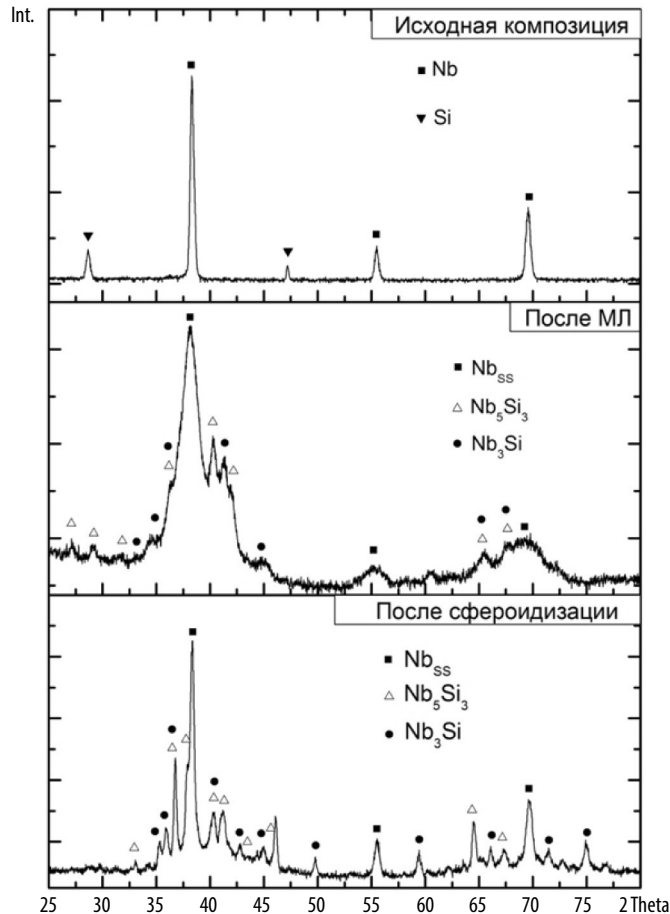


Рис. 5. Изменение фазового состава композиции Nb-16Si после механического легирования и сфероидизации на установке ИМЕТ РАН

ниобия Nb_5Si_3 с гексагональной решеткой (P63/m) $a = 7,536 \text{ \AA}$ и $c = 5,249 \text{ \AA}$. Широкие пики указывают на сильное искажение кристаллической решетки, образовавшееся в результате интенсивного механического воздействия. После сфероидизации гексагональная решетка силицида ниобия Nb_5Si_3 трансформируется в тетрагональную решетку (I4/m) с параметрами $a = 6,557 \text{ \AA}$ и $c = 11,86 \text{ \AA}$. Остальные фазовые составляющие остаются неизменными.

На следующем этапе работ экспериментальные исследования по индукционной плазменной сфероидизации проводились с использованием установки TekSphero 15 производства Tekna Plasma Systems Inc. (Канада). Ее отличие от установки ИМЕТ РАН — в источнике генерации плазменного разряда. Генерация плазмы в установке ИМЕТ имени А.А. Байкова РАН

происходит за счет электродугового разряда, а в TekSphero 15 — с использованием высокочастотного индуктора.

В ходе проведенных исследований были получены сферические порошки сплавов Nb-25Ti-2Al-2Cr-16Si и Nb-24Ti-2Al-10Cr-16Si (рис. 6). Они очень схожи с порошками сплава Nb-16Si. Как и у сплава Nb-16Si, у полученных порошков поверхность неровная и отображает литую структуру материала. Также визуально определяются периодические изменения на поверхности частицы, вызванные кристаллизационными процессами. Исследования распределения легирующих элементов в плоскости шлифа показали, что после плазменной сфероидизации в частице сохраняется практически равномерное распределение элементов, полученное после механического легирования.

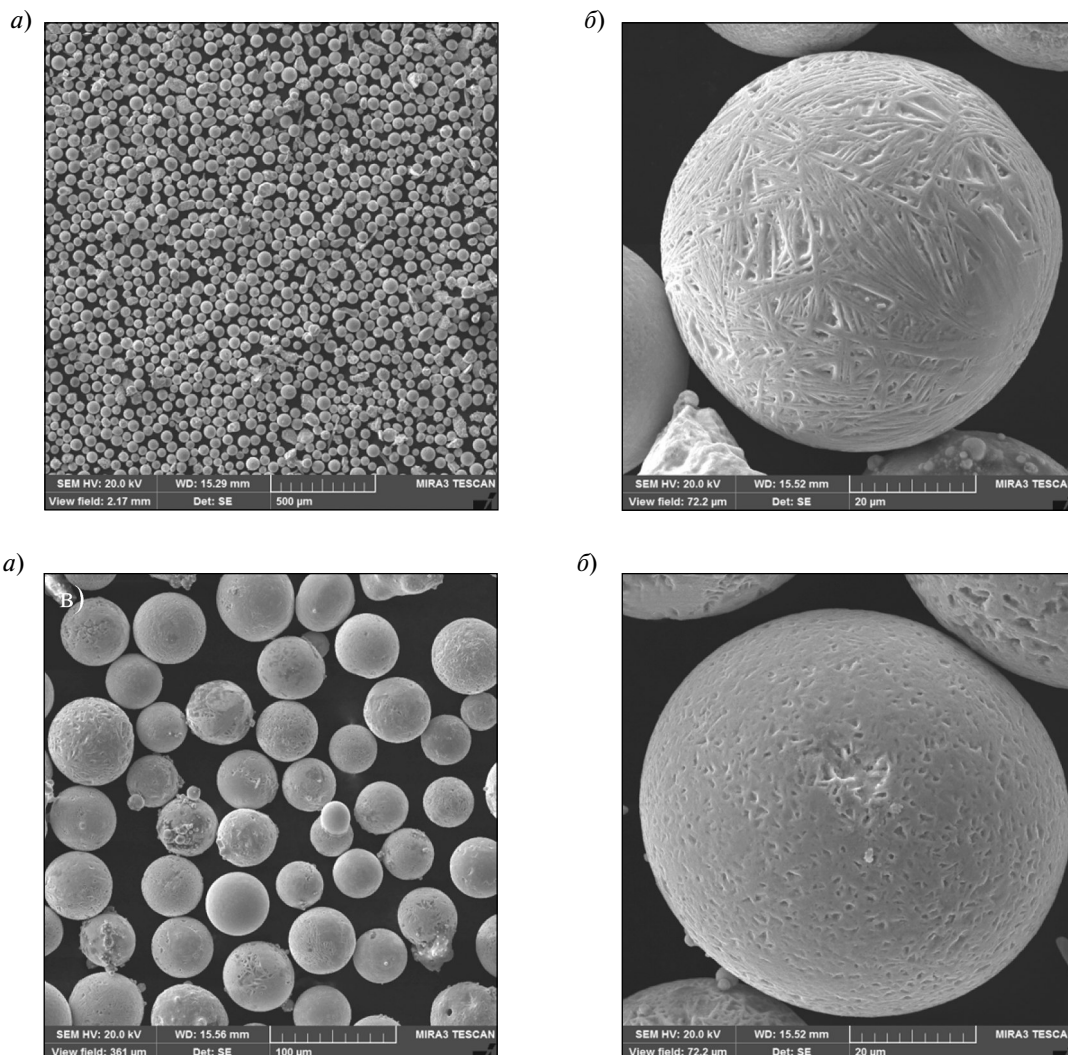


Рис. 6. Морфология частиц порошка сплавов Nb-25Ti-2Al-2Cr-16Si (а, б) и Nb-24Ti-2Al-10Cr-16Si (в, г) после плазменной сфероидизации на установке TekSphero 15

Заключение

Выполненные работы показали принципиальную возможность процесса плазменной сфероидизации порошков сплавов на основе системы Nb-Si. Показано, что из-за широкого распределения частиц по размерам в исходном сырье и низкой механической прочности частиц, приводящей к их разрушению на мелкие фрагменты, в процессе плазменной сфероидизации возможно испарение наиболее мелких частиц с последующей конденсацией паров в виде мелкодисперсных и субмикронных частиц. Поверхность полученных частиц неров-

ная и отображает литую структуру материала. Рентгенофазовый анализ порошков показал наличие пиков твердого раствора ниобия ($Nb_{\text{тв.р-р}}$), а также силицидов ниобия — Nb_5Si_3 , Nb_3Si , что подтверждается результатами исследований микрошлифов. Вопросы, требующие особого внимания при продолжении работ: элементный и фазовый состав исходного сырья; присутствие примесей; фракционный состав исходного сырья; механическая прочность гранул исходного сырья.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15–13–00062).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Frazier W.E.** Metal Additive Manufacturing: A Review // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014. Vol. 23, No 6. P. 1917–1928.
2. **Wohlers T.** Wohlers Report 2014: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry // *Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates Inc. 2014. 275 p.
3. **Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S.** The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2015. Vol. 229, No 11. P. 2132–2147.
4. **Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C., Wang C., Shin Y., Zhang S., Zavattieri P.** The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering // *Computer-Aided Design*. 2015. Vol. 69. P. 65–89.
5. **Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н.** Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 222 с.
6. **Suryanarayana C.** Mechanical alloying and milling // *Progress in Material Science*, 2001. Vol. 46. P. 1–184.
7. **Попович А.А.** Механохимический синтез тугоплавких соединений. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. 199 с.
8. **Зверев С.Г.** Разработка и исследование высокочастотной плазменной установки для обработки тугоплавких дисперсных материалов: Дисс. ... канд. тех. наук / СПбГПУ. СПб., 2002. 239 с.
9. **Патент РФ №2311225.** Плазменная установка для получения нанодисперсных порошков / Алексеев Н.В., Самохин А.В., Цветков Ю.В. Приоритет 27.11.2007.
10. **Chaturvedi V., Ananthapadmanabhan P. V., Chakravarthy Y., Bhandari S., Tiwari N., Pragatheeswaran A., Das A.K.** Thermal plasma spheroidization of aluminum oxide and characterization of the spheroidized alumina powder // *Ceramics International*. 2014. Vol. 40, No 6. P. 8273–8279.
11. **Kumar S., Selvarajan V.** Plasma spheroidization of iron powders in a non-transferred DC thermal plasma jet // *Materials Characterization*. 2008. Vol. 59, No 6. P. 781–785.
12. **Yang S., Gwak J.-N., Lim T.-S., Kim Y.-J., Yun J.-Y.** Preparation of spherical titanium powders from polygonal titanium hydride powders by radio frequency plasma treatment // *Materials Transactions*. 2013. Vol. 54, No 12. P. 2313–2316.
13. **Zhu H.L., Tong H.H., Yang F.Z., Wang Q., Cheng C.M.** A comparative study on radio-frequency thermal plasma spheroidization for two types of alumina ceramic powder. *Advanced // Materials Research*. 2014. Vol. 1058. P. 221–225.
14. **Tong J.B., Lu X., Liu C.C., Wang L.N., Qu X.H.** Fabrication of micro-fine spherical high Nb containing TiAl alloy powder based on reaction synthesis and RF plasma spheroidization // *Powder Technology*. 2015. Vol. 283. P. 9–15.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГРИГОРЬЕВ Алексей Владимирович — генеральный конструктор ОАО «Климов» аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: klimov@klimov.ru

РАЗУМОВ Николай Геннадьевич — кандидат технических наук научный сотрудник Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: n.razumov@onti.spbstu.ru

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич — доктор технических наук профессор, директор ИММиТ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: popovicha@mail.ru

САМОХИН Андрей Владимирович — кандидат технических наук ведущий научный сотрудник Института металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова Российской академии наук. 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский пр-т, 49. E-mail: andrey.samokhin@gmail.com

REFERENCES

1. **Frazier W.E.** Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014. Vol. 23, No 6. P. 1917–1928.
2. **Wohlers T.** Wohlers Report 2014: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. *Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates Inc. 2014. 275 p.
3. **Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S.** The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2015. Vol. 229, No 11. P. 2132–2147.

4. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C., Wang C., Shin Y., Zhang S., Zavattieri P. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. 2015. Vol. 69. P. 65–89.
5. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. Additivnyye tekhnologii v mashinostroyenii [Additive technologies in mechanical engineering]. SPb: Izd-vo Politekh. un-ta, 2013. 222 s. (rus.)
6. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling. *Progress in Material Science*. 2001. Vol. 46. P. 1–184.
7. Popovich A.A. Mekhanokhimicheskiy sintez tugo-plavkikh soyedineniy [Mechanochemical synthesis of refractory compounds]. Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2003. 199 s. (rus.)
8. Zverev S.G. Razrabotka i issledovaniye vysokochastotnoy plazmennoy ustanovki dlya obrabotki tugoplavkikh dispersnykh materialov: Diss. ... kand. tekhn. nauk. [Research and development of high-frequency plasma systems for the treatment of refractory dispersed materials: dissertation] / SPbGPU. SPb., 2002. 239 s. (rus.)
9. Patent RF, №2311225. Plazmennaya ustanovka dlya polucheniya nanodispersnykh poroshkov [Plasma installation for obtaining nanopowders] / Alekseyev N.V., Samokhin A.V., Tsvetkov Yu.V. Prioritet 27.11.2007. (rus.)
10. Chaturvedi V., Ananthapadmanabhan P. V., Chakravarthy Y., Bhandari S., Tiwari N., Pragatheeswaran A., Das A.K. Thermal plasma spheroidization of aluminum oxide and characterization of the spheroidized alumina powder. *Ceramics International*. 2014. Vol. 40, No 6. P. 8273–8279.
11. Kumar S., Selvarajan V. Plasma spheroidization of iron powders in a non-transferred DC thermal plasma jet. *Materials Characterization*. 2008. Vol. 59, No 6. P. 781–785.
12. Yang S., Gwak J.-N., Lim T.-S., Kim Y.-J., Yun J.-Y. Preparation of spherical titanium powders from polygonal titanium hydride powders by radio frequency plasma treatment. *Materials Transactions*. 2013. Vol. 54, No 12. P. 2313–2316.
13. Zhu H.L., Tong H.H., Yang F.Z., Wang Q., Cheng C.M. A comparative study on radio-frequency thermal plasma spheroidization for two types of alumina ceramic powder. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1058. P. 221–225.
14. Tong J.B., Lu X., Liu C.C., Wang L.N., Qu X.H. Fabrication of micro-fine spherical high Nb containing TiAl alloy powder based on reaction synthesis and RF plasma spheroidization. *Powder Technology*. 2015. Vol. 283. P. 9–15.

AUTHORS

GRIGORIEV Aleksei V. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: klimov@klimov.ru

RAZUMOV Nikolai G. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: n.razumov@onti.spbstu.ru

POPOVICH Anatolii A. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: popovicha@mail.ru

SAMOKHIN Andrei V. — *Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences*. 49, Leninskii Prospect, Moscow, 119991, GSP-1. E-mail: andrey.samokhin@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 18.01.2017.